



**EGE ÜNİVERSİTESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**BAZI TERMOLÜMINESANS DEDEKTÖRLERİN  
FARKLI ENERJİLERDEKİ FOTONLARA KARŞI  
DEDEKTÖR CEVAP FONKSİYONLARININ  
MONTE CARLO YÖNTEMİYLE  
İNCELENMESİ**

**Bünyamin AYDIN**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU**

**Nükleer Bilimler Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 622.01.01**

**Sunuş Tarihi : 07.01.2014**

**E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Bornova-İZMİR**

**2014**



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**BAZI TERMOLÜMİNESANS DEDEKTÖRLERİN  
FARKLI ENERJİLERDEKİ FOTONLARA KARŞI  
DEDEKTÖR CEVAP FONKSİYONLARININ  
MONTE CARLO YÖNTEMİYLE  
İNCELENMESİ**

**Bünyamin AYDIN**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU**

**Nükleer Bilimler Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 622.01.01**

**Sunuş Tarihi: 07.01.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**



Bünyamin AYDIN tarafından DOKTORA tezi olarak sunulan “**Bazı Termolüminesans Dedektörlerin Farklı Enerjilerdeki Fotonlara Karşı Dedektör Cevap Fonksiyonlarının Monte Carlo Yöntemiyle İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 07/01/2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı : Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU** .....

**Raportör Üye: Doç. Dr. Gültekin YEĞİN** .....

**Üye : Prof. Dr. Perihan ÜNAK** .....

**Üye : Prof. Dr. Turgay KARALI** .....

**Üye : Prof. Dr. Tahsin BABACAN** .....



## ÖZET

# BAZI TERMOLÜMİNESANS DEDEKTÖRLERİN FARKLI ENERJİLERDEKİ FOTONLARA KARŞI DEDEKTÖR CEVAP FONKSİYONLARININ MONTE CARLO YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

AYDIN, Bünyamin

Doktora Tezi, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU

Ocak 2014, 123 sayfa

Birçok Termolüminesanas (TL) dozimetreleri “personel doz eşdeğerini” ölçmek için farklı alanlarda kullanılmaktadır. TL malzemelerin değişik dozimetrik özelliklerinin ve karakteristiklerinin belirlenerek analizlerinin yapılması gerekmektedir. TL malzemeleri için dedektör cevap fonksiyonlarının enerjiye bağlılığını veren verileri elde etmek, deneysel yöntemler kullanıldığında oldukça güçtür ve büyük hata değerleriyle birlikte ölçülebilmektedir. Bu dedektörler, bilgisayar ortamında modellendiğinde ayrıntılı bilgi almak mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada, farklı aktivatörler ile katkılanmış TLD olarak kullanılan LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> ve Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, malzemeleri modellenmiştir. Noktasal ve yönlü foton kaynaklarından, farklı uzaklıklardaki TL dozimetrelerin dedektör cevap fonksiyonlarının enerjiye bağlılığı MCNP Monte Carlo simülasyon yöntemi ile bulunmuştur.

Önceden yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Geniş enerji aralığında fotonların Bağlı TLD Cevapları hesaplanmıştır. Dedektöre katkılanan aktivatörler ve dedektör geometrisinin bağlı TLD cevaba etkisi incelenmiştir. TLD geometrisinin disk ve dikdörtgenler prizması biçiminde olması halinde sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kaynak ve dedektör arasındaki uzaklığın ve kaynağın noktasal veya yönlü olmasının istatistiksel hataya etkileri saptanmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Monte Carlo, MCNP, Simülasyon, Dedektör, TL, Foton.



**ABSTRACT****THE INVESTIGATION OF THE DETECTOR RESPONSE FUNCTIONS OF THE SOME THERMOLUMINESCENCE DETECTORS AGAINST THE PHOTONS IN DIFFERENT ENERGIES BY USING MONTE CARLO METHOD**

AYDIN, Bünyamin

Phd Thesis in Nuclear Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU

January 2014, 123 pages

Many of the Thermoluminescence (TL) dosimeters are used in different areas in order to measure “personnel dose equivalent”. It’s analyzes must be done by determining different dosimetric characteristics and specialty of TL the material. Obtaining data which supplies energy dependence of the detector response function for TL supplies is very difficult when experimental methods are used and can be measured with a large error value. It’s possible to get the detailed information when these detectors are modeled at computers.

In this study, LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> and Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, materials which are used as “TLD” doped with different activators are modeled. Pointwise and directional photon sources, in different distances TL dosimeter detector response function of the energy dependence has been found by the method of the MCNP Monte Carlo simulation method.

In previous studies with the results obtained have been compared with the values obtained in this study. Relative TLD responses are calculated wide energy range of photons Actuators participations the detector and the effect of the response to detector geometry’s relative TL" are investigated. The results are compared with TLD geometry in the shape of disk and rectangular prism The effects of the statistical error of the distance between source and detector and the source’s being directional or point was detected.

**Keywords:** Monte Carlo, MCNP, Simulation, Detector, TL, Photon.



## TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışmasının yürütülmesi esnasında tüm aşamalarda görüşlerinden yararlandığım doktora tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet N. Kumru'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Nükleer Bilimler Enstitüsünde gerçekleştirdiğim çalışmalar sırasında gerekli her türlü yardımı ve kolaylığı sağlayan Prof. Dr. Perihan Ünak'a, yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Gültekin Yeğın'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmalar sırasında adlarını sayamadığım ancak uzaktan ve yakından yardımlarına başvurduğum bütün herkese de teşekkürlerimi arz ederim.

Yoğun tez çalışmalarım esnasında bana destek çıkan ve sabırla yardımcı olan oğlum Muhammed Mustafa'ya, kızlarım Emine Sevde Sena ve Sümeyye Merve'ye; ilgi ve desteğini eksik etmeyen sevgili eşim Şaziye'ye en samimi teşekkürlerimi sunarım.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xxv
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Genel Bilgiler .....	2
1.1.1 Termoluminesans dozimetreler (TLD).....	2
1.1.2 Termoluminesans olayı ve bant modeli .....	3
1.1.3 Simülasyon yöntemi .....	6
1.1.4 Monte Carlo tekniği .....	7
2. LİTERATÜR ÖZETİ .....	9
3. MCNP RADYASYON TAŞIMA PROGRAMI .....	13
3.1 MCNP Kodu.....	13

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
3.1.1 Nesil akışı .....	19
3.1.2 Tesir kesitleri .....	20
3.1.3 Foton etkileşim verisi .....	20
3.1.4 Elektron etkileşim verisi .....	21
3.1.5 Parçacık yükü .....	21
3.1.6 Parçacık izleri .....	22
3.1.7 Tally (Ambar-veri çetelesi) .....	22
3.2 İstatistiksel Hata Hesabı .....	23
3.2.1 MCNP’de bağıl hataların hesaplanması .....	25
3.2.2 Parçacık akısı .....	26
3.3 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi .....	27
3.3.1 MCNP’de simüle edilen foton etkileşimleri .....	31
3.3.2 TTB yaklaşımı .....	31
3.3.3 Basit fizik işlemleri .....	31
3.3.4 Ayrıntılı parçacık fiziksel etkileşimleri .....	38

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. MATERYAL VE METOD .....	47
4.1 Dedektör Cevabı.....	47
4.2 MCNP-4C2 Program Kodunun Temin Edilmesi ve Kurulumu .....	49
4.2.1 Simülasyon için kaynak-dozimetre geometrisinin hazırlanması.....	50
4.2.2 Yönlü kaynak-dozimetre geometrisinde TLD ön yüzeyinin yarıçapının ve kaynak dozimetre arasındaki açının hesaplanması.....	53
4.2.3 Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan malzemeler ve yoğunlukları....	56
5. BULGULAR .....	59
5.1 Nesil Sayısı-Program Çalışma Süresi Arasındaki İlişki.....	59
5.1.1 Nesil sayısı-program çalışma süresi arasındaki ilişkinin noktasal ve yönlü kaynak farkı.....	60
5.2 Nesil Sayısı ve Dozimetreye Ulaşılan İlk Yüzeyi Geçen Parçacık Sayısı Arasındaki İlişki .....	61
5.3 Nesil Sayısı ve Dozimetrede Yüzeyi Geçen Parçacık Sayısı İçin Nesil Sayısı ile Bağlı Hata İlişkisi.....	61
5.4 Dozimetreye Ulaşan Her Parçacık Başına Bırakılan Enerji ve Nesil Sayısı Arasındaki Sayısal Değer İlişkisi .....	62
5.5 Dozimetreye Ulaşan Her Parçacık Başına Bırakılan Enerji İçin Nesil Sayısı ve Bağlı Hata Arasındaki İlişki .....	63

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

5.6	Kaynak İle Dozimetre Arasındaki Uzaklığın Bağlı TLD Cevaba Etkisi...	64
5.7	TL Dozimetre Malzemelerindeki Aktivatörlerin Bağlı TLD Cevaba Etkisi .....	65
5.8	TL Dozimetre Malzemesinin Dilimlenmesi Yöntemiyle Elde Edilen Enerji Cevabı.....	70
5.9	TLD Malzeme Geometrisinin Bağlı TLD Cevaba Etkisi.....	70
5.9.1	Silindir ve dikdörtgenler prizması .....	71
5.9.2	Silindir kalınlığı.....	71
5.10	LiF Dozimetresi İçin Elde Edilen Bulgular .....	74
5.10.1	LiF TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağlı TLD Cevaba etkisi.	77
5.10.2	LiF TL dozimetrede malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	81
5.10.3	LiF TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi.....	84
5.11	CaSO <sub>4</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular .....	87
5.11.1	CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	89
5.11.2	CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetrede malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	91
5.11.3	CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	92

**İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa

5.12 CaF <sub>2</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular.....	93
5.12.1 CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	95
5.12.2 CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetredeki malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi.....	96
5.12.3 CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	97
5.13 Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular .....	98
5.13.1 Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	104
5.13.2 Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> TL dozimetrelerdeki malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi.....	107
5.13.3 Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi .....	110
6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....	113
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	117
ÖZGEÇMİŞ .....	123



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. TLD'lerin radyasyon doz ölçüm mekanizması.....	4
3.1. Simülasyonda kullanılan MCNP genel veri giriş dosyası. ....	14
3.2. Bir gama fotonu dedektör malzemesine girdiğinde oluşabilecek olaylar....	30
3.3. Foton madde etkileşim mekanizması.....	32
3.4. Fotonun serbest elektrona dönüşmesi.....	33
3.5. Çift oluşum olayı. ....	34
3.6. Üç gama ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu enerji bölgeleri.	35
3.7. Compton saçılmasının geometrisi.....	36
3.8. Hidrojen için kullanılan form faktörü (Grodstein, 1957). ....	39
3.9. $C(Z,v)$ 'nin nitel özellikleri.....	41
4.1. Fotonun madde içerisinde etkileşimler arası olası yolunun gösterimi (Camgöz, 2008). ....	47
4.2. Jung et al. (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmanın şematik geometrik yapılandırılması. ....	50
4.3. Dikdörtgenler prizması biçiminde TLD ve noktasal kaynağın gösterimi. ...	51
4.4. Silindir biçiminde TLD ve noktasal kaynağın gösterimi.....	52
4.5. Noktasal kaynağın konumunun giriş dosyasında gösterimi. ....	52
4.6. Yüzey için r'nin hesabı .....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7. Yönlendirilmiş kaynak ve dozimetre malzemesi arasındaki açının hesabı..	53
4.8. Kaynaktan yayımlanan fotonların dikkate alındığı durumun sayısal gösterimi. .....	54
4.9. Radyasyon kaynağının yönlü olması durumunun giriş dosyasında gösterimi. .....	54
4.10. Dikdörtgenler prizması biçiminde TLD ve yönlü kaynağın gösterimi. ....	55
4.11. Silindir biçiminde TLD ve yönlü kaynağın gösterimi. ....	55
5.1. Nesil sayısı ve dozimetrede yüzeyi geçen parçacık sayısı için, Nesil sayısı ile Bağlı Hata arasındaki grafik gösterimi. ....	62
5.2. Dozimetreye ulaşan her parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayıları arasındaki grafik gösterimi. ....	63
5.3. Dozimetreye ulaşan her parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayısı için, Nesil Sayısı ve Bağlı Hata arasındaki grafik gösterimi. ....	64
5.4. Yarıçapı 3,0 mm, yüksekliği 0,2 mm'lik 4 eşit parçanın, fotonlar için Bağlı TLD Cevapları (Silindir_1, Silindir_2, Silindir_3, Silindir_4 ön yüzden arka yüze doğru her bir silindir dilimin isimleridir). ....	70
5.5. LiF TL dozimetresi için silindirik ve dikdörtgenler prizması geometrilerinin Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	71
5.6. Jung et al. (2003) LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.....	75

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7. Eakins et al. (2008) LiF:Mg,Cu,P TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması. ....	76
5.8. LiF TL dozimetresi için bu çalışmada bulunan, fotonların Bağıl TLD Cevabı. ....	77
5.9. LiF:Mg,Ti TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	78
5.10. LiF:Mg,Cu,P TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	79
5.11. LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	80
5.12. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Ti TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	82
5.13. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Cu,P TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	83
5.14. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	84
5.15. LiF:Mg,Ti TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	85

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.16. LiF:Mg,Cu,P TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	86
5.17. LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	86
5.18. Daros et al. (2001) CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması....	88
5.19. Bu çalışmada incelenen CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevabı. ....	89
5.20. CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	90
5.21. Karışım oranları farklı CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	92
5.22. CaSO <sub>4</sub> :Dy TL dozimetrede 0.060, 0.080, 0.100 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	93
5.23. Becker et al. (2008) CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetre için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.94	
5.24. CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetresi için bu çalışmada bulunan, fotonların Bağlı TLD Cevabı. ....	95
5.25. CaF <sub>2</sub> :Tm TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	96

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.26. Karışım oranları farklı $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	97
5.27. $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ TL dozimetrelerde 0.075, 0.090, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	98
5.28. Furetta et al. (2001) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması. ....	99
5.29. Bu çalışmada $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı.....	100
5.30. Furetta et al. (2001) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$ TL dozimetresi için belirlediği, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması .....	101
5.31. Bu çalışmada $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$ TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı.....	102
5.32. Prokic'in (2002) $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ TL dozimetresi için belirlediği, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması. ....	103
5.33. Bu çalışmada $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı. ....	104
5.34. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	105

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.35. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	106
5.36. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$ TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	107
5.37. Karışım oranları farklı $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	108
5.38. Karışım oranları farklı $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	109
5.39. Karışım oranları farklı $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$ TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	110
5.40. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ TL dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	111
5.41. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ TL dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.....	111
5.42. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$ dozimetrede 0.080, 0.095 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması. ....	112

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bazı termolüminesans malzemelerin temel karakteristikleri.....	5
3.1. MCNP’de kullanılan veri çeteleleri.....	23
3.2. R ve n arasındaki ilişki.....	25
3.3. Bağlı hatanın yorumu.....	26
4.1. Monte Carlo Hesaplamalarında Kullanılan Malzemeler, Element Bileşimleri ve Yoğunlukları.....	56
5.1. Simülasyon hesaplamalarında kullanılan nesil sayısı ve program çalışma süresi arasındaki ilişki.....	59
5.2. Nesil sayısı ve program çalışma süresi arasındaki ilişki.....	60
5.3. Nesil sayısı ve dozimetreye ulaşan ve ilk yüzeyi geçen parçacık sayısı arasındaki ilişki.....	61
5.4. TL dozimetreler ve kaynak arasındaki uzaklıklar.....	65
5.5. TLD malzemeleri ve karışımlarındaki aktivatör oranları.....	66
5.6. TLD malzeme boyutları ve silindir kalınlıkları.....	72



**SİMGELER VE KISALTMALAR**

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\lambda$	Dalga Boyu (m)
$\nu$	Frekans (Hz)
E	Enerji (MeV)
c	Işık Hızı ( $3 \times 10^8$ m/s)
I	Işık Şiddeti
h	Planck Sabiti ( $6.62 \times 10^{-34}$ J.s)
T	Kinetik Enerji
$\mu$	Doğrusal(lineer) Zayıflama Katsayısı
e	Elektron Yüğü ( $1.6 \times 10^{-19}$ C)
$E_T$	Etkin doz
$H_T$	Eşdeğer doz
$\Phi$	Akı
$\rho$	Yoğunluk
$\alpha$	Alfa Parçacığı
$\beta$	Beta Parçacığı
$\gamma$	Gama Işını

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)**

$\tau$  Fotoelektrik Katsayısı

$\sigma$  Compton Katsayısı

$\kappa$  Çift Oluşum Katsayısı

Kısaltmalar    Açıklama \_\_\_\_\_

MCNP        (Monte Carlo N – Particle) Kod sistemi

TL            Termolüminesans

TLD          Termolüminesans Dozimetre

r             Yarıçap (cm)

h             Yükseklik (cm)

R             Bağıl hata

FN            (Dosya Adı)

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmada dozimetre olarak kullanılan bazı Termoluminesans (TL) malzemelerin dedektör cevap fonksiyonlarının enerji bağımlılığı, Monte-Carlo yöntemi ile incelenmiştir.

Bilgisayar modelleme kodları deneysel olarak ölçülmemiş niceliklerin yapısını kavramaya olanak sağlamaktadır. Gerçek sistemden toplanan bilgilerle, bilgisayarda geliştirilen modellere uygulanarak, sayısal bir takım sonuçlara ulaşmak hedeflenir.

Birçok TL malzeme, “personel doz eşdeğerini” ölçmek için kullanılmaktadır. TL malzemelerin radyasyon alanı içerisinde almış olduğu doz miktarının belirlenmesi önemlidir. Çünkü çoğu zaman, alınan dozu belirlemek amacıyla taşınabilir dozimetrelere kullanılmaktadır. Bu durumda dedektör cevabının enerjiye bağımlılığının bilinmesi gerekmektedir. Fakat TL malzemeleri için dedektör cevap fonksiyonlarının enerjiye bağımlılığını veren verileri elde etmek, deneysel yöntemler kullanıldığında oldukça güçtür ve büyük hata değerleriyle birlikte ölçülebilmektedir. Buna karşın bu dedektörler, bilgisayar ortamında modellendiğinde, farklı enerjilerdeki fotonlar için dedektör cevap fonksiyonları hakkında oldukça ayrıntılı bilgi almak mümkün olmaktadır. Bunun nedeni, bilgisayarda yapılan simülasyon sırasında dedektörün ideal bir dedektör olarak çalışmasıdır.

Bu çalışmada TL malzemesi olarak kullanılan LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> ve Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> bileşikleri için fotonların dedektör cevap fonksiyonlarının enerjiye bağımlılığını veren veriler, simülasyon yöntemi ile bulunmuştur. Bunun için noktasal ve yönlü kaynaklardan, farklı uzaklıklardaki TL malzemeleri ışınlanmıştır.

Çalışmada simülasyon metodu ile TL dozimetrelere ait özelliklerden geometrik biçim ve dedektörü oluşturan elementlerin miktarları incelenmiş, bu dedektörlerin geometrilerinde meydana gelebilecek değişimlerin cevap fonksiyonları üzerindeki etkileri incelenmiş ve bazı öneriler getirilmiştir.

## 1.1 Genel Bilgiler

Radyasyonun varlığının anlaşılması duyu organları ile mümkün olmadığından, algılanması ve ölçümleri radyasyona hassas cihazlar ile yapılır. Radyasyonun ölçülmesinin temeli, radyasyon ile maddenin etkileşmesi esasına dayanır. Radyoaktif atomların çekirdeği kararsız olduklarından radyoaktivite özelliği gösterirler. Bu durumda kararsız çekirdekler bozunmaya uğrarlar. Çekirdeklerin bozunması sonucunda yeni bir çekirdek ve parçalanma ürünleri meydana gelir. Atom çekirdeklerindeki bu değişiklikler sonucunda radyasyon yayınlanır.

### 1.1.1 Termolüminesans dozimetreler (TLD)

Canlı bir organizmanın ya da bir malzemenin maruz kaldığı radyasyon dozunu belirlemeye yarayan ölçü aletlerine "Dozimetre" adı verilir (Toz, katı vb.).

Termolüminesans dozimetrelerin kullanım aşamaları gelişme evresindedir. LiF en fazla kullanılan malzemelerden biridir. miliröntgen mertebesinden  $10^4$  röntgene kadar radyasyon dozlarının ölçülmesinde elverişlidir (Tsoulfanidis, 1983).

TL dozimetreleri ile doz ölçümleri için özel bir okuyucu cihaza ihtiyaç vardır. Bir TLD pratikte yüzlerce defa kullanılabilir. Bugün TLD'ler özellikle kişilerin radyasyon kazalarında maruz kaldıkları yüksek dozları ölçmede elverişlidirler. Taşınması kolay, hafif ve ucuz olan TLD'lerin en önemli sakıncası pahalı ve karmaşık bir okuyucu cihaza gereksinim duymasıdır (Tsoulfanidis, 1983).

Dozimetreler TL kartı ve koruyucu olmak üzere iki parçadan oluşur. Örneğin LiF:Mg,Cu,P TL çipleri ticari olarak 3.6 mm çap ve 0.4 mm kalınlıkta preslenerek pellet halinde hazırlanır. Benzer şekilde LiF:Mg,Ti malzemesi, farklı termal nötronlara duyarlı olacak şekilde  $^6\text{Li}$ 'un konsantrasyonuna göre, tesir kesitleri de dikkate alınarak hazırlanır. Bu preslenmiş pellet şeklindeki TLD'ler şu isimleri alır: TLD-100H (% 7.5), TLD-600H (% 95.6) ve TLD-700H (% 0.07) (Moscovitch et al., 2006).

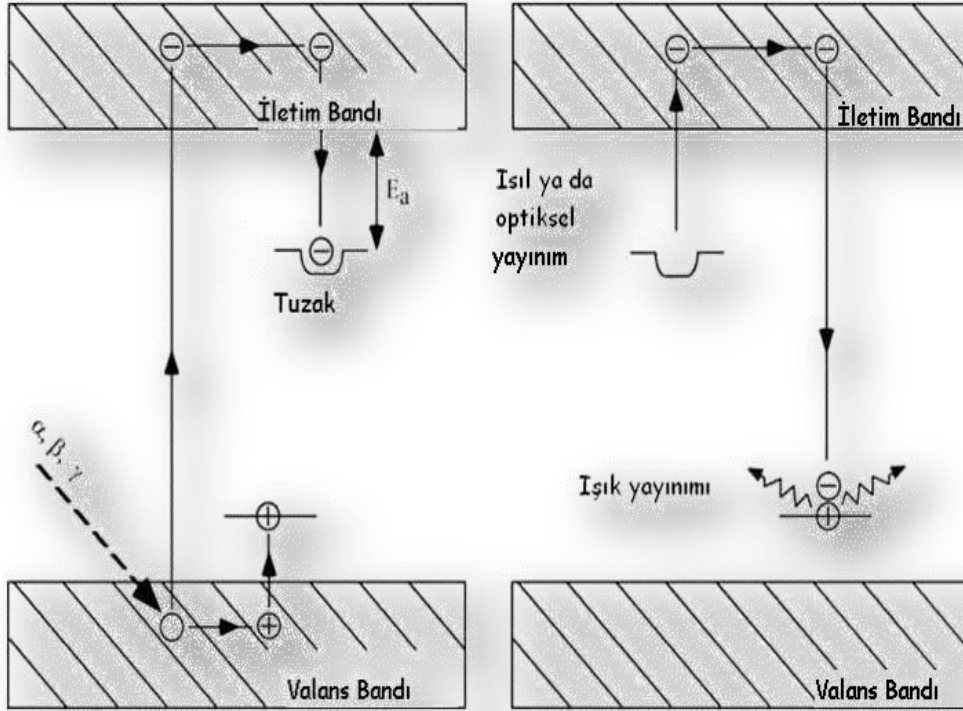
Freire et al. (2008) yapmış oldukları deneysel çalışmada X-ışını ve gama radyasyonu kullanılmıştır. LiF:Mg,Ti (TLD-100) ve LiF:Mg,Cu,P (TLD-100H) TL dozimetrelerin bazı özellikleri araştırılmıştır. Deneylein ve değerdendirmelerin bir yıldan uzun sürdüğü belirtilerek, bu uzun zaman sürecinde okuma ölçümlleme faktörlerinin çok fazla değerdendirilmesi gerektiği bildirilmiştir. Bu tez çalışması ile simülasyon yöntemi kullanılarak zamandan da kazanç sağlanması hedeflenmiştir.

Personel ve çevre dozimetresinde kullanılmak üzere TL malzemeler üzerinde birçok önemli çalışma yapılmaktadır. Hastaya özel tedavi planlaması sırasında, kaynağın vücut içerisinde belirlenen dokularda ne kadar doz bırakacağı, ilgilenilen kaynağın daha önce bir fantom içerisinde TL dozimetreler kullanılarak belirlenmiş dozimetrik parametrelerinden yararlanılarak belirlenebilir. Brakiterapi kaynaklarının dozimetrisinde yüksek uzaysal çözünürlük sağlayan küçük boyutlarının avantajlarından dolayı TLD'ler sıklıkla kullanılmaktadır (Camgöz, 2008).

### **1.1.2 Termolüminesans olayı ve bant modeli**

TLD termolüminesans özelliği üzerine kurulur. Bir kristal iyonize radyasyon ile ışınlanırsa enerji elektronlara aktarılır. Bu ise birkaç sonuca neden olabilir. Örneğin  $e^-$  valans bandından iletkenlik bandına geçebilecek yeterli enerji kazanabilir ise durum “iyonizasyon” olarak bilinir. Bir başka durumda  $e^-$  valans bandına geçebilecek enerji kazanabilir ki, bu durum, bir “uyarılma”dır. Bir uyarılma, elektrostatik olarak sınırlandırılmış bir  $e^-$  ve “deşik”ten oluşur ki, katı içinde yer değiştirebilmesi söz konusudur. Radyasyon ile oluşturulan  $e^-$  vedeşik ve uyarılmalar katılarda birçok tuzağa yakalanabilirler. TLD doz ölçüm mekanizması Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Tuzaklanan taşıyıcılar eğer kristalin sıcaklığı sabit kalır veya azalırsa bu tuzaklarda uzun süre kalırlar. Eğer sıcaklık yükselir ise taşıyıcıların kaçış olasılığı artar.  $e^-$  vedeşikler serbest kalırlar ve yeniden birleşirlerken ışık emisyonu yaparlar. Bu ışık emisyonu “termolüminesans” olarak adlandırılır. Bu durumda termolüminesansı “önceden radyasyona maruz bırakılan bazı maddelerin, ısıtıldıkları zaman ışık yayınlaması özelliğidir” şeklinde tanımlamak mümkündür. Yayınlanan ışık miktarı kullanılan maddenin cinsine ve iyonlaştırıcı radyasyondan soğrulan enerji miktarına bağlıdır (Tsoufanidis, 1983).



Şekil 1.1. TLD'lerin radyasyon doz ölçüm mekanizması.

Bir TLD temelde bir parça termolüminesans malzemedir ve genellikle kristallerden oluşur. Bu kristallere aktivatör olarak küçük miktarda safsızlık eklenmektedir ( örneğin  $\text{CaSO}_4$  de Mn aktivatördür).

Dozimetre için kullanışlı termolüminesans malzemelerin karakteristikleri şunlardır:

- Maruz kalma sırasında uzun bir süre boyunca tuzaklama taşıyıcılarını tutması.
- Büyük miktarda ışık çıkışı.
- Geniş doz aralığı boyunca lineer yanıt.
- Tekrar tekrar yeniden kullanılabilmeleri.

TLD malzemeleri arasında seçim yapılırken malzemelerdeki tuzak derinliği ve malzemenin atom numarası göz önüne alınmalıdır. Eğer tuzakların

enerji düzeyleri bant aralığı sınırına çok yakında ise ( $\text{CaSO}_4$  da olduğu gibi) birim maruz kalma başına tuzaklama taşıyıcı sayısı çok büyük olabilir. Bundan dolayı bu malzeme  $2 \cdot 10^{-5}$  Rada kadar düşük seviyede dozlara duyarlı yapılabilir. Fakat sıgı yerdeki tuzaklar oda sıcaklığında bile kararlı değildirler. Bu yüzden malzeme birkaç günlük süre içinde tuzaklama taşıyıcılarının %85'ini kaybedebilir. Ve oda sıcaklığında oldukça yavaş geçicilik özelliği vardır. O nedenle derin tuzakları olan  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  ve  $\text{LiF}$  gibi malzemeler uzun süreli maruz kalmalar için daha uygundur.

Çizelge 1.1. Bazı termoluminesans malzemelerin temel karakteristikleri.

MALZEME	RADYASYON TİPİ	ARALIK (Enerji)
$\text{CaSO}_4:\text{Mn}$	$\gamma$	$1.0\mu\text{R} - 10^3\text{R}$
$\text{CaF}_2$ (doğal)	$\gamma$	$1.0\mu\text{R} - 10^3\text{R}$
$\text{CaF}_2:\text{Mn}$	$\gamma, n$ (termal, düşük cevap)	$1.0\mu\text{R} - 10^5\text{R}$
$\text{LiF}$ (TLD 100) [Doğal lityum; %92,6 $^7\text{Li}$ , %7,4 $^6\text{Li}$ ]	$\gamma, n$ (termal)	$1.0\mu\text{R} - 10^4\text{R}$
$\text{LiF}$ (TLD 600)	$\gamma, n$ (termal)	$1.0\mu\text{R} - 10^5\text{R}$
$\text{LiF}$ (TLD 700)	$\gamma$	$1.0\mu\text{R} - 10^5\text{R}$

$\text{CaSO}_4:\text{Mn}$  ve  $\text{CaF}_2$  (doğal) sadece gamalar için kullanılır. % 95,62 oranında  $^6\text{Li}$ 'ca zenginleştirilmiş TLD 600 termal nötron ve gamalar için oldukça hassastır. % 99,993 oranında  $^7\text{Li}$  içeren TLD 700 sadece gamalara duyarlıdır. Çünkü  $^7\text{Li}$  için nötron tesir kesiti çok küçüktür (0,033 barn).

Tüm TLD malzemeleri içinde  $\text{LiF}$  en yaygın olarak kullanılanıdır. Çünkü oda sıcaklığında geçiciliği çok azdır.  $\text{LiF}$  içinde depo edilen enerji geniş bir gama enerji uzaklığı boyunca gama ışını dozu veya doz eşdeğeri ile yakından ilişkilidir. Yüksek atom numaralı TLD malzemeleri için fotoelektrik etkileşim olasılığı arttırılırsa, düşük enerjili X veya gama ışınlarının cevabını arttırır (Tsoulfanidis, 1983).

### 1.1.3 Simülasyon yöntemi

Simülasyon modelleri yardımıyla karmaşık problemlerin modellenmesi ve bu problemlerin çözümü oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Çünkü değişkenler arasındaki etkileşimi simülasyon modellerinde gözlemlemek kolaylık sağlamaktadır (Şarer, 2003).

Genel anlamda simülasyon, gerçeğin temsil edilmesi olarak tanımlanabilir ve amacı, gerçek yaşam olgusunu girdi ve çıktılarıyla matematiksel olarak ifade etmek, model üzerinden tanıyıp araştırmak, değişik kararları ve seçenekleri gerçek sistemde hiçbir değişiklik yapmadan deneyebilmektir. Yani gerçek sistemden elde edilen veri ve bilgiler, bilgisayarda geliştirilen modellere uygulanır, bunun sonucunda sayısal bir takım sonuçlara ulaşılır. Bu sonuçların değerlendirilerek hedeflenen sonuçlara ulaşılması, anlamlı olarak sistemdeki ölçütlerinin birtakım tahminleri olarak ifade edilebilir. Her hangi bir problem için en kötü durum senaryoları simülasyon modelleri aracılığı ile araştırılabilir.

Sanayiye bağlı sorunların doğasındaki karmaşıklık ve sürekli yeni yöntemlerin kullanılması, günümüzde birçok analitik çözümü olanaksız hale getirmektedir. Sürekli gelişen ve değişen teknolojiyle birlikte sorunların yapısı karmaşık bir durum almaktadır. Analitik yaklaşımların aksine simülasyon modelleri, karmaşık problemlerin modellenmesi ve çözümünde iyi sonuçlar vermektedir. Yalnız bu kolaylığın yanında yoğun bilgisayar kullanımını gerekmektedir. Teknik ile analitik işlemler, çok karışık deneysel işlemler, çok pahalı olan nükleer savunma problemlerinin çözümlenmesi başarıyla yapılmıştır.

Simülasyon modeli, sadece matematik denklemlerine değil, denemelere dayanır ve alternatif çözümler ortaya konulduktan sonra en uygun sonuca en yakın çözüm seçilir.

Simülasyon tekniklerinin en büyük dezavantajı, şans oyunları ve model örneklemesinde var olan düzgün bir terminolojiden yoksun olmasına karşın, uygulanabilir oldukları durumlarda araştırmacı istediğini elde edebilmektedir.

Herhangi bir amaç için geliştirilen ve çalıştırılan bir simülasyon modeli kontrol edilebilir koşullar altında sistemin dinamik davranışlarının kontrol altına

alınmasına olanak sağlar. Yani, ilgili problemlerin analizinde bir laboratuvar hizmetini görür (Hançerlioğulları, 2006).

#### **1.1.4 Monte Carlo tekniği**

Monte Carlo tekniği Los Alamos laboratuvarlarında nükleer silah geliştirilmesi projesinde çalışan bilim adamları tarafından ilk kez ortaya atılmış, 1930'lardan sonra hızla gelişmeye başlamıştır. Yöntem olasılık teorisine dayanır. Yöntemin bir probleme uygulanması, rastgele sayıları kullanılarak simüle edildikten sonra, hesap edilmek istenen parametrenin bu simülasyonlarının sonuçlarına bakılarak yaklaşık hesaplanması fikrine dayanır. Analitik yollarla çözülemeyen problemleri basitleştirerek, Monte Carlo metotları ile çözmek daha doğru olmaktadır.

Monte Carlo ile istatistiksel teknikler kullanılarak fiziksel bir olayın sayısal modeller yardımıyla temsil edilmesi amaçlanmaktadır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle hem iyi seçilmiş rastgele sayı dizilerinin elde edilebilmesi hem de simülasyon zamanının önemli ölçüde kısaltılması sağlanmıştır. Yöntem kimyada, gaz kinetiğinde, fizikte foton ve parçacıkların difüzyonunda, sağlık fiziğinde radyasyon dozimetresi ve radyasyondan korunma çalışmalarının analizinde kullanılabilir.

Monte Carlo tekniği, bir simülasyon çalışmasında bir ya da daha çok olasılık dağılımından rastgele sayılar seçmeye dayanan olasılık teorisi üzerine kurulu, deneysel ve istatistiksel problemlerinin çözümüne yönelik bir sistemdir. Fiziksel sistemi tanımlayan olasılık yoğunluk fonksiyonlarından rastgele seçilmiş sayılarla hesaplamalar gerçekleştirilir. Metotta istatistiksel ve matematiksel tekniklerle çözülmesi gereken bir fiziksel olay, rastgele sayıları defalarca kullanılarak simüle edilip çözümü bulmak hedeflenir. Fizik problemlerinin çözümünde MCNP kodunu kullanarak nükleer taşıma hesaplamalarında metot iyi sonuçlar vermektedir.

Monte Carlo istatistik verilerini uygulayan bir yöntemdir. Bu yöntemin prensibi, bir sistemi veya bir olayı oluşturan çok sayıdaki öğenin sonuçları önceden öngörülemeyen davranışları yahut etkileşimleri, olasılık hesapları ve rastgele sayı üretilmesi ile ortaya konmasıdır. Farklı elemanlara sahip kümelerden, eleman sayısı ölçeklendirilerek farklı sayılarda örnek seçilip incelenir. Farklı sayıda elemanlı kümelerin her birinden aynı sayıda eleman

seçilmez. Salt olarak üretilen rast gele sayı  $[0,1]$  aralığındadır (Hançerlioğulları, 2006).

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Horowitz (1981), termoluminesans ve dozimetrideki uygulamalarının teorik ve mikrodozimetrik temelleri anlattığı makalesinde TL malzemelerinin genel karakteristik özelliklerini, TL malzemelerini, TL doz cevabını, TL modellerini ve iyonize radyasyon dozimetrisi hakkında ayrıntılı açıklamalarda bulunmuştur.

Boyutları  $3,0 \times 3,0 \times 0,9 \text{ mm}^3$  ve  $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ mm}^3$  olan LiF TL dozimetreler ile yapılan çalışmada, Monte Carlo yöntemiyle foton enerjisi ve dedektör geometrisinin bir fonksiyonu olarak mutlak dedektör cevabı ( $\alpha_x$ ) deneysel ve simülasyon ile bulunmuştur (Das et al., 1996). Çalışmada 19.0, 29.1 ve 50.8 keV enerjili fotonların dedektör cevabı, yaklaşık olarak  $1 \times 10^6$  foton nesli simüle edilerek bulunmuştur. Büyük ve küçük olarak adlandırılan dozimetrelerin dedektör cevapları karşılaştırılmış ve küçük olanın daha duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Olko et al. (2002) 20.0, 30.0, 50.0, 63.0, 80.0, 100.0, 120.0, 170.0, 200.0 ve 250.0 keV enerjilerde, LiF:Mg,Ti ve LiF:Mg,Cu,P TL dozimetrelerinin fotonlar için Bağlı TLD Cevabını deneysel olarak ölçmüşlerdir. LiF:Mg,Cu,P dedektör duyarlılığının LiF:Mg,Ti dozimetresinden daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Jung et al. (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmada, tasarlanan ve katılaştırılmış tablet biçiminde hazırlanan LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetresi kullanılmıştır. Bu dozimetre disk biçiminde yarıçapı 2,25 mm, kalınlığı 0,8 mm'dir. Denemelerde kaynak ve TL dedektör arasındaki mesafe 200.0 cm alınmış ve ışınlama normal hava şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ortalama foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak, enerji cevabı 662.0 keV foton enerjisine normalize edilerek, 19.4, 35.2, 51.2, 73.0 ve 118.3 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabı bulunmuştur. LiF:Mg,Cu,Na,Si için bulunan Bağlı TLD Cevabı yapılan başka çalışmalardaki LiF:Mg,Ti ve LiF:Mg,Cu,P ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Hranitzky et al. (2006) farklı enerjilerdeki fotonların, LiF:Mg,Ti ve LiF:Mg,Cu,P TL dedektörleri için MCNP kodu kullanarak, hem simülasyon hem de deneysel olarak Bağlı TLD Cevabını bulmuşlardır. Dedektörler ile

kaynak arasındaki uzaklık 2.5 m alınmış, enerji cevabı 662.0 keV foton enerjisine normalize edilerek bulunmuştur. LiF:Mg,Ti ve LiF:Mg,Cu,P arasında yapılan karşılaştırmada, her iki dedektör için grafikler benzer eğri çizgisine sahiptir. Çalışma her iki dozimetre için, deneysel ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermiştir.

Eakins et al. (2007) TLD-700H ( $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ ) üzerine, sadece fotonları dikkate aldıkları TLD tasarımı için, hem deneysel hem de simülasyonu içeren bir çalışma yapmışlardır. Simulasyonda MCNP-4C2 kodu kullanılmıştır. 16.0 – 6174.0 keV enerjilerde elde edilen sonuçları 662.0 keV'e normalize etmişlerdir. Deneysel olarak ölçtükleri veriler ile MCNP kodu ile hesapladıkları sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmada farklı enerjilerdeki fotonların Bağlı TLD Cevaplarının deneysel ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Eakins et al. (2008) MCNP-4C2 Monte Carlo kodu kullanarak personel TL dozimetre tasarımı üzerine çalışmışlardır. Çalışmada hem deney hem de simülasyon yapılmıştır. Hesaplamalarda  $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$  malzemesinde 16.3, 20.2, 24.5, 33.0, 48.0, 65.0, 83.0, 100.0, 118.0, 161.0, 205.0, 248.0, 662.0 ve 1253.0 keV enerjiye sahip fotonların taşınımı gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak ölçtükleri veriler ile MCNP kodu ile hesapladıkları sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada da, Bağlı TLD Cevaplarının deneysel ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Daros et al. (2001)  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  TL dozimetreleri üzerine yapmış oldukları deneysel çalışmada 0,4 mm 0,6 mm ve 0,8 mm kalınlıklarında disk biçiminde oluşturulan tabletler, 14.3, 21.2, 31.2, 37.3, 64.4, 74.5 ve 92.3 keV enerjili fotonlarla ışınlanmış ve fotonlar için Bağlı TLD Cevabını bulmuşlardır. Çalışmada fotonlar için sınırlı enerjilerde deneme yapılabildiği vurgulanmıştır. Dozimetre için disk kalınlığının 0,6 mm'den fazla olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Becker et al. (2008) boyutları 3,2 mm, 3,2 mm ve 0.9 mm olan dikdörtgenler prizması biçimindeki  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  (TLD-300) dozimetrede 16.0, 25.0, 34.0, 47.0, 65.0, 85.0, 100.0, 140.0, 180.0, 250.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabını deneysel olarak bulmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada, MCNP kodu kullanarak simülasyon ile

deneysel sonuçların karşılaştırmasını yapmışlar, deney ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Prokic'in (2002) deneysel bir çalışma için hazırlamış olduğu dozimetre disk biçiminde oluşturulmuş yarıçapı 2,25 mm, kalınlığı 0,95 mm olan bir tablettir. Deneysel çalışmasında fotonlar için  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  dozimetresinin Bağlı TLD Cevabını bulmuştur. Bulmuş olduğu bu sonucu önceden yapılmış başka bir çalışmadaki  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  ile karşılaştırmış ve  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  dozimetresinin  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  dozimetresinden daha duyarlı olduğu sonucuna varmıştır.



### 3. MCNP RADYASYON TAŞIMA PROGRAMI

#### 3.1 MCNP Kodu

MCNP (Monte Carlo N – Parçacık Taşınım) Monte Carlo yöntemini kullanarak radyasyon etkileşimlerini simüle edebilen bilgisayar yazılımından biridir. Los Alamos Ulusal Laboratuvarında Transports Methods Groups (XTM) tarafından geliştirilmiş Fortran ve C kaynak kodundan oluşan bir programdır (Briesmeister, 2000).

Çözülmesi istenen bir problemin var olan geometrik özelliklerinin, malzemeyi açıklayan bilgilerin, kaynağın özelliklerinin ve MCNP'den istenilen sonuçların türü ile ilgili bilgilerin bir veri giriş dosyası yardımıyla MCNP programına tanıtılması lazımdır. Bu giriş dosyası hücre kartı, yüzey kartı ve veri kartı olmak üzere üç temel bölümden meydana gelir. Temel bölümler bir satırlık boşlukla birbirlerinden ayrılır (Şekil 3.1).

Kullanıcı tarafından yazılan kullanıcı kodunun kısımları şöylece gösterilebilir:

**Hücre Kartları:** Bir problemin çözümünde dikkate alınan bölge tek tek hücre kartları ile tanımlanmalıdır.

**Yüzey Kartları:** Çeşitli düzlemsel yüzeyler kullanarak, bu yüzeylerin kesişmesiyle sonsuz uzayın birden fazla bölgelere ayrılması işlemidir. Örneğin bir küp 6 adet farklı düzlemin kesişmesi sonucunda meydana gelen uzay bölgesidir.

**Problem Tipi:** İlgilenilen problem tipleri foton, elektron ve nötron olmaktadır. Bu çalışmada foton ve elektron problem tipi olarak ele alınmıştır.

**Malzeme Kartları:** Tanımlanan bir geometride yer alan her bir bölgeye farklı tipte malzeme değerleri atanarak radyasyonun farklı ortamlardaki davranışı incelenmektedir.

**Kaynak:** Radyasyonun yayınlandığı taneciklerin kaynağı tanımlanmaktadır. Kaynak noktasal veya yönlendirilmiş olarak dikkate alınabilir.

İlk önce, belirli noktaların koordinatlarının belirtilmesi yoluyla yüzeylerin tanımlanması kolaylık sağlar. Sonra, belirlenen yüzeylere uygulanan kesişim, birleşim ve tümleyen operatörleri yardımıyla MCNP programındaki en önemli geometrik yapı olan hücreler elde edilir. Bunun ardından dikkate alınan hücrenin hangi malzemeden oluştuğu ve yoğunluğu da belirtilerek hücre kartı tanımlanmış olur.

```

c Fotonların LiF
c kaynağındaki tallyleri (Sonuçların Toplanma Merkezi)
1 1 -2.635 1 -2 3 -4 5 -6 imp:p=1 $ dikdortgenler prizmasi
10 2 -1.205e-3 -10 #1 imp:p=1 $ kure
99 0 10 imp:p=0 $ dis dunya

c dikdortgenler prizmasi için düzlemler
1 pz -0.5
2 pz 0.5
3 py -0.05
4 py 0.05
5 px -0.5
6 px 0.5
10 so 251.0 $ kure yüzeyi (1m çaplı kure)

mode p $ problem turu foton
sdef par 2 $ parçacık turu foton
pos 0.0 -20.0 0.0 $ tanecik kaynağının konumu
erg 0.019 $ kaynak taneciklerin enerjileri

c LiF
c malzeme bileşimleri
m1 3000 -0.267585 $ lityum
9000 -0.732415 $ florur

c hava
m2 6000 -0.000124 $ carbon
7000 -0.755268 $ azot
8000 -0.231781 $ oksijen
9000 -0.012827 $ argon

c Nesil (history sayısı)
nps 1e9 $ sayılacak tanecik sayısı
c tally kartları
f1:p 3 $ 3.yüzeyi geçen aki
f6:p 1 $ energy deposition, Mev/g
e0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1
Print

```

Şekil 3.1. Simülasyonda kullanılan MCNP genel veri giriş dosyası.

Yüksüz radyasyon türlerinden olan her bir fotonun hedef çekirdekleri ile etkileşime olasılığının bir ölçüsü olan niceliğe tesir kesiti denir. Tesir kesitlerinin birimi barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ) cinsindedir (Krane, 2001).

Hedef çekirdeğe ve gelen radyasyonun enerjisine bağlı olan tesir kesitinin doğru şekilde modellenerek bilgisayar ortamında oluşturulmuş veri

tabanlarının kullanılması gerekir. MCNP sürekli enerjiye sahip atomik ve nükleer veri kütüphanelerini kullanır. Matematiksel hesaplamalara ve fiziksel ölçümlere dayanan bu nükleer verilerin birincil kaynakları Livemore'dan ve Los Alamos'taki Applied Nuclear Science (T-2) Group tarafından derlenen bilgilerin Evaluated Nuclear Data File (ENDF) sistemi, Evaluated Nuclear Data Library (ENDL) ve Activation Library (ACTL)'nin değerlendirmeleri sonucunda elde edilir. Nükleer veri tabloları nötron etkileşimlerini, nötron-indüklenmiş foton, foton etkileşimleri, nötron dozimetrisini ve termal parçacık saçılımını ( $\alpha, \beta$ ) içerir. Programı çalıştıran kişi, istediği belirli bir veri tablosunu Z atom numarası, A kütle numarası ve ID bağlı olduğu kütüphaneyi belirten terim olmak üzere ZAIDs yardımıyla çağırabilir. Malzeme özelliklerinin, kaynak bilgilerinin, kullanılacak veri kütüphanesinin ve hesaplanması istenilen niceliklerin programa tanıtıldığı bölüm veri kartıdır (Briesmeister, 2000).

MCNP kodu Monte Carlo simülasyonu ve bir takım modellerle beraber, nükleer özellikleri olan fizik ve matematik konularını içermektedir. Nükleer enerji ve atomik bilgi hazinesini kullanarak nötron, foton ve elektronların zamana bağlı sürekli enerji geçişini (transport) üç boyutlu geometride çözüme yeteneğine sahiptir. Kod sürekli kesit verisini kullandığından dolayı karmaşık parçacık geçişini modellemede oldukça iyi uygulanır.

MCNP'nin gelişimi artarak devam etmektedir. Yeni özellikler, bilgisayar sistemindeki gelişmeler, Monte Carlo metodundaki gelişmeler ve daha iyi fizik modellerini yansıtmak için MCNP'ye eklemeler yapılmaktadır. MCNP genelleştirilmiş geometrisi, sürekli enerjisi, ikili nötron, foton ve elektron çiftlerinin taşınımında kullanılan, geçmiş zamanlarda kullanıldığı gibi gelecekte de kullanılması olası bir koddur.

Temelde kod iki ana kısımdan oluşur: MCNP paketi ile birlikte dağıtımı yapılan standart kaynak kod ve kullanıcı tarafından yazılan kullanıcı kodudur. Kaynak kod radyasyon-madde etkileşmelerinin fiziksel kurallarını içermektedir.

İlk kısımda simülasyonda kullanılan tüm fizik formülleri, istatistiksel yöntemler bulunmaktadır. Bu alanda değişiklik yapılmamaktadır, çünkü standart kullanıcılar bir değişikliğe ya da tasarıma ihtiyaç duymazlar. Bu kısmı genelde program geliştiriciler kullanırlar.

İkinci kısım kullanıcılara yönelik bir alandır ve simülasyonun konusuna uygun olarak tasarım amaçlı değişiklikler yapılabilmektedir. Kullanıcı kodu tamamen yapılacak işe bağlı olarak büyük ölçüde yeniden tasarlanır. Kodun kullanıcının kontrolünde olan kısmında her bir foton ya da elektron için başlangıç parametreleri dikkatli bir şekilde belirlenir. Programın çalışmaya başlamasından itibaren oluşan her bir etkileşmeden sonra etkileşme ile ilgili verilerin ilgili alt programcılara (arabirim rutinleri) gönderilmesi gerçekleştirilir. Ayrıca ortam geometrisinin modellenmesi, her bir geometrik bölgenin malzemenin o bölgeye atanması, farklı bölgelerde parçacık davranışı ile ilgili verilerin seçimi, parçacığın bölgeler arasında geçişinin kontrolü, bir parçacığın toplam etkileşimleri sonunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve istatistiksel analizlerin yapılması bulunmaktadır.

MCNP programı, her hangi bir problem için, kullanılacak olan verileri bir giriş dosyası yardımıyla programcıdan alır. Bu giriş dosyasının yapısı çok gelişmiş bir veri işleme özelliğine sahip olup, birçok farklı veri tipini, burada hassas bir şekilde tanımlayabilmek mümkün olmaktadır (Şekil 3.1). Örneğin, radyoaktif kaynakla ilgili olarak radyasyonun türü ( $p^+$ ,  $e^-$ ,  $n^0$  gibi) ve uzaysal dağılımı, ortamın geometrisi ve malzeme kompozisyonu vb. bütün bilgiler bu giriş dosyasında ayrıntılı bir şekilde tanımlanabilir. Buna karşın girilen veriler eğer MCNP programında belirtilen formata uygun olarak tanımlanmayacak olursa reddedileceklerdir. Bu durum, MCNP programı için giriş dosyasının çok dikkatli bir şekilde tasarlanmasının gerektirir.

MCNP'nin genel yapısı şöyledir:

Başlatma (IMCN)

- Boyutları (PASS1) almak için giriş dosyasını (INP) oku;
- Değişken boyutları veya dinamik olarak ayrılan depolamayı ayarla (SETDAS);
- Girişi yüklemek (REPROB) için giriş dosyasını (INP) tekrar oku;
- Kaynağı işle (ISOUCR);
- Veri çeteleleri işle (ITALLY);

- Veri dosyalarını yüklemeyen kütleleri içeren malzemelerin özelliklerini (STUFF) işle;
- Yüzey alanlarını ve hücrelerin hacimlerini (VOLUME) hesapla.

Etkileşimli geometri çizimi (PLOT).

Tesir kesiti işlemi (XACT):

- Kütüphaneleri yükle (GETXST);
- Problem enerji aralığı dışındaki fazla nötron verilerini ortadan kaldır;
- Eğer problem sıcaklığı kütüphane sıcaklığından daha yüksekse, uygun sıcaklık için elastik ve toplam tesir kesitini Doppler genişlemesi yap (BROADN)
- Çoklu grup kütüphanelerini işle (MGXSPT)
- Hesaplama aralığını içeren elektron kütüphanelerini, dağılık tabloları, saçılma açısı dağılımlarını ve bremsstrahlung işle (XSGEN).

MCRUN çoklu görevleri, çoklu işlemleri ayarlar, nesilleri (HISTORY) çalıştırır ve çıktı almak için OUTPUT'a geri döner, yığıntıları RUNTPE ile yazar veya diğer kritik döngüleri (KCODE) işler.

MCRUN altında, MCNP nötron, foton veya elektron nesillerini (HISTORY), elektron izleri için ELECTR çağırarak, çalıştırır:

- Bir kaynak parçacığı başlat (STARTP);
- Sonraki sınır için mesafeyi bul (TRACK), yüzeyi geç (SURFAC) ve sonraki hücreye gir (NEWCEL);
- Toplam nötron tesir kesitini bul (ACETOT) ve üretilen fotonlara (ACEGAM) uygun nötron çarpışmalarını (COLIDN) işle;

- Toplam foton tesir kesitini bul (PHOTOT) ve üretilen elektronlara (EMAKER) uygun foton çarpışmalarını (COLIDP) işle;
- Eğer elektron taşıması (TTBR) yoksa ince-hedef bremsstrahlung yaklaşımını seçenek olarak kullan;
- Elektron izlerini takip et (ELECTR);
- İsteğe bağlı çoklu grup çarpışmalarını işle (MGCOLN, MGCOLP, MGACOL);
- Dedektör veri çetelelerini (TALLYD) veya DXRAN'ı işle;
- Yüzey, hücre ve puls yükseklik veri çetelelerini işle (TALLY);

Periyodik olarak çıkış dosyalarını yaz, yığınları tekrar başlat, sonraki kritik döngüleri (KCODE) çoklu görev buluşmaları için güncelle ve dedektör ve DXRAN Rus ruleti ölçütlerini güncelle vs. (OUTPT):

- Sonraki kritik döngüye git (KCAL);
- Özet tabloları (SUMARY, ACTION) çıkış dosyalarını yayınla;
- Veri çeteleleri (TALLYP) yayınla;
- Yük pencerelerini (OUTWWG) oluştur.

Çizim veri çeteleleri, tesir kesitleri ve diğer veriler (MCPLLOT).

GKS grafik simülasyon kılavuzları.

PVM dağıtılan işlemci çoklu işlem kılavuzları.

Rastgele sayı oluşturucusu ve kontrolü (RANDOM).

Matematikler, karakter değiştirmeleri ve diğer yan yöntemler.

### 3.1.1 Nesil akışı

Birleşik nötron/foton/elektron taşınması problemleri için temel parçacık nesil akışı HSTORY alt yordamında ele alınır. HSTORY, nesil sayısının (NPS) artırılmasından ve rastgele sayı dizisinin ayarlanmasından sonra TRNSPT tarafından çağrılır.

İlk önce, STARTP çağrılır. Çalıştırılacak parçacığın (1 nötron, 2 foton ve 3 elektron) tipi için IPT etiketi ayarlanır. Bazı diziler ve değişkenler sıfırdan başlatılır.

Sonra, uygun kaynak yardımı çağrılır. Kaynak seçenekleri standart kaynaklar (SOURCB), yüzey kaynakları (SURSRC), KCODE kritik kaynağı (SOURCK) veya kullanıcının sağladığı (SOURCE) kaynak şeklindedir. Kaynağı tanımlayan bütün parametreler şu kaynak kılavuzlarında ayarlanır: Durumun içeriği, uçuş yönü, enerji, ağırlık, zaman, başlangıç hücresi (ve olası yüzey) ile kaynak kontrol kartlarında tanımlanan değişik dağılımların örneklemeleri.

Sonra STARTP'de, ilk elli parçacık neslinin başlangıç parametreleri yayınlanır. Sonunda kontrol için HSTORY geri çağrılır. Ardından asıl parçacık taşınımı başlatılır. Elektron kaynak için ELECTR çağrılarak çalıştırılır. Foton ve nötron kaynak için TRACK çağrılır. Hücrelerin tesir kesitleri ICL, fotonlar için PHOTOT kullanılarak hesaplanır. Sonraki çarpışmalar için mesafe PMF, tanımlanır. Hücre içindeki parçacığın iz uzunluğu D bulunur. Parçacık parametreleri (zaman, pozisyon ve enerji) güncelleştirilir.

Çarpışmalar hakkında her şey fotonlar için COLIDP altında belirlenir. Basit ve detaylandırılmış fizik işlemlerini içermektedir. Basit fizik işlemleri serbest elektronlar için daha iyidir. COLIDP çekirdek çarpışmalarını örnekler, fotoelektrik soğurmayı (veya yakalamayı), incoherent (Compton) saçılmasını koherent (Thomson) saçılmasını ve çift oluşumu işler. Elektronlar incoherent saçılma, çift oluşum ve fotoelektrik soğurma için üretilir (EMAKER).

Yüzey geçişi veya çarpışma işlemlerinden sonra çağrılan TRACK ile taşınma devam etmek üzere kontrol için HSTORY'ye geri dönülür. Neslin veri çeteleleri toplam veri çeteleleri verisine TALSHF tarafından eklenir ve geri dönüş TRNSPT için yapılır. TRNSPT içinde, eğer çıktıyı görmek gerekli

ise, veri çeteleleri yeteri kadar çalıştırıldıktan sonra iş sonlandırılacaksa, devam için çok az bir zaman kaldıysa denetlemeler yapılır. Devam için HISTORY tekrar çağrılır. Diğer durumda geri dönüş MCRUN için yapılır. MCRUN OUTPUT'u çağırır. OUTPUT SUMMARY'yı özet bilgiyi yayınlamak için çağırır. Sonra SUMMARY veri çeteleleri verisini yayınlamak için TALLYP'yi çağırır.

### 3.1.2 Tesir kesitleri

MCNP kodu birleştirilmiş nükleer veri çizelgeleri haricinde tamamlanmamıştır. Sekiz sınıf nükleer veri çizelgesi mevcuttur: (1) sürekli-enerji nötron etkileşim verisi, (2) kesikli reaksiyon nötron etkileşim verisi, (3) foton etkileşim verisi, (4) nötron dozimetri tesir kesitleri, (5) nötron  $S(\alpha,\beta)$  termal verisi, (6) çoklu grup nötron, nötron/foton çifti ve nötron gibi davranan yüklü parçacıklar, (7) çoklu grup fotonu ve (8) elektron etkileşim verisi. Burada foton ve elektron nükleerden daha çok atomiktir. Bir foton etkileşim çizelgesi Mode P probleminde her bir element için gereklidir. Benzer şekilde, bir elektron etkileşim çizelgesi Mode E probleminde her bir element için gereklidir. Dozimetri çizelgelerinden tesir kesitleri reaksiyon hızlarını belirleyen FM kartlı cevap fonksiyonları olarak kullanılabilir. Her bir nükleer veri çizelgeleri ZAID ile kimliklendirilir. Bir ZAID'in genel biçimi ZZZAAA.nnX'dir. ZZZ atom numarası, AAA atom ağırlığı, nn değer tahmini kimliklendiricidir. X veri sınıfını işaret eder. Elementel değer tahminleri için AAA=000'dır. Nükleer veri çizelgeleri Mn ve MTn kartları ile kullanıcı tarafından seçilebilmektedir.

### 3.1.3 Foton etkileşim verisi

Foton etkileşim tesir kesitleri bütün foton problemleri için gereklidir. ZAID ZZZ000.nnP biçimindedir. İki foton etkileşim veri kütüphanesi vardır: nn = 01 ve nn = 02 olmak üzere.

ZAID=ZZZ000.01P kütüphanesi için, foton etkileşim çizelgeleri Z= 84, 85, 87, 88, 89, 91, 93 için 1.0 keV'den 15.0 MeV'e kadar olan enerjilerde Storm and Israel (1967) derlemeleri esas alınmıştır. Diğer Z=1'den Z=94'e kadar olan elementlerin foton etkileşim çizelgeleri 1.0 keV'den 15.0 MeV'e kadar olan enerjilerde ENDF'in değer tahmini verilerinden alınmıştır (Hubbell

et al., 1975). Floresans verileri başka bir çalışmadan alınmıştır (Everett and Cashwell, 1973).

ZAID = ZZZ000.02P kütüphanesi Storm and Israel (1967) verisi için eklenecek çift oluşumu içeren ZAID = ZZZ000.01P'nin bir kümesidir. Storm and Israel (1967) verisinin 15.0 MeV üstü verisi ve ENDF verisinin 100.0 MeV üstü verisi Livermore Evaluated Photon Data Library (EPDL)'nin uyarlamasından gelir ve 100.0 GeV'e kadar ulaşır.

### 3.1.4 Elektron etkileşim verisi

Elektron etkileşim veri çizelgelerini ince-hedef bremsstrahlung (TTB) modelin kullanıldığı foton problemleri ve gerçek elektron taşınımını içeren problemlerin her ikisini de ihtiva etmesi gerekmektedir. Elektron veri çizelgeleri ZZZ000.nnE biçiminin ZAIDs tarafından kimliklendirilir. İki tane elektron etkileşim veri kütüphanesi (nn=03 ve nn = 01) vardır.

Elektron kütüphanesi atom numarası  $Z=1-94$  arasındaki verileri içerir. Kütüphane listelenen enerjileri, ışınımsal durdurma gücü parametreleri, bremsstrahlung üretim tesir kesitleri, bremsstrahlung enerji dağılımları, K-kenar enerjileri, Auger elektron üretim enerjileri, Riley tesir kesiti hesaplamalarına dayandırılan açılma eğilmeleri için Goudsmit and Saunderson (1940) teorisinin değer biçme parametreleri ve Goudsmit and Saunderson (1940) teorisinde kullanılan Rutherford tesir kesitleri Mott düzeltme faktörlerini içerir.

### 3.1.5 Parçacık yükü

Eğer MCNP sadece fiziksel taşınımı simüle etmiş olsaydı, her bir MCNP parçacığı tek bir fiziksel nicelik olarak temsil edilecekti ve birim yüke sahip olacaktı. Ancak hesaplama verimliliği için tam olarak fiziksel taşınımı simüle edilemeyen değişik tekniklere izin verir. Örneğin, her MCNP parçacığı bir kaynaktan yayımlanan parçacıkların sayısını  $w$  temsil edebilir. Bu  $w$  sayısı MCNP parçacıklarının başlangıç yüküdür.  $w$  fiziksel parçacıklarının tümü farklı rastgele adımlara sahip olurdu, fakat bir MCNP parçacığı temsil eden bu  $w$  fiziksel parçacıklar sadece bir rastgele adım olacaktır. Açıkça bu tam bir simülasyon değildir. Yine de, fiziksel parçacıkların doğru sayısı istatistiksel ortalama anlamında ve büyük parçacık sayılarının limiti içinde MCNP'de

korunur. Her MCNP parçacık sonucu yük tarafından çarpılır. Her bir MCNP parçacığı tarafından temsil edilen  $w$  fiziksel parçacıkların bütün sonuçları veri çetelelerinde sergilenir. Parçacık yükü her bir MCNP parçacığı ile yürütülen bir sayıdır.

### 3.1.6 Parçacık izleri

Bir kaynaktan bir parçacık harekete başladığında, bir parçacık izi oluşturulur. Eğer ayrılmış bir yüzeyde 1, 2'ye ayrılırsa, ikinci iz oluşturulur. Bu durumda özgül kaynak parçacıktan çıkan iki iz olmuş olur. İz uzunluk veri çeteleleri akım, akı veya enerji birikimini ilgilendiren bir niceliği belirlemek için verilen bir hücrede bir izin uzunluğunu kullanır. Yüzeyleri geçen izler akım, akı veya puls-yükseklik enerji birikimini hesaplamada kullanılmaktadır.

Kompozisyonu belirlenen bir hücre içinde, bir iz boyunca bir çarpışma örnekleyen yöntem aşağıdaki teoremin kullanımı ile belirlenmiştir. Bir parçacık için  $l$  ve  $dl$  arasında, uçuş hattı boyunca birinci çarpışmanın olasılığı:

$$p(l) dl = e^{-\Sigma_t \Sigma_t dl} \Sigma_t dl \quad (3.1)$$

burada  $\Sigma_t$  ortamın makroskopik toplam tesir kesitidir ve bir çarpışmanın birim uzunluk başına olasılığı olarak yorumlanır. Ayarlanan  $\xi$  rastgele sayısı  $[0,1)$  aralığındadır ve şu şekilde ifade edilir;

$$\zeta = \int_0^l e^{-\Sigma_t s} \Sigma_t ds \quad (2.2)$$

Devamında

$$l = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(1 - \zeta) \quad (3.3)$$

Çarpışma mesafesini açıklayan iyi bilinen durum şu hale gelir:

$$l = \frac{1}{\Sigma_t} \ln \zeta \quad (3.4)$$

### 3.1.7 Tally (Ambar-veri çetelesi)

Ambar olarak adlandırabileceğimiz ve sonuçların toplandığı bu bölümde tanecikler için standart veri çeteleleri mevcuttur. Bunlardan amaçlara uygun

veri çeteleleri kullanılmaktadır. Örneğin parçacık akımı F1, enerjinin depolanması F6 veri çeteleleri ile elde edilebilmektedir.

Bir MCNP hesaplamasının sonuçları, ilgilenilen konu ile ilişkili olarak çıktıların toplanmasıyla elde edilir. Akımlar, akılar, enerji oluşumu, dedektör verimi ve reaksiyon hızları gibi verilerin birleştirilmesi ile sonuçlar elde edilir. Bütün nesiller kaynaktan yayınlanan parçacık sayısına bölünerek normalize edilir (Hançerlioğulları, 2006.).

Hesaplanması istenilen nicelikler, MCNP'de kullanılan veri çeteleleri Çizelge 3.1'dedir (Briesmeister, 2000). Bu çalışmada bu veri çetelelerinden F1 ve F6 kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. MCNP'de kullanılan veri çeteleleri.

Sembol	Veri Türü	Birimi
F1	Tüm yüzey üzerinden integre edilen parçacık akımı	Parçacık
F2	Yüzey üzerinden ortalama akı	Parçacık/cm <sup>2</sup>
F4	Hücre üzerinden ortalama akı	Parçacık/cm <sup>2</sup>
F5a	Nokta veya halka dedektörün parçacık akısı	Parçacık/cm <sup>2</sup>
F6	Herbir hücrede biriken enerji (doz)	MeV/g
F8	Dedektörde üretilen pulsların enerji dağılımı	

### 3.2 İstatistiksel Hata Hesabı

Monte Carlo sonuçları olası rastgele adımların örneklenmesi ile elde edilir. Her bir rastgele adım için bir  $x_i$  skoru belirlenir. Örneğin,  $x_i$   $i$ . rastgele adım tarafından depolanan enerjiyi ifade eder.

Varsayalım ki,  $f(x)$  olasılık yoğunluk fonksiyonunun skor neslidir (history). Doğru cevap veya aritmetik ortalama  $x$ 'in beklenen değeridir.

$$E(x) = \int x f(x) dx \quad (3.5)$$

$f(x)$  MC rastgele adım işlemleri tarafından örneklenmesidir. Ortalama değer, örnek tarafından tahmin edilen değerdir.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.6)$$

Burada  $x_i$   $i$ 'inci nesil için  $f(x)$  den seçilen  $x$ 'in değeridir.  $N$  problemde hesaplanan nesillerin sayısıdır. Monte Carlo ortalaması  $\bar{x}$  problemde hesaplanan bütün nesiller için  $x_i$  skorlarının ortalama değeridir. Eğer  $E(x)$  sonlu ise,  $\bar{x}$   $N$  sonsuza yaklaşırsa limit  $E(x)$ e yaklaşır.

$X$  değerlerinin popülasyonunun varyansı (istatistiksel hataları indirmek) bu değerlerde dağılımının ölçüsüdür.

$$\sigma^2 = \int (x - E(x))^2 f(x) dx = E(x^2) - (E(x))^2 \quad (3.7)$$

Varyansın karekökü  $\sigma$ 'dır.  $\sigma$  skorların popülasyonunun standart sapmasıdır.  $\sigma$  Monte Carlo çalışmalarında  $S$  ile gösterilir ve büyük  $N$ 'ler için şöyle tahmin edilebilir:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \sim \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (3.8)$$

ve

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (3.9)$$

$S$  niceliği  $x_i$  değerlerine dayandırılan  $x$  popülasyonunun tahmin edilen standart sapmasıdır.  $x_i$  gerçek örneklemeler idi.  $\bar{x}$ 'in tahmin edilen varyansı:

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S^2}{N} \quad (3.10)$$

$\bar{x}$  ortalamasının tahmin edilen standart sapması  $S_{\bar{x}}$  tarafından verilen değerdir.

$S_{\bar{x}}$   $1/\sqrt{N}$  ile orantılıdır.

### 3.2.1 MCNP'de bağıl hataların hesaplanması

Bağıl hata şu şekilde formüle edilir:

$$R \equiv S_{\bar{x}} / \bar{x} \quad (3.11)$$

Bağıl hata elverişli bir sayıdır. Çünkü tahmin edilen ortalamaya göre istatistiksel kesinliği göstermektedir.

Eşitlikler (3.6), (3.8), (3.9) ve (3.10)'den faydalanarak R, büyük N'ler için şöyle yazılabilir:

$$R = \left[ \frac{1}{N} \left( \frac{\bar{x}^2}{\bar{x}^2} - 1 \right) \right]^{1/2} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} - \frac{1}{N} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{N} \ll \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (3.13)$$

$$R \sim \left[ \frac{nx^2}{n^2x^2} \right]^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad n \ll N \quad (3.14)$$

Bağıl hata (R) ve deneme sayısı (n) arasındaki sayısal ilişki Çizelge 3.2'de, bağıl hatanın (R) yorumu Çizelge 3.3'de verilmiştir. n değerinin artması ile bağıl hata da azalmaktadır. Simülasyon çalışmalarında bağıl hatanın en aza indirilebilmesi için yeterince sayıda deneme yapılması gerekmektedir.

Çizelge 3.2. R ve n arasındaki ilişki.

<b>n</b>	1	4	16	25	100	400
<b>R</b>	1.0	0.5	0.25	0.20	0.10	0.05

Bağıl hata bir çalışma için çok önemlidir. % 50.0 ile % 100.0 hata aralığı simülasyon çalışmaları için bir anlam ifade etmemektedir. Yapılan bir çalışmanın güvenilirliğinin olabilmesi için % 1.0 civarlarında olması gerekmektedir. % 1.0'in altındaki değerler güvenilir sonuçlardır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Bağlı hatanın yorumu.

<b>R</b>	<b>Veri çetelesinin niteliği</b>
0.5 – 1.0	Anlamlı değil
0.2 – 0.5	Birkaç faktör
0.1 – 0.2	Tartışmaya açık
< 0.10	Genellikle güvenilebilir
< 0.05	Nokta dedektörler için genellikle güvenilebilir

### 3.2.2 Parçacık akısı

Akı bir yüzeyden geçen parçacık sayısı cinsinden ifade edilir. Uzunluğun ters karesi boyutundadır. Birimi genellikle  $\text{cm}^{-2}$ 'dir.

Verilen bir yüzeyden iyi tanımlanmış bir yönde geçen parçacıkların net sayısı radyasyon alanıyla ilgili en temel ve en önemli ölçütlerdendir. Belirli bir zaman aralığında bir yüzeyden yüzeyin diğer tarafına doğru geçen parçacıkların sayısının, yüzey alanına oranı, bu yüzey üzerindeki noktadan geçen net parçacık akısı olarak tanımlanır ve Net Akı şeklinde isimlendirilir. Bir yüzey üzerinden, yüzeyin pozitif olarak kabul ettiğimiz tarafından negatif tarafa geçen parçacıkların sayısı  $\Delta M^-$ ; negatif taraftan pozitif tarafa geçen parçacıkların sayısı  $\Delta M^+$  ile ifade edilirse, yüzeyden geçen net parçacık sayısı,

$$\Delta M_p \equiv \Delta M_p^+ - \Delta M_p^- \quad (3.15)$$

olur (Yeğin, 2002).

### 3.3 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Gama ve X ışını gibi bütün elektromanyetik radyasyonlar birçok olayda parçacıklara benzer davranış gösterdiği için, çok küçük enerji paketleri anlamına gelmek üzere bu radyasyonların birim elemanına foton adı verilmiştir. Radyasyonun belli bir frekansı için bütün paketlerde taşınan enerji aynıdır. İç dönüşüm geçiren bir çekirdek artık enerjisini radyasyon biçiminde dışarı atar. Yayınlanan radyasyon yolu üzerinde içinden geçtiği madde ile etkileşir. Nötronlar dışındaki diğer radyasyon türleri genellikle atomun bağlı/yörünge elektronlarıyla etkileşir (Bozkurt, 2011).

Radyasyonun elektrondan nasıl saçılacağını parçacığın yükü ve kütlesi belirler. Ağır bir parçacık, çarpıştığı kendinden çok hafif elektrona çok az enerji aktarabilir. Elektron-elektron saçılmalarında enerji paylaşımı daha belirgindir. Fotonlar etkileştiği bağlı elektrondan saçılabileceği gibi, elektron tarafından soğurulabilir. Genel olarak bir kuraldan bahsedilecek olursa, tüm radyasyon etkileşimleri elektron açığa çıkarır. Elektronlar madde ile etkileştiklerinde hareketli ve yüklü parçacıklara neden olurken fotonlar ise hareketli elektronlar oluştururlar (Bozkurt, 2011).

Enerjisi 10.0-50.0 keV aralığında enerjiye sahip olan elektron demeti genellikle tungsten veya tantalumdan yapılmış bir hedefe çarptırıldığında elektronlar hedef elektrodun içine girerek kinetik enerjilerinin büyük kısmını saçılma yoluyla kaybederler ve bu enerji ısıya dönüşür. Gelen elektronların enerjilerinin küçük bir kısmı ise X-ışını bölgesinde elektromanyetik ışımaya dönüşür. Bu olay sonucu yayınlanan fotonlara "bremsstrahlung ışınları" adı verilir.

Fotonlar madde içerisinde ilerlerken uzun uzanımlı etkileşmezler, sadece yerel veya kademeli etkileşimler yaparlar. Coulomb veya nükleer kuvvete maruz kalmadıklarından dolayı, bir foton demeti herhangi bir malzeme içerisinde ilerlerken, ortamla etkileşen fotonlar demetten ayrıldıkça demetin şiddeti de azalır. Düşük enerjili fotonlar sadece bir kez etkileşir ve tek bir birincil elektron oluşturur. Orta enerjili fotonlar ise birkaç kez etkileşebileceğinden enerjileri tükenene kadar birkaç birincil elektron oluşturabilecektir. Yüksek enerjili fotonlar ise madde-anti madde çifti oluşturabilecek ve böylece ikincil elektronlar oluşturabileceklerdir. Demet içinde kalan etkileşmeye uğramayan fotonların enerjileri sabit kalır ve böylece

belli bir malzeme kalınlığı içerisinde etkileşme olasılığı da fotonun enerjisi ne olursa olsun sabit kalır. Bir foton demetindeki elektromanyetik ışımının madde içindeki zayıflaması Beer-Lambert yasası ile ifade edilir:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.16)$$

Burada  $I_0$  ve  $I(x)$  sırasıyla malzeme üzerine gelen ve  $x$  kalınlığındaki malzemenin geçen demet şiddetini temsil eder. Foton enerjisine ve malzemenin cinsine bağlı bir sabit olan  $\mu$ , malzemenin toplam doğrusal soğurma katsayısıdır. Bir malzeme içinde fotonların ortalama serbest yolu  $\lambda = 1/\mu$  ile verilir. Yarı-değer kalınlığı ise  $x_{1/2} = \ln 2/\mu$  şeklinde ifade edilir. Kütleli soğurma katsayısı ( $\mu/\rho$ ), doğrusal soğurma katsayısının ( $\mu$ ) malzemenin yoğunluğuna ( $\rho$ ) bölünmesiyle elde edilir. Malzemenin fiziksel halinden bağımsızdır ve temel etkileşimlerin atom başına tesir kesiti ile ifade edilebileceği gerçeğini temsil eder (Bozkurt, 2011).

MCNP Programı maddesel bir ortamda parçacıkların taşınmasını simüle etmektedir. Örneğin bir fotonu kaynaktan çıkartır ve bu andan itibaren takip etmeye başlar. Burada işlem her bir foton için ayrı ayrı gerçekleştirilir. Foton, etkileşimler arasında enerjisini kademeli olarak kaybeder, belirlenen enerji değerine düşene kadar izlenir. Taşıma fotonun enerjisi, 1.0 keV'lik "kesme" değerinin altına düştüğünde sonlandırılır ve yeni bir parçacık taşınmaya başlar (Briesmeister, 2000).

Bir dedektör malzemesine giren bir gama ışınının yapacağı etkileşimlerden bazıları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Foton defalarca Compton saçılması yapabilir; her saçılmadan sonra enerjisinin bir kısmını kaybederek bir serbest elektron üretir. Foton Compton saçılmasına devam ederse en sonunda enerjisi o kadar azalır ki fotoelektrik soğurma meydana gelerek yok olur. Eğer kristalin kenarına çok yaklaşmışsa dışarı çıkar. Netice itibarıyla fotonun enerjisi elektronlara aktarılmış olur. Oluşan bu elektronların kristal içindeki uzanımları çok kısadır. Işık fotonları veya elektron-deşik çiftleri yaratarak çok hızlı bir şekilde enerjilerini kaybederler. Bu durumda enerjinin tamamının soğurulduğunu kabul ederek, bu değeri özgün fotonun dedektörde bıraktığı enerji olarak ele alabiliriz. Eğer ilk foton sonunda fotoelektrik soğurmaya maruz kalırsa dedektör kristaline aktarılan enerji özgün  $\gamma$ -ışını enerjisine eşit olur. Buna karşın, foton kristalin dışına saçılırsa, aktarılan enerji doğal olarak özgün fotonun enerjisinden küçük olacaktır. Çift oluşumunda bir pozitron ve bir

elektron  $E_\gamma - 2mc^2$ 'lik bir toplam kinetik enerji ile yaratılır. Pozitron önce atom elektronunkine yakın bir enerji değerine kadar yavaşlar ve *yokolma* meydana gelir. Bu olayda pozitron ve atom elektronu yok olur ve bunların yerine  $mc^2$  veya 511.0 keV enerjili iki foton yaratılır. Bu yaratılan iki foton hiçbir etkileşme yapmadan dedektörden dışarı kaçabilir veya Compton saçılma işlemleriyle kısmen yahut tamamen soğurulabilir (Krane, 2001).

Bir gama fotonu dedektöre girdiğinde, Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, oluşabilecek olaylar özetle şöyledir:

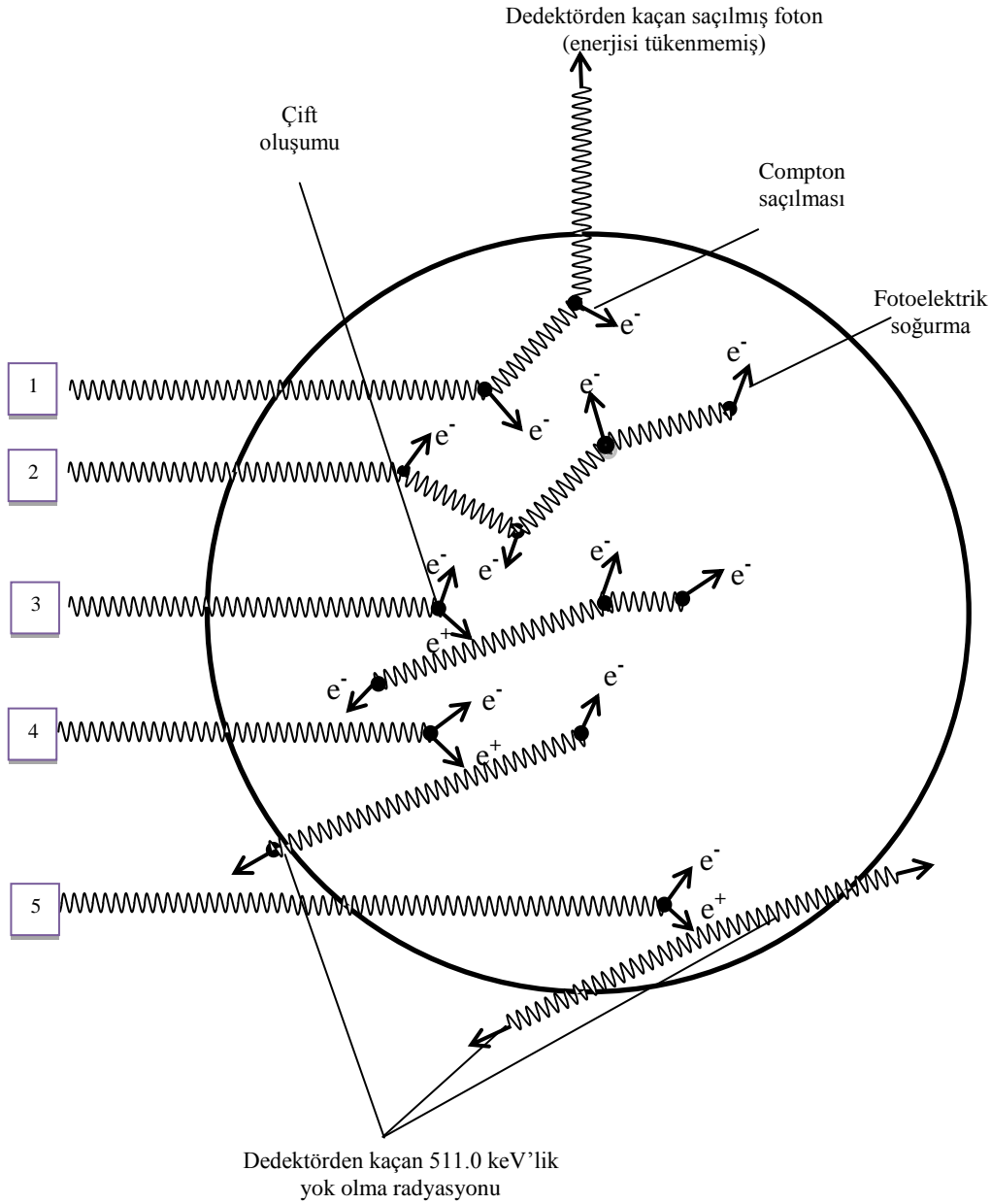
(1) Foton, birkaç defa Compton saçılması yaparak enerjisinin tamamını yitirmeden dedektörü terk eder.

(2) Birçok Compton saçılmasından sonra fotoelektrik soğurma yaparak enerjisinin tamamını kaybeder.

(3) Çift oluşumunu pozitron yokolması, Compton saçılması ve fotoelektrik soğurma takip ederek enerjinin tamamı dedektöre aktarılır.

(4) Gama ışını enerjisinin 1022.0 keV'den fazla olduğu durumda, yokolma fotonlarından biri dedektörü terk eder ve gama ışınları 511.0 keV'lik enerjisinin hepsini kaybeder.

(5) Gama ışını enerjisinin 1022.0 keV'den fazla olduğu durumda, yokolma fotonlarının her ikisi de dedektörü terk ederken 1022.0 keV'lik enerjiyi dedektör malzemesine aktarır.



Şekil 3.2. Bir gama fotonu dedektör malzemesine girdiğinde oluşabilecek olaylar.

Burada ortalama değerler ve olasılık dağılımı söz konusudur. Programda rastgelelik sergileyen fiziksel olaylar Monte Carlo Tekniği ile gerçekleştirilir. Rastgele değişkenler kullanılarak parçacık taşınması ile ilgili fiziksel değişkenlerin gerçek değerlere uygun seçimi yapılır. Parçacığın iki etkileşim arasında aldığı ortalama serbest yol olarak adlandırılan mesafe, etkileşim türü ve etkileşim sonrası yayınlanan ikincil parçacıkların ve fotonların çıkış açıları rastgele olarak simüle edilir.

### 3.3.1 MCNP'de simüle edilen foton etkileşimleri

MCNP basit ve detaylı olmak üzere iki foton etkileşim modeline sahiptir. Basit fizik işlemleri koherent (Thomson) saçılması ve fotoelektrik soğurmada kaynaklanan floresans fotonlarını dikkate almazken, yüksek enerjili foton problemlerini ele alır. Ayrıntılı fizik işlemleri koherent (Thomson) saçılması ve fotoelektrik soğurmada meydana gelen floresans fotonlarını hesaplar. Bıçım faktörleri bağlı elektron etkisini hesaplamada kullanılmaktadır. Analog yakalama daima kullanılmaktadır. Ayrıntılı fizik işlemleri PHYS:P kartı üzerinden EMCPF'den düşük enerjiyi kullanır. Çünkü varsayılan EMCPF 100.0 MeV'dir. Çoğu uygulamalarda özellikle büyük  $Z$ 'li çekirdekler için iyi davranış sergiler.

### 3.3.2 TTB yaklaşımı

Fotonlardan meydana gelen elektronların üretimi üç yolla elde edilir. Bu üç yol basit detaylı fizik işlemlerinin ikisi gibi aynıdır. (1) Eğer elektron taşınımı (Mode P E) etkinleştirilirse, koherent saçılma haricinde bütün foton etkileşimleri elektron oluşturabilir ki elektronlar sonraki taşınım için biriktirilir. (2) Eğer elektron taşınımı kapatılırsa (Mode kartında E yoktur) ince-hedef bremsstrahlung model (TTB) kullanılır. Bu model elektronları üretir, fakat onları, gelen fotonun yönünde seyahat ettirir ve hemen yok edilir. Taşınmayan elektronlardan üretilen herhangi bir bremsstrahlung fotonu sonraki taşınım için biriktirilir. Böylece elektronun indüklediği fotonlar ihmal edilemez fakat pahalı elektron taşınım adımı atlanır. (3) Eğer, PHYS:P kartında IDES = 1 ise, sonraki bütün elektron üretimi kapatılır, elektronların indüklediği fotonlar oluşturulur ve bütün elektronların enerjisinin lokal olarak biriktirilmiş olduğu varsayılır.

TTB yaklaşımı Mode P E problemlerinde kullanılmaz fakat Mode P problemleri için varsayılandır.

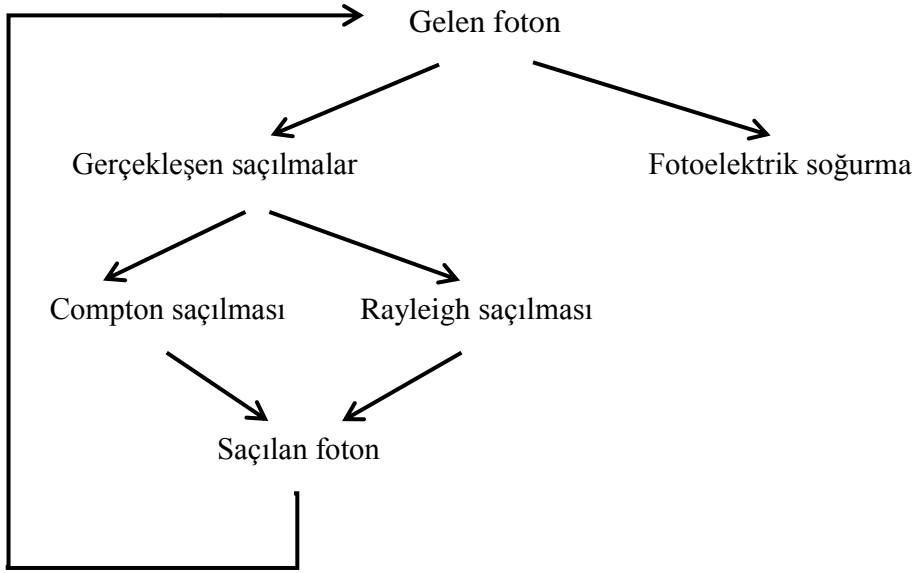
### 3.3.3 Basit fizik işlemleri

Basit fizik işlemleri yüksek enerjili fotonlar için kullanılır. Büyük  $Z$ 'li çekirdekler veya derin nüfuz problemleri için yetersizdir. İşlenen fiziksel işlemler fotoelektrik etki, çift oluşum ve serbest elektronlar üzerine Compton saçılımıdır. Fotoelektrik etki soğurmayı, saçılma (Compton) serbest

elektronları ele alır ve koherent (Thomson) saçılması ihmal edilir. Böylece toplam tesir kesiti  $\sigma_t$ , bu üç bileşimin toplamını ele alır:

$$\sigma_t = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_s \quad (3.17)$$

Bu etkileşimlerin ayrı mekanizmaları ve kendi içindeki farklılıkları olsa da sonuçta foton girdiği ortamda enerjisinin tamamını veya bir kısmını bırakmaktadır. Foton-madde etkileşim mekanizması Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Foton madde etkileşim mekanizması.

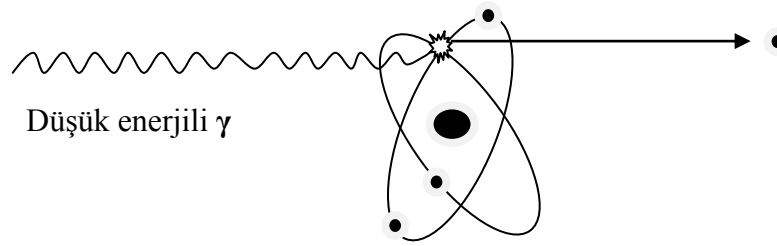
### 3.3.3.1 Fotoelektrik etki

Fotoelektrik soğurma  $E_\gamma < 0,1$  MeV iken ağır elementlerde baskındır. Bu etkileşimde bir foton demetten ayrılmış kabul edilir. Hangi etkileşimin oluşacağı rastgeledir ve göreceli olasılıkları foton enerjisine bağlıdır. Fotosellerin ışığı algılaması, güneş ışığını enerjiye dönüştüren fotovoltaik pillerin mekanizmasında olduğu gibi yaygın kullanışı olan bir olaydır (Bozkurt, 2011).

Bu olayda tek bir foton bir serbest elektrona dönüşür. Momentumun korunumu gereği atoma bağlı bir elektron ile etkileşime giren foton, tamamen soğurulur ve elektron atomdan belli bir kinetik enerji ile kopar. BE elektronun atoma bağlanma enerjisi,  $h\nu$  gelen fotonun enerjisi olmak üzere

$$KE_{e^-} = h\nu - BE \quad (3.18)$$

ile hesaplanmaktadır. Elektronun ayrılması ile atomik kabukta bir boşluk meydana gelir. Uyarılmış durumdaki atom, floresans fotonları, Auger ve Coster–Kroning elektronları yayınlamaya taban enerji durumuna gelir. Bu sürece flüoresan olayı adı verilir ve üst kabuktan bir elektron alt kabuktaki boşluğu doldurduğunda genellikle bir X-ışını fotonu (karakteristik X-ışınması) oluşturulur. Atomdan kopan elektron malzeme içinde saçılmaya uğradıkça kinetik enerjisini kaybeder (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Fotonun serbest elektrona dönüşmesi.

Fotoelektrik etki gerçekleşme olasılığı veya tesir kesiti keV bölgesindeki bir foton için atomun büyüklüğünün karesi mertebesinde. Tesir kesiti, foton enerjisi arttıkça hızla azalır ve soğurucu malzemenin atom numarasına bağlıdır. Tesir kesiti kabaca şu bağımlılığa sahiptir:

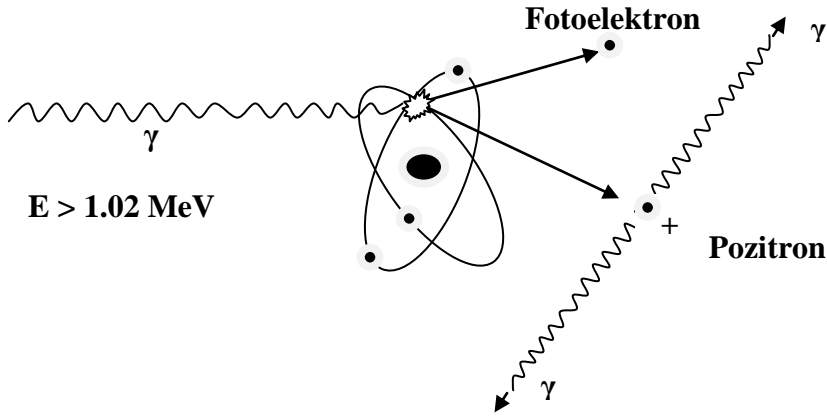
$$\sigma_{\text{fotoelektrik}} \propto Z^n / E_\gamma^{7/2} \quad 4 \leq n \leq 5$$

MCNP’de bu foton yüküne karşılık gelen indirgeme (WGT) ile kesin yakalama komutu saf soğurmaya işleme alır. Bundan dolayı yük kesme üzerine oynanan Rus ruleti haricinde bir parçacığın neslinin kaybıyla sonuçlanmaz. Yordam yakalanmama yükü  $WGT(1 - \sigma_{pe}/\sigma_t)$  ya çift oluşum veya Compton saçılması üzerine yönlendirir. Yakalanma yükü ya yerel olarak biriktirilmiş olarak kabul edilir veya elektron taşınımı için fotoelektron olur.

### 3.3.3.2 Çift oluşum

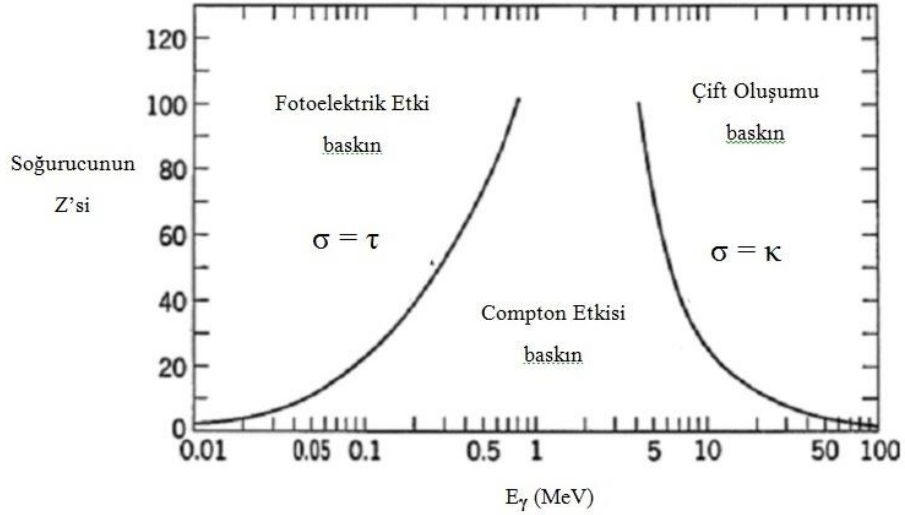
Enerjisi 1.022 MeV’lik eşik enerjisinden sonra çift oluşum olayı baskın hale gelir ve yüksek enerjili fotonlar için söz konusudur. Bu etkileşimde de bir foton demetten ayrılmış kabul edilir. Hangi etkileşimin oluşacağı rastgeledir ve göreceli olasılıkları foton enerjisine bağlıdır (Bozkurt, 2011).

Gelen fotonun enerjisi iki elektron kütlesinden (1.022 MeV) büyükse, çift oluşum mümkün olur. Gelen foton, çekirdeğin Coulomb alanı ile etkileşir ve enerjisi bir elektron ve bir pozitron (madde-anti madde çifti) üretmeye harcanır. Coulomb alanı içerisinde enerji ve momentumun korunumu gereği, üretilen elektron ve pozitron gelen fotonun ilk doğrultusu ile küçük bir açı yaparak ileri doğru hareket ederler. Üretilen parçacık çifti, malzeme içindeki yörünge elektronları ve çekirdekler ile etkileşebilir. Tesir kesiti, artan foton enerjisi ile hızla artar ve 10.0 MeV üzerinde doyuma ulaşır. Bu süreç için eşik enerjisi 1.022 MeV'dir. Yüksek enerjili fotonlar için baskındır. Çift oluşum olayında elektrik yükü korunur. Üretilen pozitron bir elektron ile karşılaştığında yokolma reaksiyonu gerçekleşir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çift oluşum olayı.

Madde içerisine giren fotonlar, maddenin atom veya çekirdekleriyle etkileşene kadar ilerlemeye devam edecektir. Foton enerjisine bağlı olarak, etkileşim yüksek enerjilerde baskın biçimde çift oluşum şeklinde, düşük enerjilerde ise Compton saçılması veya fotoelektrik soğurma gerçekleşir. Şekil 3.6'da fotonların madde ile etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu enerji bölgeleri gösterilmiştir.



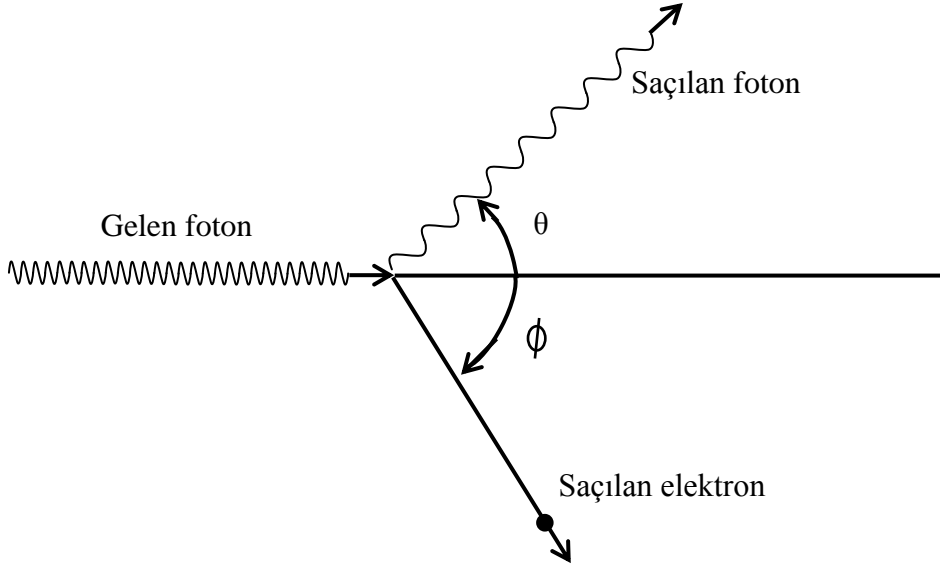
Şekil 3.6. Üç gama ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu enerji bölgeleri.

Çift oluşumda bir çarpışma sonucunda [olasılık  $\sigma_{pp}/(\sigma_t - \sigma_{pe})$ ], ya taşınımından daha fazla elektron-pozitron çifti yaratılır, foton kaybolur veya varsayılır ki, kinetik enerji  $WGT (E - 1.022 \text{ MeV})$  üretilen elektron-pozitron çifti çarpışma noktasında anında termal enerji olarak biriktirilir, 0.511 MeV enerjili bir foton izotropik üretim ile bir yönde yönelir, 0.511 MeV enerjili diğer foton zıt yönde yönelir. Nadiren tek 1.022 MeV'lik yokolma (annihilation) fotonu görmezden gelinir. Çift oluşum için basit fizik işlemi ayrıntılı fizik işlemi gibi aynıdır.

### 3.3.3.3 Compton saçılması (koherent olmayan saçılma)

Orta enerjilerde baskındır. Bu etkileşimde diğer ikisinde olduğu gibi herhangi birini geçiren bir foton demetten ayrılmış kabul edilir. Etkileşimlerin oluşması göreceli olasılıkları fotonun enerjisine bağlı olmakla birlikte rastgelelik vardır (Bozkurt, 2011).

Madde içerisine giren fotonun enerjisi iç kabuktaki elektronların bağlanma enerjilerinden büyükse, gelen foton enerjisinin bir kısmını kaybetmiş şekilde elektrondan saçılır ve sonuçta elektron atomdan kopar. Compton saçılmasının geometrisi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Compton saçılmasının geometrisi.

Compton saçılması gelen fotonun atomun yörünge elektronları ile etkileşmesi sonucu, ilk hareket doğrultusuna göre yolunun sapması, enerjisinin bir kısmı etkileşimde elektrona aktarıldığı için enerjisinin azalmasıdır. Momentum korunumu içerisinde saçılan foton ve elektronlar ilk geliş doğrultusuna göre belli açılarda hareket ederler.

Elektrona aktarılan enerjinin elektronun bağlanma enerjisinden daha büyük olması durumunda bu etkileşim olabilir. Elektronun bağlanma enerjisine kıyasla gelen fotonun enerjisi çok büyükse, elektronun bağlanma enerjisi ihmal edilerek elektron serbest olarak kabul edilebilir. Genellikle etkileşim elektronun bağlanma enerjisinin küçük olduğu dış kabuk elektronları ile olur ve çoğunlukla K ve L, X-ışınları yayınlanmaz. Compton saçılmasının olma olasılığı su ortamında 1.0 MeV enerjilerde en fazladır. Olayın olma olasılığı enerjinin azalması ile azalacaktır.

Geliş doğrultusu ile  $\theta$  açısı yaparak saçılan fotonun enerjisi, enerji ve momentum korunum yasaları kullanılarak:

$$\varepsilon' = \varepsilon \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \right] \quad (3.19)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Saçılan elektronun enerjisi şu formül ile hesaplanabilir;

$$\varepsilon_{e^-}' = \varepsilon \left[ 1 - \frac{1}{\left[ 1 - \frac{\varepsilon}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \right]} \right] \quad (3.20)$$

Saçılan elektron,  $\phi$  açısı ve  $\theta$  açısı ile saçılan fotonun saçılma açıları arasında;

$$\tan \phi = \frac{1}{(1 + \tan(\theta / 2))} \quad (3.21)$$

şeklinde bir ilişki vardır.

Buradan da görülmektedir ki,  $\theta$  açısı küçüldükçe, elektrona aktarılan enerji sıfıra doğru gidecektir.  $\theta=180$  olması durumunda yani geri saçılmada elektrona aktarılan enerji maksimum olacaktır.

Çift oluşumun alternatifini  $\sigma_s/(\sigma_f - \sigma_{pe})$  olasılığı ile bir serbest elektron üzerine Compton saçılımıdır. Böyle bir çarpışma olayında, amaç saçılan fotonun enerjisini  $E'$  ve uçuş hattından yansıyan  $\theta$  açısı için  $\mu = \cos \theta$  belirlemektir. Bu aynı anda çarpışma noktasında biriktirilen enerjiyi  $WGT(E - E')$  ve saçılan fotonun yeni yönünü sağlar. Çarpışma noktasında depolanan enerji TTB yaklaşımından veya taşınımından ziyade Compton geri saçılma elektronu yapmak için kullanılabilir. Klein-Nishina tarafından verilen diferansiyel tesir kesiti işlem formülü:

$$K(\alpha, \mu) d\mu = \pi r_0^2 \left( \frac{\alpha'}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\alpha'}{\alpha} + \frac{\alpha}{\alpha'} + \mu^2 - 1 \right] d\mu \quad (3.22)$$

$r_0$  klasik elektron yarıçapı ( $2.817938 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ),  $\alpha$  ve  $\alpha'$  gelen ve son foton 0.511 MeV'lik enerjileri [ $\alpha = E / (mc^2)$ ],  $m$  elektronun kütlesi,  $c$  ışık hızı ise  $\alpha' = \alpha / [1 + \alpha (1 - \mu)]$ .

Compton saçılma işlemi, 1.5 MeV altında Kahn (1956) yöntemi 1.5 MeV'in üzerinde ise Koblinger (1975) yöntemiyle Blomquist and Gelbard (1983) tarafından analiz edilerek örneklenmiştir.

Sonraki olay tahminçileri için mesela dedektörler için, dedektör noktasına doğru olası yoğunluk saçılması hesap edilebilir:

$$P(\mu) = \frac{1}{\sigma_1^K(Z, \alpha)} K(\alpha, \mu) \quad (3.23)$$

$\sigma_1^K(Z, \alpha)$   $\alpha$  enerjisi için bütün açılar üzerinden  $K(\alpha, \mu)$ 'nin integrasyonu ile elde edilen toplam Klein-Nishina tesir kesitidir. Bu zor bir integrasyondur. Bunun için Hastings (1991)'in ampirik formülü kullanılmıştır:

$$\sigma_1^K(Z, \alpha) = \pi r_0^2 \frac{c_1 \eta^2 + c_2 \eta + c_3}{\eta^3 + d_1 \eta^2 + d_2 \eta + d_3} \quad (3.24)$$

$\eta = 1 + 2.22037a$ ,  $c_1 = 1.651035$ ,  $c_2 = 9.340220$ ,  $c_3 = -8.325004$ ,  $d_1 = 12.501332$ ,

$d_2 = -14.200407$ , ve  $d_3 = 1.699075$ . Böylece,

$$p(\mu) = \frac{\eta^3 + d_1 \eta^2 + d_2 \eta + d_3}{c_1 \eta^2 + c_2 \eta + c_3} \left( \frac{\alpha'}{\alpha} \right)^2 \left( \frac{\alpha}{\alpha'} + \frac{\alpha'}{\alpha} + \mu^2 - 1 \right) \quad (3.25)$$

100.0 MeV üzerinde, ayarlanmış Hastings formülünün fazla geçerliliği yoktur, yaklaşım şöyle yapılır:

$$\sigma_1^K(Z, \alpha) = \sigma_1(Z, \alpha) / Z \quad (3.26)$$

Sonuç olarak,

$$p(\mu) = \frac{Z \pi r_0^2}{\sigma_1(Z, \alpha)} \left( \frac{\alpha'}{\alpha} \right)^2 \left( \frac{\alpha}{\alpha'} + \frac{\alpha'}{\alpha} + \mu^2 - 1 \right) \quad (3.27)$$

halini alır.

### 3.3.4 Ayrıntılı parçacık fiziksel etkileşmeleri

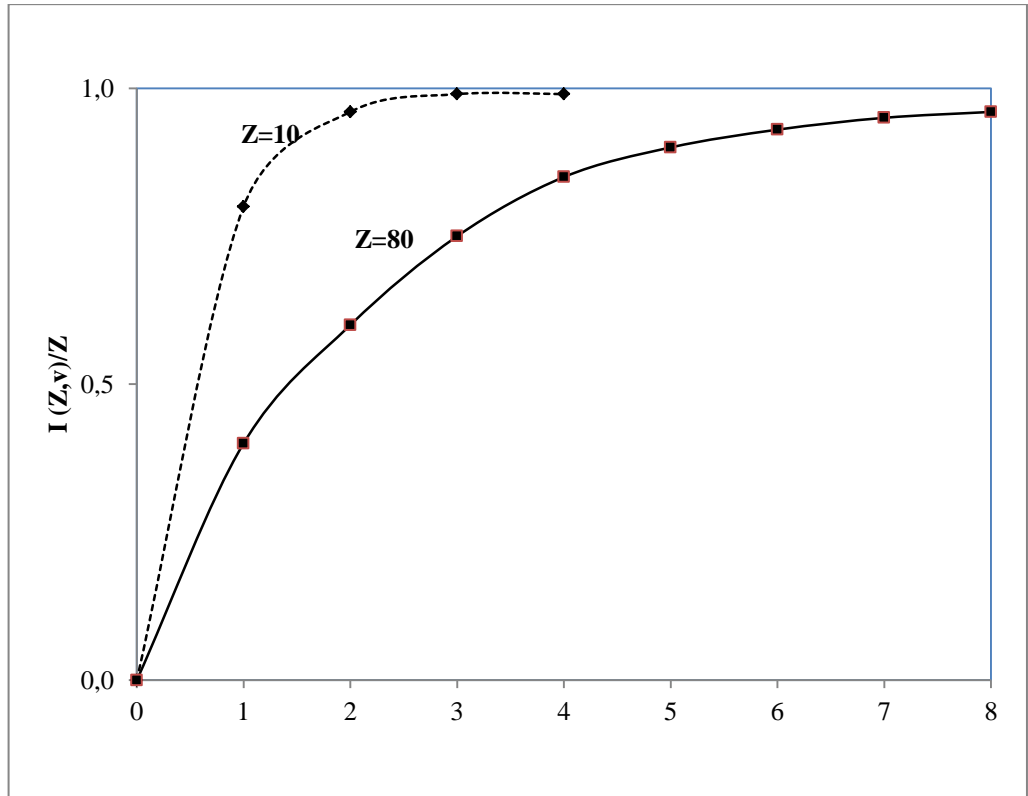
Ayrıntılı parçacık fiziksel etkileşmeleri, koherent (Thomson) saçılmasını içerir ve fotoelektrik soğurmadan sonraki floresans fotonlarını açıklar. Form faktörleri bağlı elektron etkilerini açıklamak için inkoherent ve koherent saçılmalarıyla kullanılmaktadır. Ayrıntılı parçacık fizik etkileşmeleri PHYS:P kartı üzerine EMCPF enerjisi altında kullanılmaktadır. Çünkü EMCPF'nin varsayılan değeri 100.0 MeV'dir. Bunun manası, neredeyse daima varsayılanın kullanılmasıdır. Çoğu uygulamalar için özellikle büyük  $Z$ 'li çekirdekler ve derin giricilik problemleri için en iyi işlemdir.

### 3.3.4.1 İnkoherent (Compton) saçılması

Compton saçılması modeli için, gelen uçuş hattında saçılma açısını  $\theta$  (yeni bir yön), fotonun yeni enerjisini  $E'$  ve elektronu geri tepme kinetik enerjisini  $E-E'$  belirlemek gereklidir. Geritepme kinetik enerjisi yerel olarak depo edilebilir. Mode P E problemlerinde taşınabilir veya (varsayılan) TTB yaklaşımıyla işlenebilir.

Diferansiyel tesir kesitini  $\sigma_I(Z, \alpha, \mu)d\mu = I(Z, \nu) K(\alpha, \mu)d\mu$  elde etmek için inkoherent saçılma varsayılır.  $I(Z, \nu)$  Eşitlik (3.2)'deki değiştirilmiş Klein-Nishina tesir kesiti için tam saçılma faktörüdür.

Niteliksel olarak,  $I(Z, \nu)$  etkisi büyük  $Z$ 'lerden bağımsızdır ve Klein-Nishina tesir kesiti düşük  $E$  değerleri için ilerleme yönünde (elektron başına) son derece azalış göstermektedir. Herhangi bir  $Z$  için,  $I(Z, \nu)$   $I(Z, 0) = 0$  den  $I(Z, \infty) = Z$ 'ye artar. Parametre  $\nu$  ters uzunluktur.  $\nu = \sin(\theta/2) / \lambda = \kappa \alpha \sqrt{1 - \mu}$ ;  $\kappa = 10^{-8} m_o c / (h \sqrt{2}) = 29.1445 \text{ cm}^{-1}$   $I(Z, \nu)$ 'nin esas özellikleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Hidrojen için kullanılan form faktörü (Grodstein, 1957).

$$I(1, \nu) = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2}f^2\nu^2\right)^4}$$

$f$  ters hassas yapı katsayısıdır,  $f = 137.0393$ , ve  $f/\sqrt{2} = 96.9014$ .

Klein-Nishina formülü 1.5 MeV altında Kahn (1956) yöntemi, 1.5 MeV'in üzerinde ise Blomquist and Gelbard (1983) tarafından analiz edilerek ve tavsiyeleriyle Koblinger (1975) yöntemiyle örneklenmiştir. Dışarı giden enerji ve  $\mu$  açısı form faktörlerine göre reddedilmiştir.

Sonraki olay tahminçileri için mesela dedektörler için, dedektör noktasına doğru olası yoğunluk saçılması hesap edilebilir:

$$P(\mu) = \frac{1}{\sigma_1(Z, \alpha)} I(Z, \nu) K(\alpha, \mu) = \frac{\pi r_0^2}{\sigma_1(Z, \alpha)} I(Z, \nu) \left(\frac{\alpha'}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{\alpha}{\alpha'} + \frac{\alpha'}{\alpha} + \mu^2 - 1\right) \quad (3.28)$$

$\pi r_0^2 = 2494351$ ,  $\sigma_1(Z, \alpha)$  ve  $I(Z, \nu)$  değerleri veri bankasından alınır.

### 3.3.4.2 Koherent (Thomson) saçılması

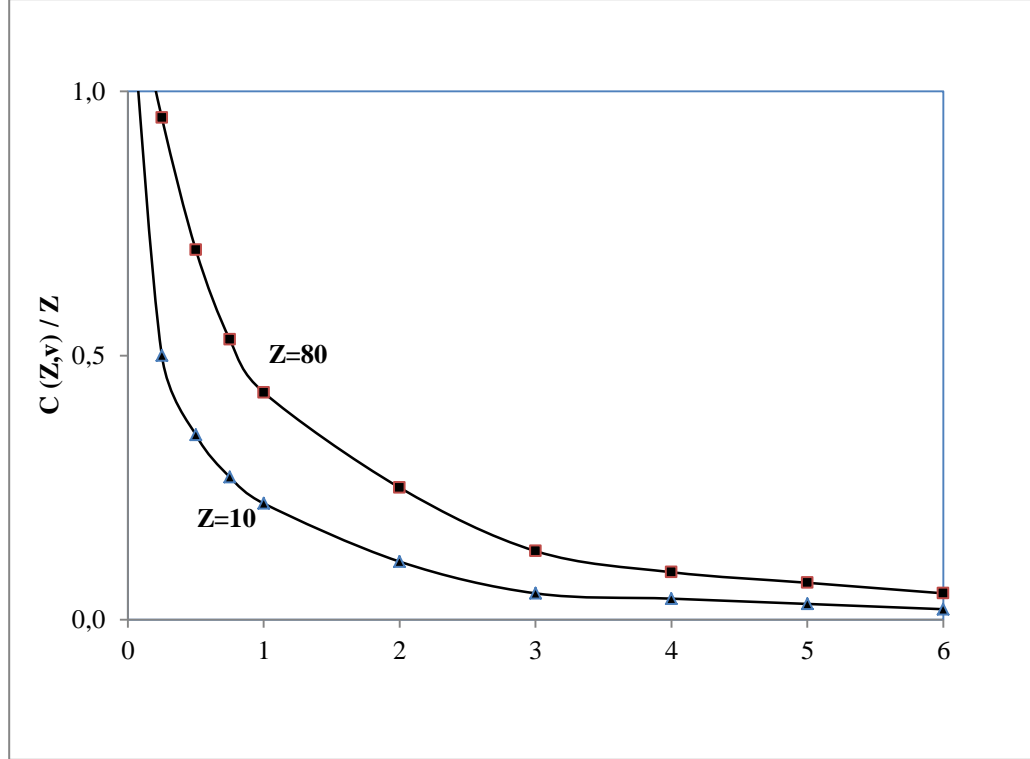
Düşük enerjili foton etkileşmelerinde göz önünde bulundurulmuş koherent saçılma yüksek enerjili foton etkileşmelerinde ihmal edilebilmektedir. Gelen foton bütün atomla birden etkileşerek saçılmaya uğrar. Saçılma sırasında atoma sabitlenmiş gibi duran çok sıkı bağlı elektronlarla fotonun etkileşmesiyle gerçekleşir. Gelen foton elektronu atomdan sökemez fakat momentumunun bir kısmını atoma aktararak, enerjisini değiştirmeden hareket doğrultusunu değiştirir.

Thomson saçılması kayıp olmayan enerjiyi içerir ve sadece fotonlar işlenir. Taşınımından üretilen elektronlar ve TTB yaklaşımı kullanılmaz. Sadece  $\theta$  saçılma açısı hesaplanır ve sonra foton taşınımı devam eder.

Diferansiyel tesir kesiti  $\sigma_2(Z, \alpha, \mu)d\mu = C^2(Z, \nu)T(\mu)d\mu$ , dir.  $C(Z, \nu)$  ise enerjiye bağlı Thomson tesir kesiti  $T(\mu) = \pi r_0^2(1 + \mu^2)d\mu$  olan değişmiş form faktörüdür.

$C^2(Z, \nu)/Z^2$  genel etkisi yüksek E ve düşük Z için Thomson tesir kesiti çok aşırı bir şekilde geri saçılmada azalış gösterir. Bu etki inkoherent (Compton) saçılmasında  $K(\alpha, \mu)$  üzerine  $I(Z, \nu)/Z$ 'nin etkisine göre zıttır. Verilen bir Z için

$C(Z, \nu) / C(Z, 0) = Z$  den  $C(Z, \infty) = 0$ 'a artış gösterir. Örneğin,  $C(Z, \nu)$   $\mu$  fonksiyonu ile hızla azalır.  $\mu (+1 -1)$  aralığındadır. Bu yüzden, koherent tesir kesiti ilerleme yönünde zayıflamıştır. Yüksek enerjilerde gelen foton, koherent saçılma için güçlüdür ve ihmal edilebilir. Parametre  $\nu$  ters uzunluktur  $\nu = \sin(\theta/2)/\lambda = \kappa\alpha \sqrt{1-\mu}$ .  $\kappa = 10^{-8} m_0 c / (h \nu^2) = 29.1445 \text{ cm}^{-1}$ . Maksimum  $\nu$  değeri  $\mu = -1$ 'de.  $\nu_{\max} = \kappa\alpha \sqrt{2} = 41.2166\alpha$ . Maksimum değer in karesi  $\nu_{\max}^2 = 16.98.8038\alpha^2$  dir.  $C(Z, \nu)$ 'nin nitel özellikleri Şekil. 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9.  $C(Z, \nu)$ 'nin nitel özellikleri.

Sonraki olay tahminçileri için, olasılık yoğunluk fonksiyonu  $\mu$  için  $p(\mu) = \pi r_0^2 (1 + \mu^2) C^2(Z, \nu) / \sigma_2(Z, \alpha)$  değerlendirmelidir.  $\sigma_2(Z, \alpha)$  integre edilmiş koherent tesir kesitidir.

Yüksek enerjilerde, koherent saçılma aslında enerji kayıpsız ileri doğrudur. Böylece, bir bakış açısı ile saçılmanın gerçekleşmediği bir taşınım gibi görünür.

### 3.3.4.3 Fotoelektrik etki

E enerjili gelen fotonun soğurulması ile beraber izleyen birçok floresans fotonlarının salınımını, bağlı enerjili orbital elektronunun çıkarma (veya uyarma) elektrona verilen kinetik enerjiyi içerir. Sıfır, bir veya iki floresans foton salınır.

(1) 1.0 keV'den büyük fotonlar salınır. Bu olayda, kademeli elektronlar düşük enerjili fotonlar (Auger etkisi) ve fotoelektrik çıkarmadan üretilen elektronların boşalttığı orbital boşluğunu doldurur. Bu parçacıklar Mode P E problemlerinde izlenebilir. Olmayan fotonlar floresans tarafından salınır, foton izi sonlandırılır. Bu fotonun fotoelektrik yakalaması, çıkış dosyasının özet çizelgesinde analog yakalama gibi skora yansır.

(2) Enerjisi 1.0 keV'den daha büyük bir floresans foton salınır. Foton enerjisi gelen E enerjili fotondan farklıdır, E-e çıkan elektronun kinetik enerjisinden küçük, en sonunda daha fazla Auger işleminden harcanmış kalan uyarma enerjisinden düşüktür. Bu düşük enerjili foton veya elektronların ilavesine yol açar. Çıkarma elektronu ve herhangi bir Auger elektronları TTB yaklaşımıyla işlenebilir veya taşınabilir. Genelde,

$$E' = E - (E - e) - e' = e - e' \quad (3.29)$$

Bu birincil işlemler  $e'$  olası bütün üst seviyelerden tam floresans verim almak için yapılır, fakat X-ışınları hattı boyunca  $K \alpha_1$ , ( $L_3 \rightarrow K$ );  $K \alpha_2$ , ( $L_2 \rightarrow K$ );  $K\beta'_1$ , ( $M \rightarrow K$ ); ve  $k \beta'_2$ , ( $N \rightarrow K$ ) paylaşılır.

(3) İki floresans foton eğer işlem (2)'den kalan uyarılan 1.0 keV'i aştığında içerebilir.  $e''$  bağlı enerjili elektron,  $e'$  bağlı enerjili orbitali  $E'' = e' - e''$  enerjili ikinci bir floresans fotonu salınımı ile doldurabilir. Daha önce olduğu gibi, kalan uyarılma daha çok Auger olayları tarafından harcanır ve elektron üretimi TTB model yaklaşımıyla Mode P E hesaplamalarında elektron taşınımı ile modellenabilir veya bütün enerjinin yerel olarak depolandığı varsayılır. Bütün bu ikincil işlemler bütün kabuklar üstünden gelir ve L kabuğuna gelir. Böylece, birincil işlemler bir L kabuk boşluğunu bırakmak için  $K\alpha_1$  veya  $K\alpha_2$  olabilir.

Her bir floresans fotonun ( $E'' > 1$  keV) izotropik olarak salındığı varsayılır ve taşınır. Bağlanma enerjileri  $e$ ,  $e'$  ve  $e''$ , X-ışını soğurma kenarına çok yakındır. Çünkü X-ışını soğurma tesir kesiti ani bir sıçrama ile olur. Olası elektron enerjisini çıkarma veya uyarma ilk olarak  $E \cong e''$ , sonra  $e'$ , daha sonra  $e$ , enerjiler olacak şekilde olur. Sıçrama 20 faktör kadar olabilir (örneğin, K-karbon).

Fotoelektrik olay  $Z < 12$  elementler için son duraktır. Çünkü olası floresans enerji 1.0 keV'in altındadır. Olay  $31 > Z \geq 12$ 'de 1.0 keV üzeri sadece tek bir floresans enerji içindir. Fakat her biri 1.0 keV'lik iki floresans  $Z \geq 31$  için olasıdır.  $Z \geq 31$  için  $K\alpha_1$ ,  $K\alpha_2$ , ve  $K\beta'_1$  birincil hatlar olasıdır ve gerçekte,  $Z \geq 37$  için  $K\beta'_2$  hattı olasıdır.

Bütün fotoelektrik durumlarında foton izi sonlandırılır. Çünkü ne salınmayan floresans fotonlar ne de salınmayan diğerleri kesme enerji altındadır, sonlandırma çıkış dosyası özet çizelgesinde analog yakalama tarafından olmak üzere dikkate alınmıştır.

#### 3.3.4.4 Cift oluşum

Bu işlem sadece çekirdek alanında dikkate alınır. Eşik  $2mc^2[1+(m/M)] \cong 1.022$  MeV'dir.  $M$  nükleer kütle,  $m$  elektron kütesidir. Üç durum söz konusudur:

(1) Elektron taşınım durumunda (Mode P E), elektron ve pozitron yaratılır, bankaya konur ve foton izi sonlandırılır.

(2) TTB yaklaşımıyla Mode P problemleri için, elektron ve pozitronun her ikisi üretilir fakat taşınmaz. Her iki parçacık TTB yaklaşım fotonlar yapılabilir. Eğer pozitron elektron enerji kesmesinin altında ise yaratılmaz ve bir foton çifti durum (3) gibi yaratılır.

(3) Mode P problemleri olduğunda pozitronlar TTB yaklaşımıyla yaratılamaz, gelen foton enerjisi  $E$  kaybolur. Varsayılan  $E - 2mc^2$ , yaratılan pozitron-elektron çiftinin kinetik enerjisi çarpışma noktasında yerel olarak depo edilir. Pozitron çarpışma noktasında bir elektron ile beraber imha edilmiş olduğu kabul edilir. Sonuçlanan bir çift fotonun her biri gelen foton ağırlığındadır ve her birinin enerjisi  $mc^2 = 0.511$  MeV'dir. Birinci foton

izotropik olarak yayılır, ikincisi de zıt yönde yayılır. Çok nadir olarak 1.022 MeV yokolma (anihilasyon) fotonu ihmal edilir.

### **3.3.4.5 Elektron etkileşimleri**

Elektronların taşınımı esas olarak fotonlardan farklıdır. Yüksüz parçacıkların etkileşimi çarpışmalar arasında basit serbest uçuş ile bağlı seyrek çarpışmalar olarak karakterize edilir. Bunun aksine, elektronların taşınımı küçük etkileşimlerin büyük sayıları neticesinde, uzun-aralıkta Coulomb kuvvetiyle baskındır. Bir nötron alüminyumda 0.5 MeV'den 0.0625 MeV'e düşünceye kadar 30 çarpışma yaparken, aynı şartlarda bir foton on adetten daha az sayıda deneyecektir. Bir elektron aynı enerji kaybını gerçekleştirirken,  $10^5$  yaklaşık bireysel çarpışmaya maruz kalacaktır. Bu büyük artış karışık hesaplamalarda pratik olarak ilgilenilen çoğu durum için tekli-çarpışma Monte Carlo yaklaşımı ile elektron taşınımını olanaksız yapar.

Dikkate alınan teorik çalışmalarda yüklü parçacıkların taşınımı için, analitik çeşitlilik gelişmesi ve yarı analitik çoklu-saçılma teorileri kullanılır. Bu teoriler temel tesir kesitlerini ve açısal sapma enerji kaybı gibi önemli nicelikler için olasılık dağılımlarını tahmin etmek için taşınım işleminin istatistiksel doğasını kullanmaya teşebbüs eder. MCNP'de bu teoriler için algoritmaların en önemlileri, açısal sapma için Goudsmit and Saunderson (1940) teorisi, Landau (1944) enerji kayıp dalgalanmaları teorisi ve Landau teorisinin Blunck and Leisegang (1950) iyileştirmeleridir. Bu teoriler çeşitli yaklaşımlarla güven verirken kısıtlamalar uygulanabilirliği kısıtlar ki bütün taşınım problemleri çözüme kavuşamaz.

Bir elektron üzerinden önemli enerji kaybını takip etmek için, birçok adımda elektronun yolunu sonlandırmak gerekecektir. Bu adımlar birçok çarpışmayı kapsayacak (çoklu çarpışma teorilerinin geçerli olduğu durumlar) yeterli uzunlukta olacak şekilde seçilir. Fakat herhangi bir küçük adımda ortalama enerji kaybı yeterli kısalıkta olabilir. Her bir adım esnasında elektronun açısal sapması ve enerji kaybı çoklu-saçılma teorileri yaklaşımına göre olasılık dağılımlarından örneklendirilebilir. Bu tekli adımları içeren birçok ferdi çarpışmaların etkisini içermesi Monte Carlo yönteminde “yoğunlaştırılmış nesil” oluşturulan olasılıksal örneklendirilmedir.

### 3.3.4.5 Bremsstrahlung

e11 (Elektron Kütüphanesi) değerlendirmesinde, bremsstrahlung fotonlarının örneklendirilmesi için, MCNP öncelikle Bethe and Heitler (1934) Born yaklaşım sonuçlarına dayanır. Monte Carlo hesaplamalarına uygun özel çözümler Berger and Seltzer (1970) tarafından geliştirilmiştir.

e103 değerlendirmesinde, enerji spektrumu ve bremsstrahlung fotonları için tesir kesiti üretimi Seltzer (1988), Seltzer and Berger (1985, 1986) değerlendirmelerinden alınmıştır. Değerlendirmelerde 2.0 MeV-50.0 MeV arası elektronlar için elektron-çekirdek bremsstrahlung tesir kesitinin ayrıntılı hesaplamaları kullanılmıştır. 2.0 MeV'in altındaki değerlendirmelerde Pratt et al. (1981, 1971, 1974) sonuçları kullanılmıştır. 50.0 MeV ve üzeri enerjiler için, Davies et al. (1955) analitik teorisi kullanılmış ve Elwert (1939) tarafından oluşturulan düzeltme faktörleri ile Jabbur and Pratt (1963, 1964) tarafından verilen limit ve uç bölge yüksek frekans teorisi ile desteklenmiştir.

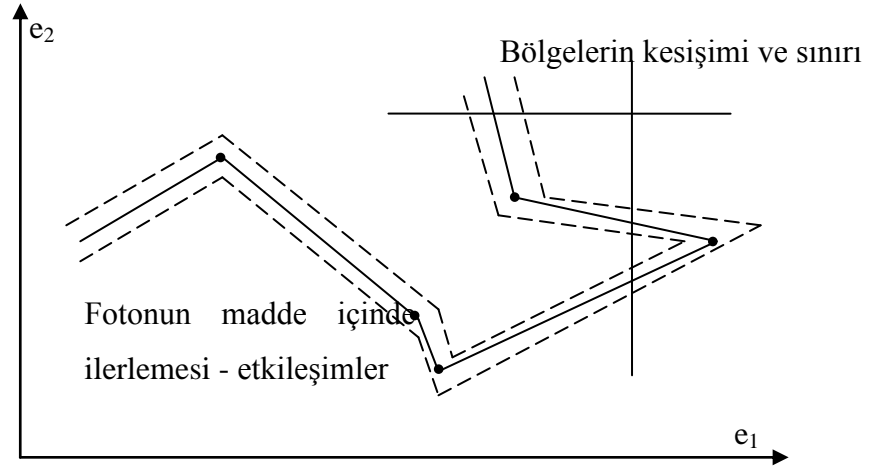
Bremsstrahlung fotonları için enerji spektrumu değerlendirmede sağlanır. MCNP bremsstrahlung fotonlarının örneklendirmesini her bir elektronun alt adımında adreslendirir. Çizelge üretim olasılıkları bremsstrahlung fotonlarının yaratılıp yaratılmadığını belirlemede kullanılır. e103 değerlendirmesinde, bremsstrahlung üretimi adım boyunca Poisson dağılımına göre örneklendirilir ve böylece, hiçbir foton, bir foton veya daha fazla foton üretilmiş olur. E11 değerlendirmesi bütün bremsstrahlung fotonlarını alt adımda sağlar. Eğer bir foton yaratılırsa, yeni foton enerjisi enerji dağılım çizelgelerinden örneklendirilir.



#### 4. MATERYAL VE METOD

TLD'ler ile yapılan deneysel çalışmalarda yeterli veri üretilememesi nedeni ile bu çalışmada simülasyon ile Monte Carlo hesaplama yöntemi kullanılarak dozimetri için kullanılan bazı TL malzemelerin fotonlar için enerjiye bağlı dedektör cevapları incelenmiştir.

Çalışmada MCNP-4C2 simülasyon programları kullanıldı. Simülasyonda noktasal kaynaklardan yayınlanan fotonlarla tasarımları yapılan TLD kaynaklar ışınıldı. Simülasyonlarda ikincil parçacık olarak oluşan elektronlar da hesaba katılmışlardır. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, madde içerisinde ilerleyen foton yolu boyunca çok kısa mesafelerde etkileşimlerde bulunduğu için elektronlar açığa çıkmaktadır. Kesikli çizgiler ikincil elektronların oluşabileceği alanı göstermektedir (Camgöz, 2008).



Şekil 4.1. Fotonun madde içerisinde etkileşimler arası olası yolunun gösterimi (Camgöz, 2008).

##### 4.1 Dedektör Cevabı

Analizlerin amacı, bazı dedektör türlerinin tüm yüzey üzerinden integre edilen parçacık akımını, bir yüzey üzerinden ortalama akıyı, hücre üzerinden ortalama akıyı, her bir hücrede biriken enerjinin cevaplarını tahmin etmektir. Bu yüzden alan bilgisi dedektör cevaplarına dönüştürülebilmelidir. Dedektör cevabının sembolünü  $R$  ile gösterelim. Buradan hareketle  $\mathfrak{R}$  sembolü ile ifade

ettiğimiz *dedektör cevap fonksiyonu* olmak üzere, dedektör cevabını veren eşitlik;

$$R = \int_0^\infty \int_{4\pi} \int_{V_d} \mathfrak{R}(r_d, E, \Omega) \phi(r_d, E, \Omega) dV d\Omega dE \quad (4.1)$$

dir. Burada  $\phi$  akı yoğunluğunu ifade eder. Hacim, dedektörün hacmi  $V_d$  üzerinden integrale edilerek bulunur.  $\mathfrak{R}(r_d, E, \Omega)$ , birim yol uzunluğu başına  $r_d$  noktasında,  $\Omega$  yönünde E enerji ile seyahat eden bir parçacığın sebep olduğu beklenen dedektör cevabının fiziksel bir bakış noktası olarak görülebilir. Genelde, dedektör cevap fonksiyonunun açık gösterimi dedektörün yönü, hacminin büyüklüğü gibi özelliklerden dolayı çok karmaşıklık gösterebilir. İdealize edilmiş dedektörler için cevap fonksiyonları şöylece gösterilebilir:

1.  $r_0$  konumunda,  $\Omega_0$  yönlü, demet halinde ışınımın olduğu nokta dedektör:

$$\mathfrak{R}(r_d, E, \Omega) = \mathfrak{R}(E) \delta(r_d - r_0) \delta(\Omega - \Omega_0) \quad (4.2)$$

2.  $r_0$  noktasında, nokta izotropik dedektör:

$$\mathfrak{R}(r_d, E, \Omega) = \mathfrak{R}(E) \delta(r_d - r_0) \quad (4.3)$$

3.  $r_0$  noktasında, enerjiden bağımsız nokta izotropik dedektör:

$$\mathfrak{R}(r_d, E, \Omega) = \mathfrak{R} \delta(r_d - r_0) \quad (4.4)$$

Eğer Eşitlik 4.3, Eşitlik 4.1 içine konulursa daha basit haliyle gösterimi şu hale gelir:

$$R(r_0) = \int_0^\infty \mathfrak{R}(E) \phi(r_0, E) dE \quad (4.5)$$

Dedektör cevabı, basit izotropik dedektör türleri için  $\mathfrak{R}=1$  durumunda akı-yoğunluk dedektörü,  $\mathfrak{R}(E)=E$  durumunda ise enerji akı yoğunluk dedektörü olarak kavramlaştırılabilir (Chilton et al., 1984).

Mutlak dedektör cevabı ifadesi

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda [\Delta D_{\text{med}} / \Delta D_{\text{det}}]_\lambda^{\text{MC}} \quad (4.6)$$

ile verilirse,  $\varepsilon_\lambda$  bağıl dedektör cevabını göstermektedir. Foton enerjisi ve dedektör geometrisinin bir fonksiyonu olarak mutlak dedektör cevabı  $\alpha_\lambda = R/D$  ( $\text{nC cGy}^{-1}$ ) birimine sahiptir. Bu değer;

$$\varepsilon_\lambda = [R_{\text{det}} / D_{\text{med}}]_\lambda^{\text{meas}} \quad (4.7)$$

ile verilir. Bu denklemde,  $\lambda$  kalibre edilmiş megavoltaj demetinde,  $D_{\text{med}}$  birim doz başına ölçülmüş bağıl dedektör cevabını vermektedir (Das et al., 1996).

**Cevap Fonksiyonu:** Dedektör hacminde ölçülen dozun (F6), dedektöre giren parçacık sayısına (F1) oranıdır.

**Bağıl Cevap Fonksiyonu:** Cevap Fonksiyonu değerinin 662.0 keV'lik fotonların değerine bölünmesidir. Hranitzky et al. (2006) MCNP kodu kullanarak yapmış oldukları simülasyon çalışmasında enerji cevabı 662.0 keV foton enerjisine normalize edilerek bulunmuştur.

#### 4.2 MCNP-4C2 Program Kodunun Temin Edilmesi ve Kurulumu

Monte Carlo hesaplamalarında kullanılacak olan MCNP-4C2 program kodu, Fransa'da bulunan NEA nükleer araştırma merkezinden temin edildi.

Linux işletim sisteminin kurulu olduğu, işlemcisi; Intel (R) Core (TM) i5 CPU M 520 @ 2.40GHz, 4,00 GB Yüklü Bellek (RAM), 64 bit işletim sistemi olan bir bilgisayarda, program kaynak kodu kullanılarak, "MCNP" isimli çalıştırılabilir program kodu derlendi. Programla birlikte gelen çeşitli test programları çalıştırılarak, derlenen "MCNP" kodunun doğru çalışıp çalışmadığı denetlendi. Yapılan test işlemleri sonucunda, elde edilen veriler, program üreticilerinin aynı giriş dosyalarını kullanarak elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma sonucunda test çalışmaları sırasında elde edilen değerlerin, programla birlikte gelen test sonuçlarıyla aynı değerleri verdiği ve "MCNP" program kodunun doğru olarak çalıştığı görüldü.

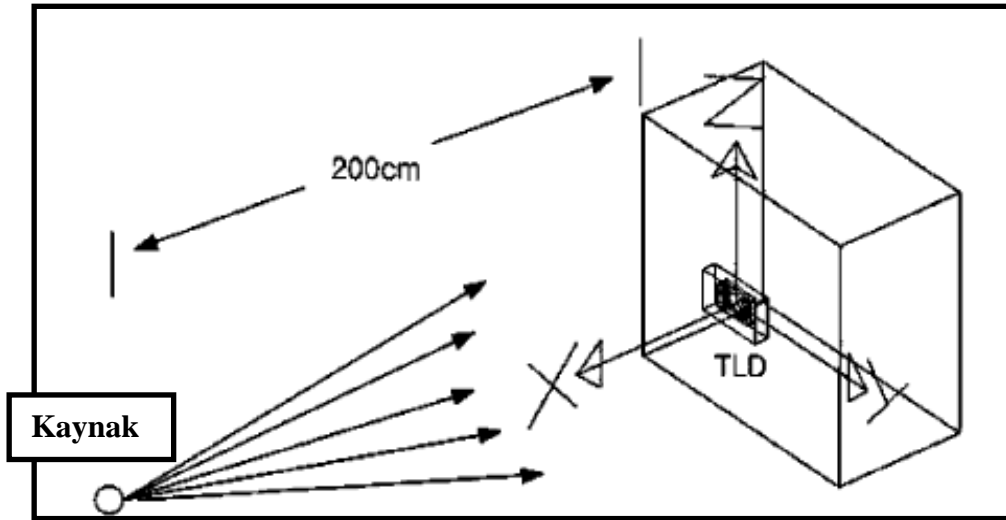
Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan MCNP-4C2 program kodu, daha sonra Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü ana bilgisayarına

kuruldu. Bu bilgisayarın kapasitesi oldukça yüksek olduğu için simülasyonlar için sorunsuzca çalışabilmektedir. Hazırlanmış olan giriş dosyalarının fazla nesil çalıştırılmasından dolayı uzun zaman gerekmektedir. Bu ana bilgisayara uzaktan erişim sağlanarak çok sayıda fotonun nesil işlemleri yapılmıştır. Simülasyonlar bu bilgisayarda çok büyük sayılar için gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.1 Simülasyon için kaynak-dozimetre geometrisinin hazırlanması

Bu çalışmada simülasyon için, radyasyon kaynağı ve dozimetrenin bulunduğu ortam hazırlanırken daha önce yapılmış olan çalışmalar da dikkate alınmıştır. Yapılmış olan çalışmalardan Jung et al. (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmanın şematik geometrik yapılandırılmasında kaynak-dozimetre arası uzaklık 2.0 m alınmıştır. Benzer olarak Hranitzky et al. (2006) yapmış oldukları çalışmada dedektörler ile kaynak arasındaki mesafe 2.5 metre alınmıştır. Obryk et al. (2008) göre, simülasyonlarda TL dozimetreler için duruma göre, kaynak-fantom arası mesafe 2.0, 2.5 m alınabilmektedir.

Jung et al. (2003) yapmış olduğu çalışmada dikkate aldıkları şematik geometrik yapılandırma Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada foton kaynağı ile dozimetre arasındaki uzaklık 1.0 cm ile 250.0 cm aralıklarında alınmıştır. Şekil 4.2’de gösterilen geometrik yapılandırma bu çalışmanın temelini oluşturmuştur.

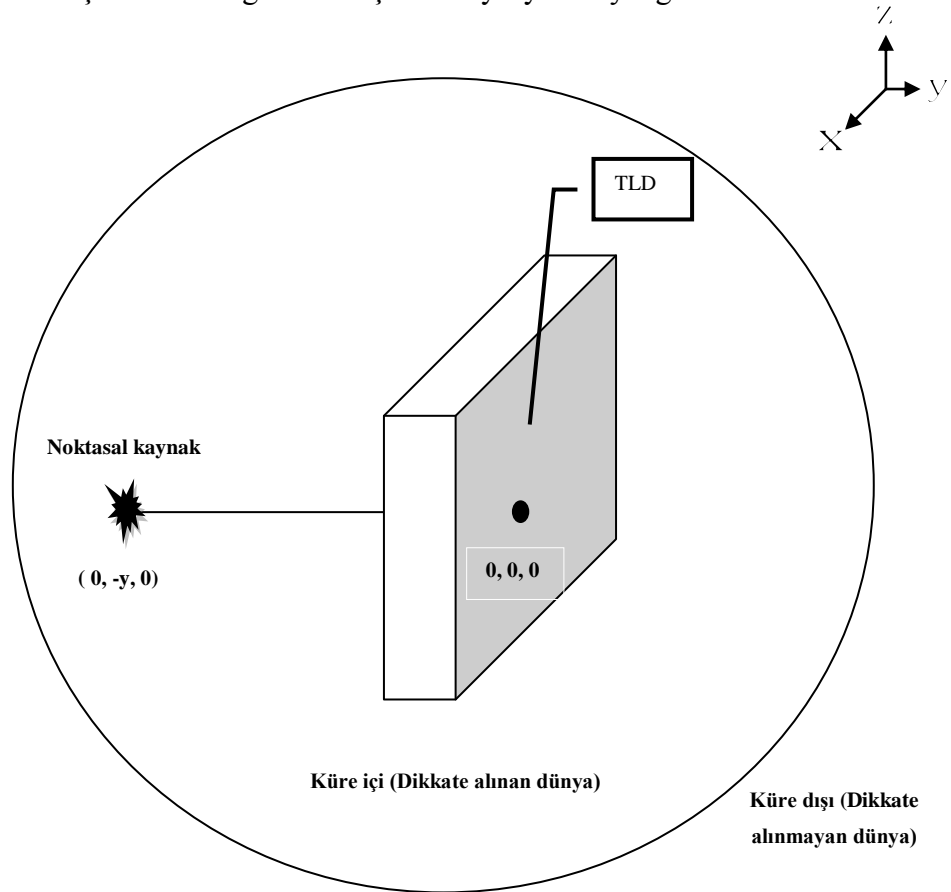


Şekil 4.2. Jung et al. (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmanın şematik geometrik yapılandırılması.

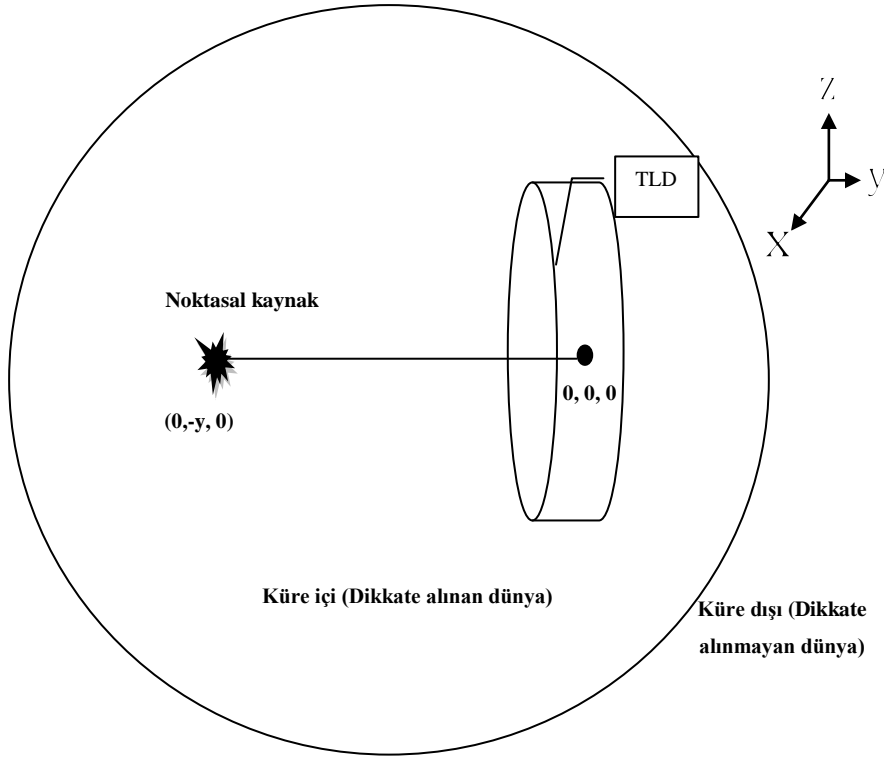
Bu çalışmanın temel öğelerinden dozimetrelerin geometrik şekli iki durumda modellenmiştir. Bu geometrik şekiller düzgün dikdörtgenler prizması ve düzgün silindirdir. Önceki yapılan çalışmalarda bu iki geometrik şekil sıklıkla kullanılmıştır. Das et al. (1996) yapmış oldukları bir çalışmada dikdörtgenler prizması şeklinde LiF TLD'ler kullanılmıştır. Becker et al. (2008) deneysel olarak dedektör cevabını  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  ile araştırırken kullandıkları dedektörün biçimi dikdörtgenler prizmasıdır.

Daros et al. (2001) yapmış oldukları çalışmada  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  TL dozimetrelerinin biçimi, Prokic'in (2002) deneysel olarak  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  ile yapmış olduğu çalışma için hazırlanan TL tabletin biçimi, Jung et al. (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmada kullandıkları TL dozimetresinin şekli, Hranitzky et al. (2006) Monte Carlo simülasyon yöntemiyle yapmış oldukları çalışmada TLD'lerin geometrik biçimi silindirdir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyon işlemlerinde, modellenen geometrik biçimli dikdörtgenler prizması TLD'ler Şekil 4.3'de, silindir biçimli TLD'ler Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Radyasyon kaynağı ise noktasaldır.



Şekil 4.3. Dikdörtgenler prizması biçiminde TLD ve noktasal kaynağın gösterimi.



Şekil 4.4. Silindir biçiminde TLD ve noktasal kaynağın gösterimi.

Radyasyon kaynağı olarak düşünülen fotonların noktasal, izotropik olması durumu, MCNP kodu giriş dosyasında Şekil 4.5’de gösterildiği gibidir.

```

mode p e          $ problem türü foton ve elektron
sdef par 2        $ kaynak parçacık türü: foton
  pos 0.0 -1.0 0.0 $ tanecik kaynağının konumu
  erg 0.0143       $ kaynak taneciklerin enerjileri
c malzeme bileşimleri
c CaSO4
m1 20000 -0.2900 $ Ca_%
    8000 -0.4795 $ O_%
    16000 -0.2300 $ S_%
    66000 -0.0005 $ Dy_%
c hava
m2 6000 -0.000124 $ karbon_%0.001
    7000 -0.755268 $ azot_%76
    8000 -0.231781 $ oksijen_23
    9000 -0.012827 $ argon_0.1

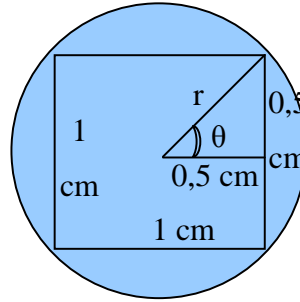
```

Şekil 4.5. Noktasal kaynağın konumunun giriş dosyasında gösterimi.

#### 4.2.2 Yönlü kaynak-dozimetre geometrisinde TLD ön yüzeyinin yarıçapının ve kaynak dozimetre arasındaki açının hesaplanması

Dozimetreye doğru yönlendirilmiş bir kaynak ele alınırsa geometri için bazı hesaplamaların yapılması gerekir. Örneğin dozimetrenin yüzey alanı 1.0 cm x 1.0 cm kabul edilir ve kaynak ile dozimetre arası uzaklık 10.0 cm alınırsa şu hesaplamalar yapılır: İlk önce dozimetre yüzeyinin yarıçapı r'nin hesabı aşağıda olduğu gibi hesaplanır (Şekil 4.6).

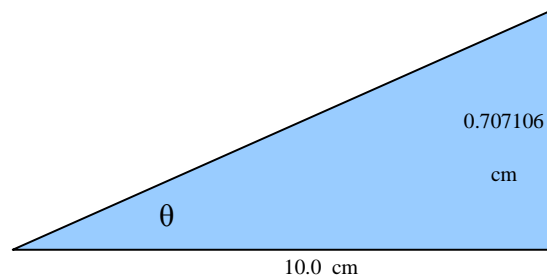
$$r^2 = 0.5^2 + 0.5^2 \quad r \geq 0,707106$$



Şekil 4.6. Yüzey için r'nin hesabı.

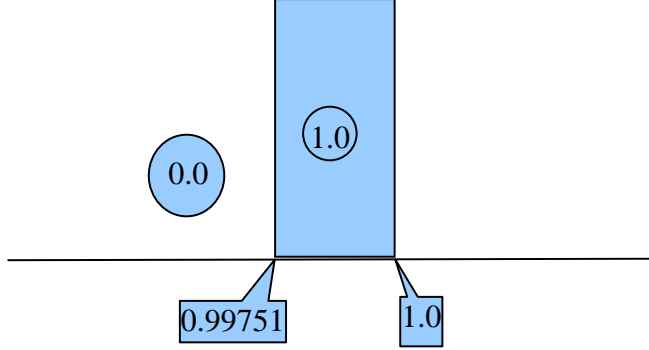
İkinci olarak, radyasyon kaynağı ve dozimetre arasındaki 10.0 cm uzaklık için kaynak ile dozimetre arasındaki açı hesaplanır (Şekil 4.7). Bu açının hesaplanmasında yukarıda bulunan r dikkate alınır.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{0,707106}{10} = 4,04469 \quad \text{Cos } \theta = 0,99750$$



Şekil 4.7. Yönlendirilmiş kaynak ve dozimetre malzemesi arasındaki açının hesabı.

Hesaplanan açının MCNP kodu giriş dosyasında yazımında kullanılan sayısal değerlerin gösterimi Şekil 4.8’de verilmiştir. Sonuç olarak bu hesaplamaların sonunda kaynaktan çıkan radyasyonun dozimetreye doğru yönlendirilmesinin giriş dosyasında ilgili yere yazımı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kaynaktan yayımlanan fotonların dikkate alındığı durumun sayısal gösterimi.

```

mode p e          $ problem turu foton ve elektron
sdef par 2        $ kaynak parçacık turu: foton
  pos 0.0 -10.0 0.0 $ tanecik kaynağının konumu
  vec 0.0 1.0 0.0  $ kaynak parçacıklarının dağılımı için referans vektör
  dir d1          $ referans vektör ile yapılacak uçuş açısının kosinüsü
  erg 0.002       $ kaynak taneciklerin enerjileri

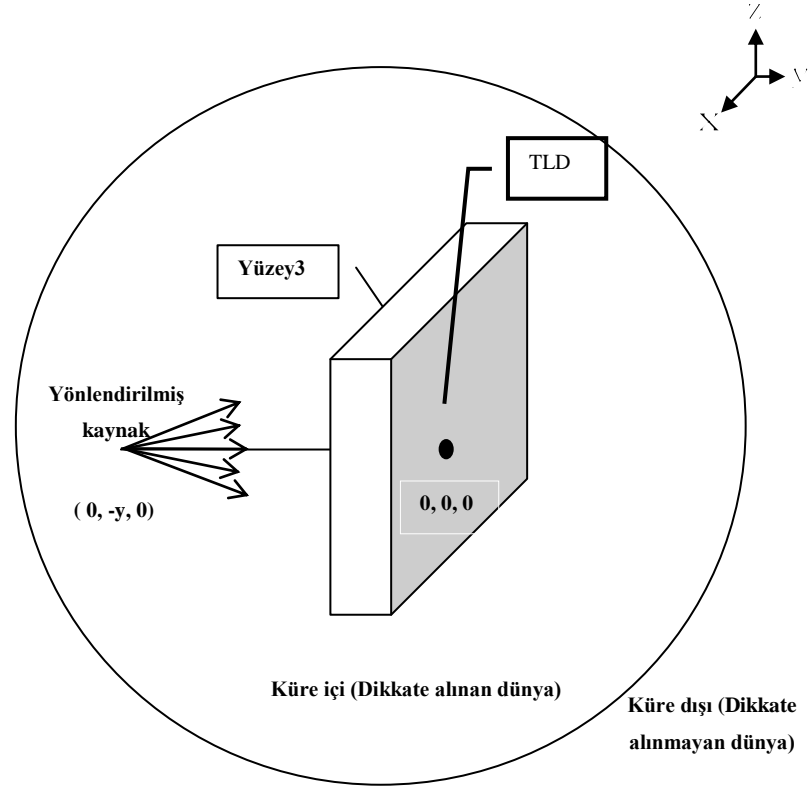
ç rad d1'e karşılık gelen dağıtık kaynak özelliği 1,29 derecelik bir konik
dağılımla parçacıkları üret

sil h 0.9997469711 1.0 $ 1,29 derecelik açının kosinüsü
sp1 d 0.0 1.0        $ olasılık %100 olsun

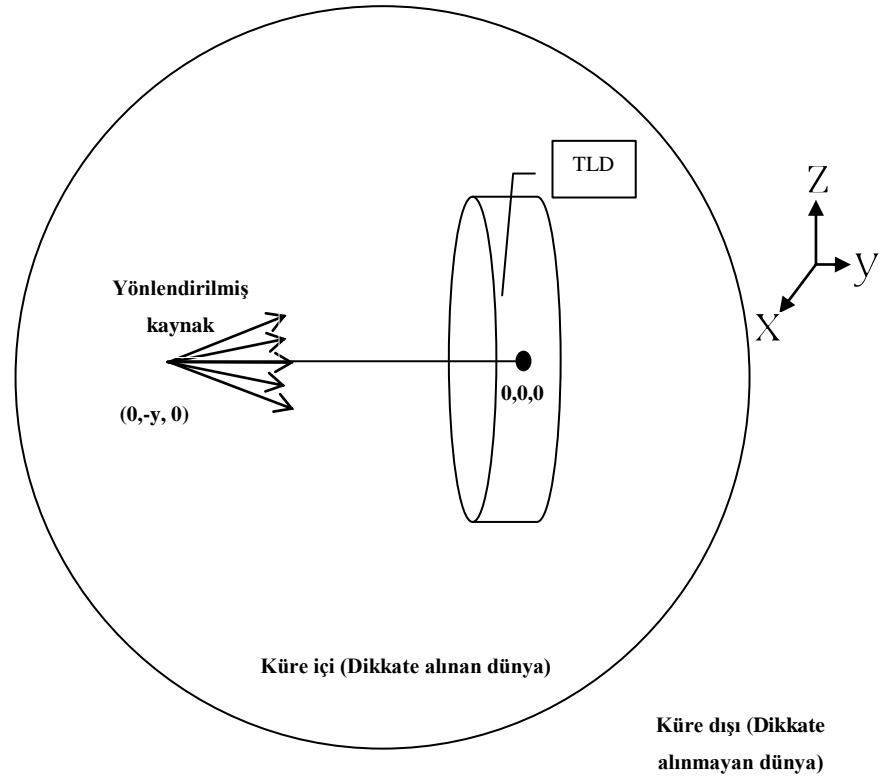
```

Şekil 4.9. Radyasyon kaynağının yönlü olması durumunun giriş dosyasında gösterimi.

Şekil 4.10 kaynağın yönlü olarak dikkate alındığı ve belirli bir uzaklıkta bulunan, dikdörtgenler prizması biçimli dedektörü göstermektedir. Bunun yanında, silindir biçiminde TLD ve yönlü kaynağın gösterimi Şekil 4.11’dedir.



Şekil 4.10. Dikdörtgenler prizması biçiminde TLD ve yönlü kaynağın gösterimi.



Şekil 4.11. Silindir biçiminde TLD ve yönlü kaynağın gösterimi.

### 4.2.3 Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan malzemeler ve yoğunlukları

Bu tez çalışmasında simülasyonu yapılan çeşitli TLD malzemelerin ve ortam malzemesi havanın kompozisyonu, yoğunluk ve atom numaraları Çizelge 4.1’de verilmiştir (Hubbell and Seltzer, 1995).

Çizelge 4.1. Monte Carlo Hesaplamalarında Kullanılan Malzemeler, Element Bileşimleri ve Yoğunlukları

Malzeme	Element	Element Bileşimi (%)	Yoğunluk ( g/cm <sup>3</sup> )
Hava	C	0.0124	1.205x10 <sup>-3</sup>
	N	75.5267	
	O	23.1781	
	Ar	1.2827	
LiF	Li	26.7585	2.635
	F	73.2414	
CaSO <sub>4</sub>	Ca	29.4385	2.960
	S	23.5534	
	O	47.0081	
CaF <sub>2</sub>	Ca	51.3328	3.180
	F	48.6672	
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Li	08.2081	2.440
	B	25.5715	
	O	66.2204	

MCNP programına ait giriş dosya yapısı ve formatı iyice belirlendikten sonra, yapılacak çalışmalarda kullanılacak esas veri yapısına, birer basamak olacak olan küçük giriş dosyaları hazırlanmıştır. Gerçek hesaplamalar

öncesinde yapılan birçok denemede, giriş dosyası içerisinde belirlenen, özellik gerektiren durumların detaylı bir şekilde modellenmesi yapılmıştır.

Gerçek hesaplamalar için hazırlanan modellemelerde, izotropik noktasal foton kaynağı ile dikdörtgenler prizması biçimindeki TLD'nin bulunduğu ortam Şekil 4.3'te görünen geometrik biçimde yapılandırılmıştır. Benzer şekilde, Şekil 4.4'de silindir biçiminde TLD ve noktasal kaynak; Şekil 4.8'de dikdörtgenler prizması biçiminde TLD ve yönlü kaynak; Şekil 4.9'da silindir biçiminde TLD ve yönlü kaynak için ortamın geometrik yapılandırılması tasarlanmıştır.

TLD malzemelerinin çeşitli fiziksel biçimleri dairesel tablet, kare şeklinde yonga, mikroküp, çubuk vb. ticari olarak sunulmaktadır.



## 5. BULGULAR

Bu çalışmada farklı aktivatörler ile katkılandırılmış LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> ve LiB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> TLD'lerin çeşitli enerjilerdeki fotonlara karşı cevap fonksiyonlarının belirlenmesi amacıyla simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçta bu dozimetreler için dozimetriye etki eden faktörler incelenmiş, her bir dedektör için, geometrilerinde ve yapılarında meydana gelebilecek olası değişimler modellenmiş ve doz hesaplamaları yapılmıştır. Bu çalışma ile bulunan veri değerleri, yapılmış olan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca simülasyon çalışmasında karşılaşılan durumlar incelenerek yorumları yapılmıştır.

### 5.1 Nesil Sayısı-Program Çalışma Süresi Arasındaki İlişki

Simülasyonlarda çalışılan nesil sayısı ile program çalışma süresi arasındaki örnek bir ilişki Çizelge 5.1'de verilmiştir. Buradaki değerler, CaF<sub>2</sub> içindir. Radyasyon kaynağı ile dozimetre arasındaki uzaklık 100.0 cm'dir. Kaynaktan çıkan fotonların enerjileri 16.0 keV ve konik olarak dozimetreye doğru yönlendirilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere ne kadar çok parçacık ile çalışılır ise o oranda simülasyon hesaplama süresi artmaktadır. Bu, simülasyon çalışmaları için olumsuz durumdur.

Çizelge 5.1. Simülasyon hesaplamalarında kullanılan nesil sayısı ve program çalışma süresi arasındaki ilişki.

Nesil Sayısı	Simülasyon Hesaplama süresi (dakika)
1.000	0,002
10.000	0,010
100.000	0,070
1.000.000	0,640
10.000.000	6,410
100.000.000	63,360
1.000.000.000	610,740

### 5.1.1 Nesil sayısı-program çalışma süresi arasındaki ilişkinin noktasal ve yönlü kaynak farkı

Noktasal bir kaynak ile yönlendirilmiş bir kaynağın program çalışma süresine etkisi Çizelge 5.2’de verilmiştir. Elde edilen bulgular yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8 \times 10^{-2}$  cm, yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetre hacmi  $1,27 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup> ve % 25.400 Li, % 72.500 F, % 0.021 Mg, % 0.005 Cu, % 0.092 Na, % 0.092 Si elementlerinden oluşan TLD içindir. Radyasyon kaynağı ile dozimetre arası uzaklık 100.0 cm, kaynaktan çıkan fotonların enerjisi 19.4 keV’dir.

Çizelge 5.2. Nesil sayısı ve program çalışma süresi arasındaki ilişki.

Kaynak	Nesil Sayısı	Program çalışma süresi (dakika)	F1 (İlk yüzeyi geçen ortalama parçacık sayısı)	Bağlı Hata (%)
Yönlü	$1 \times 10^5$	0,10	$0,93 \cdot 10^{+00}$	0,10
Noktasal	$1 \times 10^7$	1,56	$6,00 \cdot 10^{-07}$	40,82
Noktasal	$1 \times 10^8$	15,31	$1,16 \cdot 10^{-06}$	9,28
Noktasal	$1 \times 10^9$	151,41	$2,30 \cdot 10^{-06}$	1,87
Noktasal	$2 \times 10^9$	319,48	$4,80 \cdot 10^{-06}$	0,87

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere yönlü ve noktasal kaynakların verilerinde önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Yönlü kaynak noktasal kaynak ile karşılaştırıldığında, yönlü kaynağın kullanıldığı durumda program çalışma süresi daha az olmakla beraber bağlı hatanın da nokta kaynak kullanılması durumundan daha düşük olduğu görülmektedir.

## 5.2 Nesil Sayısı ve Dozimetreye Ulaşan İlk Yüzeyi Geçen Parçacık Sayısı Arasındaki İlişki

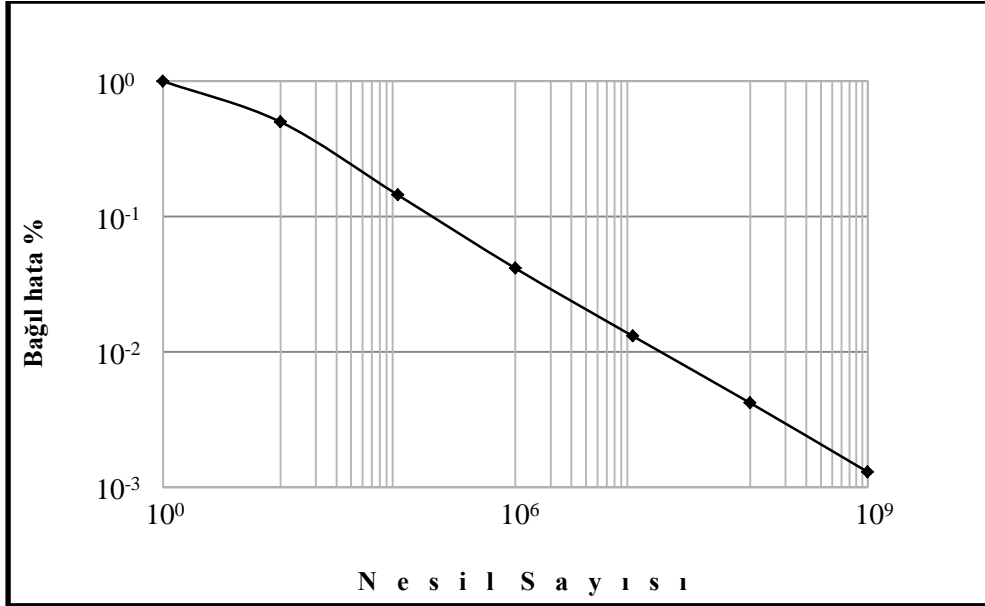
Bu çalışmada kullanılan MCNP kodunda F1 veri çetelesi ile dozimetrenin ilk yüzeyini geçen taneciklerin sayısı belirlenebilmektedir. Bağlı dedektör cevabının bulunmasında, dozimetrenin ilk yüzeyine ulaşan tanecik sayısı dikkate alınmıştır. Bununla ilgili sayısal veriler Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere, nesil sayısı  $1 \times 10^{+3}$ -  $1 \times 10^{+6}$  aralığında, yüzeyi geçen parçacık sayısının nesil sayısına oranı artış göstermektedir. Nesil sayısının daha da artmış olmasına rağmen yüzeyi geçen parçacık sayısının nesil sayısına oranı yatay bir seyir izlemektedir.

Çizelge 5.3. Nesil sayısı ve dozimetreye ulaşan ve ilk yüzeyi geçen parçacık sayısı arasındaki ilişki.

Nesil Sayısı	Yüzeyi geçen parçacık sayısı / Nesil sayısı (%)
1 000	$1,00.10^{-03}$
10 000	$4,00.10^{-04}$
100 000	$4,80.10^{-04}$
1 000 000	$5,86.10^{-04}$
10 000 000	$5,85.10^{-04}$
100 000 000	$5,76.10^{-04}$
1 000 000 000	$5,78.10^{-04}$

## 5.3 Nesil Sayısı ve Dozimetrede Yüzeyi Geçen Parçacık Sayısı İçin Nesil Sayısı ile Bağlı Hata İlişkisi

Kaynaktan çıkan taneciklerin dozimetre yüzeyini geçmeleri sırasında hesaplanan bağlı hatanın değeri önemlidir. Nesil sayısı ile bağlı hata grafik gösterimi Şekil 5.1'dir. Bağlı hata değerinin düşük olması istenilen bir durumdur (Çizelge 3.3). Nesil sayısının artması bağlı hatanın da düşük değerlere ulaşmasına olumlu katkı yapmaktadır (Şekil 5.1).



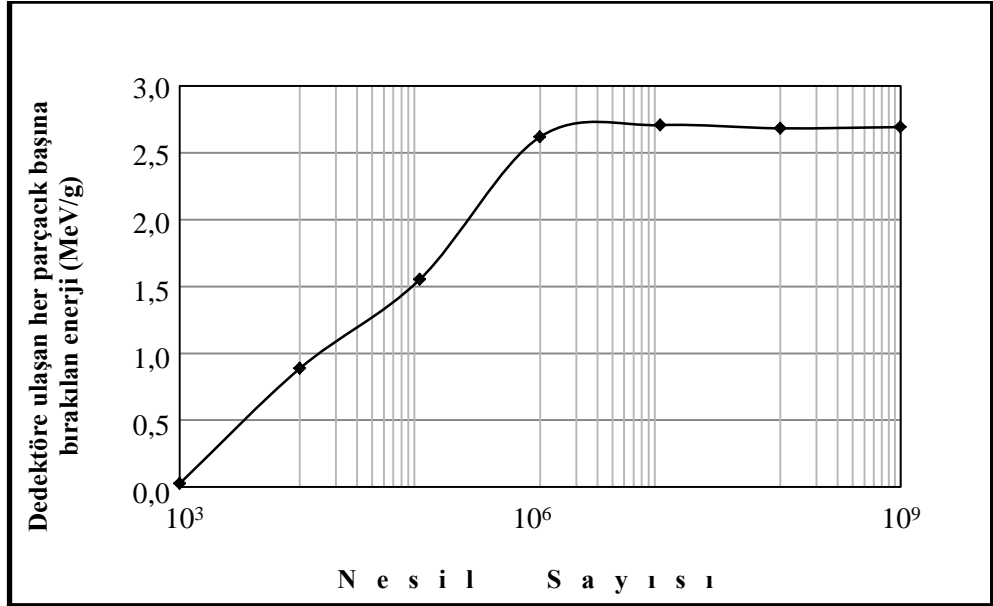
Şekil 5.1. Nesil sayısı ve dozimetrede yüzeyi geçen parçacık sayısı için, Nesil sayısı ile Bağlı Hata arasındaki grafik gösterimi.

#### 5.4 Dozimetreye Ulaşan Her Parçacık Başına Bırakılan Enerji ve Nesil Sayısı Arasındaki Sayısal Değer İlişkisi

Dozimetreye ulaşan her parçacık başına bırakılan enerjinin hesaplanabilmesi için MCNP kodunda F6 veri çetelesi bulunmaktadır. Dozimetreye ulaşan her bir parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayısı arasındaki sayısal değerlerin karşılaştırılması ile elde edilen grafiksel gösterim Şekil 5.2'dedir.

Buradaki değerler, boyutları 0,32x0,32x0,1 cm<sup>3</sup> olan dikdörtgenler prizması biçimindeki CaF<sub>2</sub> dozimetresi içindir. Dozimetrenin hacmi 1,024x10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>, kütlesi 3.26x10<sup>-2</sup> gramdır. Radyasyon kaynağı ile dozimetre arasındaki uzaklık 100.0 cm'dir. Kaynaktan çıkan fotonların enerjileri 16.0 keV ve konik olarak dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

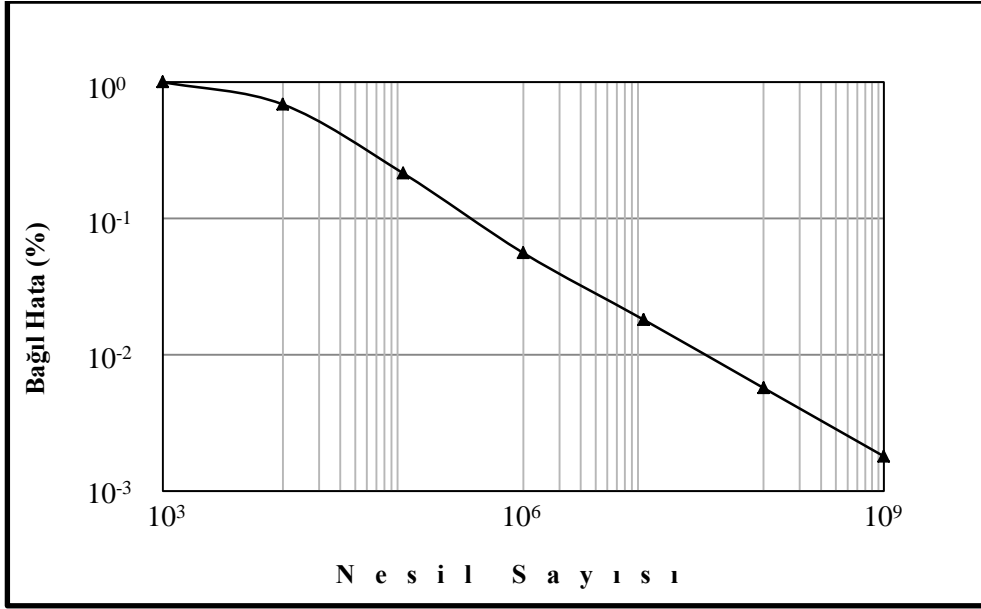
Dozimetreye ulaşan her bir parçacık başına bırakılan enerji 1.0x10<sup>+6</sup> nesil sayısına kadar artış göstererek maksimum değere ulaşmakla beraber nesil sayısının daha da artmasına karşın dozimetreye bırakılan enerji miktarının sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Dozimetreye ulaşan her parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayıları arasındaki grafik gösterimi.

### 5.5 Dozimetreye Ulaşan Her Parçacık Başına Bırakılan Enerji İçin Nesil Sayısı ve Bağlı Hata Arasındaki İlişki

Dozimetreye ulaşan her bir parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayısı için bağlı hata sayısal verilerinin grafik gösterimi Şekil 5.3'dedir. Dozimetreye ulaşan her bir parçacık başına dozimetreye bırakılan enerji için, nesil sayısının artması ile bağlı hata da azalış göstermektedir. Simülasyonlarda bağlı hatanın düşük olması çalışmaların güvenilirliğini arttırmaktadır (Çizelge 3.3).



Şekil 5.3. Dozimetreye ulaşan her parçacık başına bırakılan enerji ve nesil sayısı için, Nesil Sayısı ve Bağıl Hata arasındaki grafik gösterimi.

### 5.6 Kaynak İle Dozimetre Arasındaki Uzaklığın Bağıl TLD Cevaba Etkisi

Bu çalışmada LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> ve LiB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> TLD'lerinin kaynak ile dozimetre arası uzaklığın Bağıl TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Çizelge 5.4'de bu inceleme için seçilen uzaklıklar verilmiştir. Elde edilen verilerle hesaplanan, farklı enerjilerdeki fotonlar için Bağıl TLD Cevabını gösteren grafikler, ayrıntılı olarak Bölüm 5.10.1; 5.11.1; 5.12.1 ve 5.13.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. TL dozimetreler ve kaynak arasındaki uzaklıklar.

<b>TLD ADI</b>	<b>UZAKLIKLAR (cm)</b>
LiF:Mg,Ti	1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0
LiF:Mg,Cu,P	1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0
LiF:Mg,Cu,Na,Si	1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0
CaSO <sub>4</sub> :Dy	1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 100.0
CaF <sub>2</sub> :Tm	1.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu,Ag,P	1.0, 2.0,3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu	1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu,In	1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0

### **5.7 TL Dozimetre Malzemelerindeki Aktivatörlerin Bağlı TLD Cevaba Etkisi**

LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub> ve LiB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> için aktivatör materyallerin Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Çizelge 5.5’de TL dozimetre malzemeleri ve karışımlardaki aktivatör malzemelerin yüzdeleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. TLD malzemeleri ve karışımlarındaki aktivatör oranları.

TLD	TLD KODU	MATERYAL BİLEŞENLER (%)					
		I	II	III	IV	V	VI
LiF	lif00	Li 27.00	F 73.00				
LiF: Mg,Ti	lif01	Li 25.40	F 72.50	Mg 0.82	Ti 1.28		
	lif02	Li 25.40	F 72.50	Mg 1.50	Ti 1.00		
	lif03	Li 24.50	F 71.50	Mg 2.00	Ti 2.00		
LiF: Mg,Cu,P	lif04	Li 25.40	F 72.50	Mg 0.52	Cu 0.36	P 1.22	
	lif05	Li 25.00	F 72.00	Mg 0.50	Cu 0.50	P 2.00	
	lif06	Li: 25.00	F 72.00	Mg 1.00	Cu 1.00	P 1.00	
	lif07	Li 24.00	F 70.00	Mg 2.00	Cu 2.00	P 2.00	

Çizelge 5.5. TLD malzemeleri ve karışımlarındaki aktivatör oranları (devam).

TLD	TLD KODU	MATERYAL BİLEŞENLER (%)					
		I	II	III	IV	V	VI
LiF: Mg,Cu, Na,Si	lif08	Li 25.40	F 72.50	Mg 0.21	Cu 0.05	Na 0.92	Si 0.92
	lif09	Li 25.00	F 72.00	Mg 0.50	Cu 0.05	Na 1.00	Si 1.00
	lif10	Li 25.00	F 72.00	Mg 1.00	Cu 1.00	Na 0.05	Si 0.05
	lif11	Li 25.00	F 71.00	Mg 1.00	Cu 1.00	Na 1.00	Si 1.00
CaSO <sub>4</sub> : Dy	cas01	Ca 28.00	O 45.00	S 22.00	Dy 5.00		
	cas02	Ca 27.00	O 42.00	S 21.00	Dy 10.00		
	cas03	Ca 29.00	O 47.00	S 23.00	Dy 1.00		
	cas04	Ca 30.00	O 46.00	S 23.00	Dy 1.00		
	cas05	Ca 29.00	O 45.00	S 25.00	Dy 1.00		

Çizelge 5.5. TLD malzemeleri ve karışımlarındaki aktivatör oranları (devam).

TLD	TLD KODU	MATERYAL BİLEŞENLER (%)					
		I	II	III	IV	V	VI
CaF <sub>2</sub> : Tm	caf01	Ca 40.00	F 40.00	Tm 20.00			
	caf02	Ca 45.00	F 40.00	Tm 15.00			
	caf03	Ca 45.00	F 45.00	Tm 10.00			
	caf04	Ca 49.00	F 45.00	Tm 06.00			
	caf05	Ca 49.00	F 49.00	Tm 02.00			
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> Cu,Ag,P	lib01	Li 8.00	B 26.00	O 66.00	Cu 0.03	Ag 0.03	P 0.80
	lib02	Li 8.00	B 26.00	O:66. 00	Cu: 0.01	Ag:0. 05	P:0.8 0
	lib03	Li 8.00	B 26.00	O 66.00	Cu 0.08	Ag 0.08	P 0.70
	lib04	Li 8.00	B 26.00	O 66.00	Cu 0.16	Ag 0.16	P 0.54
	lib05	Li 8.00	B 26.00	O 66.00	Cu 0.24	Ag 0.24	P 0.38
	lib06	Li 8.00	B 26.00	O 66.00	Cu 0.30	Ag 0.30	P 0.26

Çizelge 5.5. TLD malzemeleri ve karışımlarındaki aktivatör oranları (devam).

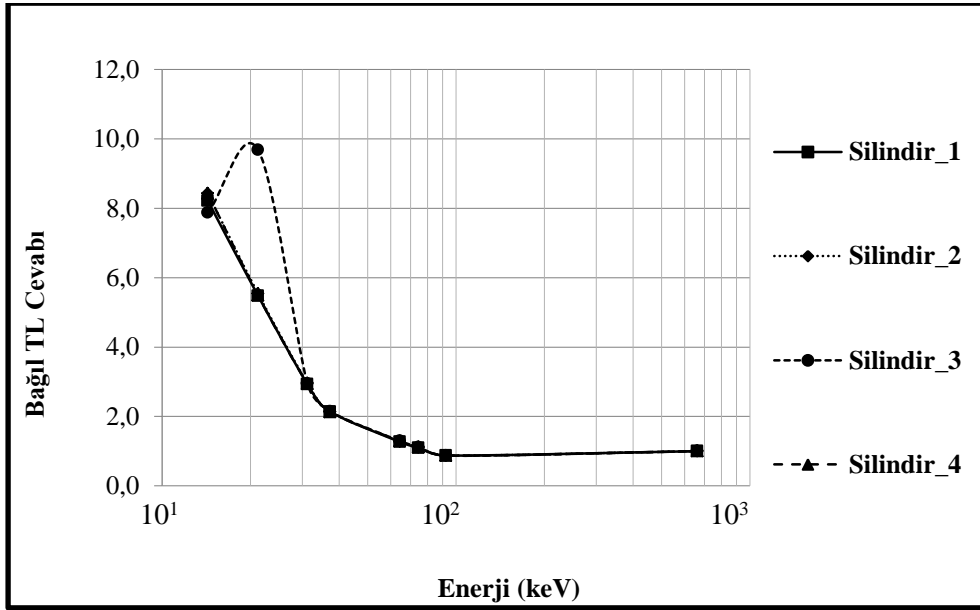
TLD	TLD KODU	MATERYAL BİLEŞENLER (%)					
		I	II	III	IV	V	VI
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Cu	lib07	Li	B	O	Cu		
		8.20	25.54	66.11	0.06		
	lib08	Li	B	O	Cu		
		8.22	25.56	66.13	0.09		
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Cu,In	lib09	Li	B	O	Cu		
		8.19	25.54	66.11	0.15		
	lib10	Li	B	O	Cu		
		8.04	25.39	65.96	0.60		
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Cu,In	lib11	Li	B	O	Cu	In	
		8.20	25.54	66.11	0.01	0.05	
	lib12	Li	B	O	Cu	In	
		8.22	25.35	66.13	0.05	0.25	
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Cu,In	lib13	Li	B	O	Cu	In	
		8.20	25.54	66.11	0.05	0.01	
	lib14	Li	B	O	Cu	In	
		8.22	25.35	66.13	0.25	0.05	

Dozimetrelerde kullanılan malzemelerin karışım oranlarının, farklı enerjilerdeki fotonlar için Bağlı TLD Cevabına etkisini gösteren grafikler, ayrıntılı olarak Bölüm 5.10.2; 5.11.2; 5.12.2 ve 5.13.2'de verilmiştir.

### 5.8 TL Dozimetre Malzemesinin Dilimlenmesi Yöntemiyle Elde Edilen Enerji Cevabı

CaSO<sub>4</sub> dozimetre malzemesinin dilimlenmesi ile yapılan simülasyonda, yarıçapı 3.0 mm, yüksekliği 0.8 mm geometriye sahip silindirik malzeme 0.2 mm'lik 4 eşit parçaya ayrıldı (Silindir1,2,3,4). Her bir parça arası uzaklık 0.1 mm olarak alındı. Elde edilen veriler ışığında her bir parçadaki fotonlar için TLD Cevabı Şekil 5.4'de görülmektedir.

CaSO<sub>4</sub> dozimetre malzemesinin dilimlenmesi ile yapılan bu simülasyonda 1, 2 ve 4. silindirlerin Bağlı TLD Cevaplarında belirgin bir paralellik olmasına karşın arada kalan 3. dilim farklılık göstermektedir (Şekil 5.4). Buradaki farklılık 2. ve 4. dilimlerden 3. dilime bir katkının olmasıdır. Yani 3. dilimde daha fazla enerji birikimi söz konusudur.



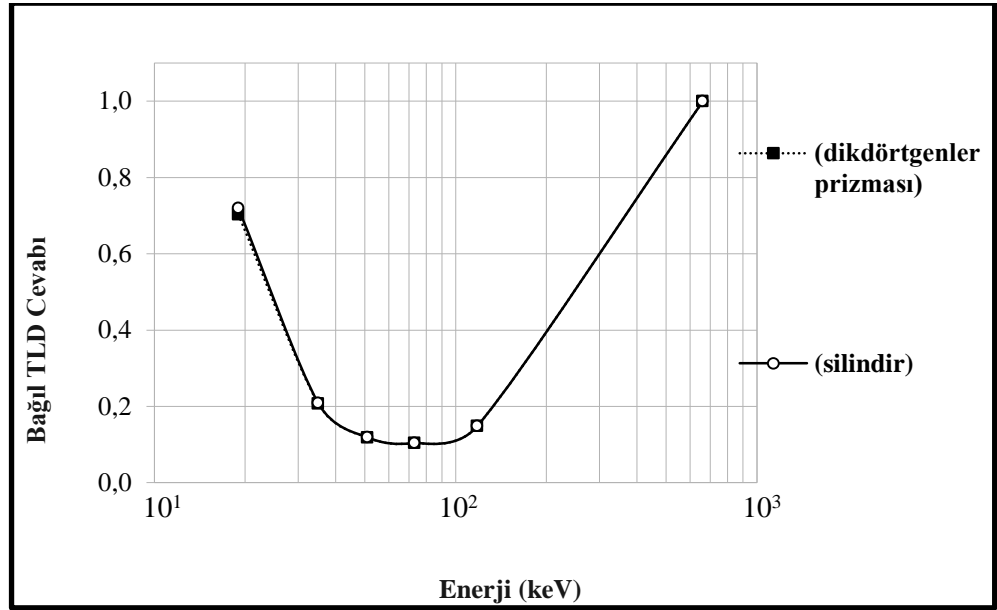
Şekil 5.4. Yarıçapı 3,0 mm, yüksekliği 0,2 mm'lik 4 eşit parçanın, fotonlar için Bağlı TLD Cevapları (Silindir\_1, Silindir\_2, Silindir\_3, Silindir\_4 ön yüzden arka yüze doğru her bir silindir dilimin isimleridir).

### 5.9 TLD Malzeme Geometrisinin Bağlı TLD Cevaba Etkisi

TLD malzemesinin geometrisinin, fotonlar için Bağlı TLD Cevabını bulmak amacıyla LiF kaynağı kullanılmıştır. Bunun için TLD malzemesi, dikdörtgenler prizması (Şekil 4.3) ve silindir (Şekil 4.4) şeklinde tasarlanıp, giriş dosyaları hazırlanarak, simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.9.1 Silindir ve dikdörtgenler prizması

Simülasyonlar için tasarım işlemleri yapılırken malzemelerin kütlesi ve dozimetreye ulaşan taneciklerin ilk karşılaştıkları yüzey alanı mümkün olduğunca eşit tutulmuştur. Sonuçta silindirin kütlesi  $3.35 \times 10^{-2}$  g, dikdörtgenler prizmasının kütlesi  $4.22 \times 10^{-2}$  g; taneciklerin ulaştıkları ilk yüzey alanı, silindir için  $1,59 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ ; dikdörtgenler prizması için  $1,6 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$ , kaynak TLD malzemesi arasındaki uzaklık 1.0 cm alındı. Fotonlar için Bağlı TLD cevabını gösteren grafik Şekil 5.5'dedir. Grafikte görüldüğü üzere, TLD malzemesinin geometrik şeklinin silindir ya da dikdörtgenler prizması biçiminde olması, Bağlı TLD Cevaba etkisinde bir farklılığa neden olmamaktadır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. LiF TL dozimetresi için silindirik ve dikdörtgenler prizması geometrilerinin Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.9.2 Silindir kalınlığı

LiF,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$  ve  $\text{LiB}_4\text{O}_7$  için dozimetre malzemesinin kalınlığının Bağlı TLD Cevabına olan etkisi araştırılmıştır. Çizelge 5.6'da bu malzemelerin silindir kalınlıkları  $h$  (yükseklik) olarak verilmiştir. Elde edilen verilerle fotonlar için Bağlı TLD Cevabını gösteren grafikler Bölüm 5.10.3; 5.11.3; 5.12.3 ve 5.13.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. TLD malzeme boyutları ve silindir kalınlıkları.

<b>TLD ADI</b>	<b>BİLEŞENLER (%)</b>	<b>BOYUTLAR (r:cm, h:cm, A:cm<sup>2</sup>, H:cm<sup>3</sup>)</b>
LiF:Mg,Ti	Li: 25.40 F: 72.50 Mg: 0.82 Ti: 1.28	r: 0.225 h: 0.06, A:0.159, H: 0.0095 h: 0.08, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.10, A:0.159, H: 0.0159
LiF:Mg,Cu,P	Li: 25.40 F: 72.50 Mg: 0.52 Cu: 0.36 P: 1.22	r: 0.225 h: 0.06, A:0.159, H: 0.0095 h: 0.08, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.10, A:0.159, H: 0.0159
LiF:Mg,Cu,Na,Si	Li: 25.40 F: 72.50 Mg: 0.21 Cu: 0.05 Na: 0.92 Si: 0.92	r: 0.225 h: 0.06, A:0.159, H: 0.0095 h: 0.08, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.10, A:0.159, H: 0.0159

Çizelge 5.6. TLD Malzeme boyutları ve silindir kalınlıkları (devam).

<b>TLD ADI</b>	<b>BİLEŞENLER (%)</b>	<b>BOYUTLAR (r:cm, h:cm, A:cm<sup>2</sup>, H:cm<sup>3</sup>)</b>
CaSO <sub>4</sub> :Dy	Ca: 28.00 O: 45.00 S: 22.00 Dy: 0500	r: 0.300 h: 0.060, A:0.2826, H: 0.0170 h: 0.080, A:0.2826, H: 0.0226 h: 0.100, A:0.2826, H: 0.0283 h: 0.125, A:0.2826, H: 0.0353
CaF <sub>2</sub> :Tm	Ca: 49.00 F: 49.00 Tm: 02.00	r: 0.180 h: 0.075, A:0.1017, H: 0.0076 h: 0.090, A:0.1017, H: 0.0092 h: 0.105, A:0.1017, H: 0.0107 h: 0.125, A:0.1017, H: 0.0127
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Cu,Ag,P	Li: 08.00 B: 26.00 O: 66.00 Cu: 0.03 Ag: 0.03 P: 0.80	r: 0.225 h: 0.080, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.095, A:0.159, H: 0.0151 h: 0.100, A:0.159, H: 0.0159 h: 0.125, A:0.159, H: 0.0198

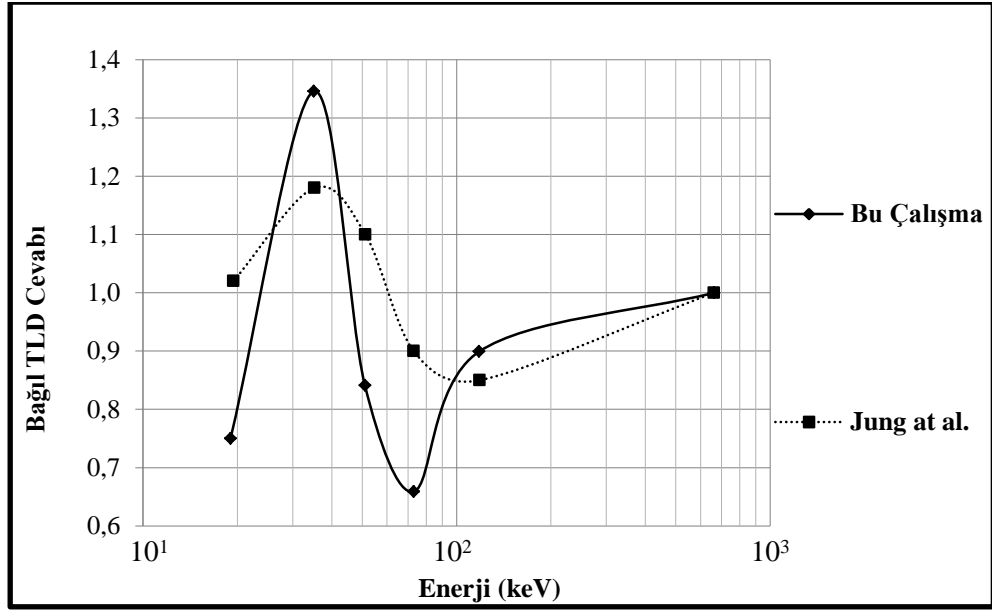
Çizelge 5.6. TLD Malzeme boyutları ve silindir kalınlıkları (devam).

<b>TLD ADI</b>	<b>BİLEŞENLER (%)</b>	<b>BOYUTLAR (r:cm, h:cm, A:cm<sup>2</sup>, H:cm<sup>3</sup>)</b>
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$	Li: 8.20 B: 25.54 O: 66.11 Cu: 0.06	r: 0.225 h: 0.080, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.095, A:0.159, H: 0.0151 h: 0.105, A:0.159, H: 0.066 h: 0.125, A:0.159, H: 0.0198
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$	Li: 08.20 B: 25.54 O: 66.11 Cu: 0.01 In: 0.06	r: 0.225 h: 0.080, A:0.159, H: 0.0127 h: 0.095, A:0.159, H: 0.0151 h: 0.125, A:0.159, H: 0.0198

### 5.10 LiF Dozimetresi İçin Elde Edilen Bulgular

lif08 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetre için 19.4, 35.2, 51.2, 73.0, 118.3 ve 662.0 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabını Jung et al. (2003) yapmış olduğu çalışmanın sonucu ile karşılaştırmak amacı ile dozimetrenin boyutları 0,4x0,4x0,1 cm<sup>3</sup> alınmıştır. Kaynak noktasal olarak düşünülmüş ve dozimetreye uzaklığı 1.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, fotonların 19.4, 51.2 ve 73.0 keV enerjilerdeki Bağlı TLD Cevabı Jung et al. (2003) yapmış olduğu çalışmada bulunan değerlerden düşük; 35.2 ve 118.3 keV enerjilerde ise yüksek çıkmıştır. Genel anlamda grafiğin şeklinde bir uyum söz konusu

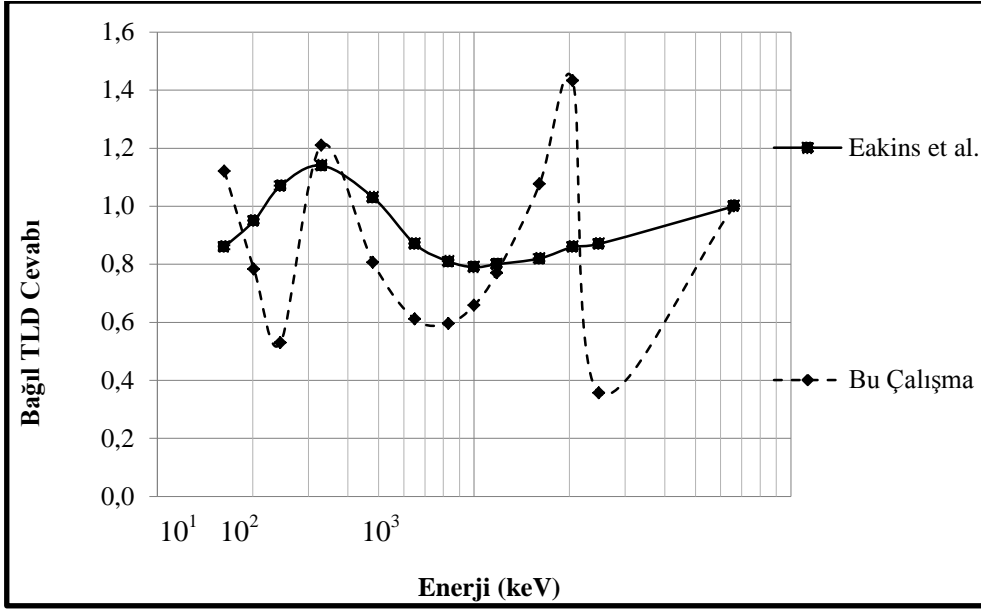
olmakla birlikte sayısal değerlerin farklılık göstermesi, deneysel çalışma ve simülasyon yönteminden kaynaklanmış olabilir.



Şekil 5.6. Jung et al. (2003) LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.

lif04 kodlu, bileşenleri % 25.40 Li, % 72.50 F, % 0.52 Mg, % 0.36 Cu ve % 1.22 P olan LiF:Mg,Cu,P dozimetre için 16.3, 20.2, 24.5, 33.0, 48.0, 65.0, 83.0, 100.0, 118.0, 161.0, 205.0, 248.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların bağlı TLD cevabını, Eakins et al. (2008) yapmış oldukları simülasyon çalışmasının sonucunu karşılaştırmak amacı ile dozimetrenin boyutları 0,4x0,4x0,1 cm<sup>3</sup> alınmıştır. Kaynak noktasal olarak düşünülmüş ve dozimetreye uzaklığı 1.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

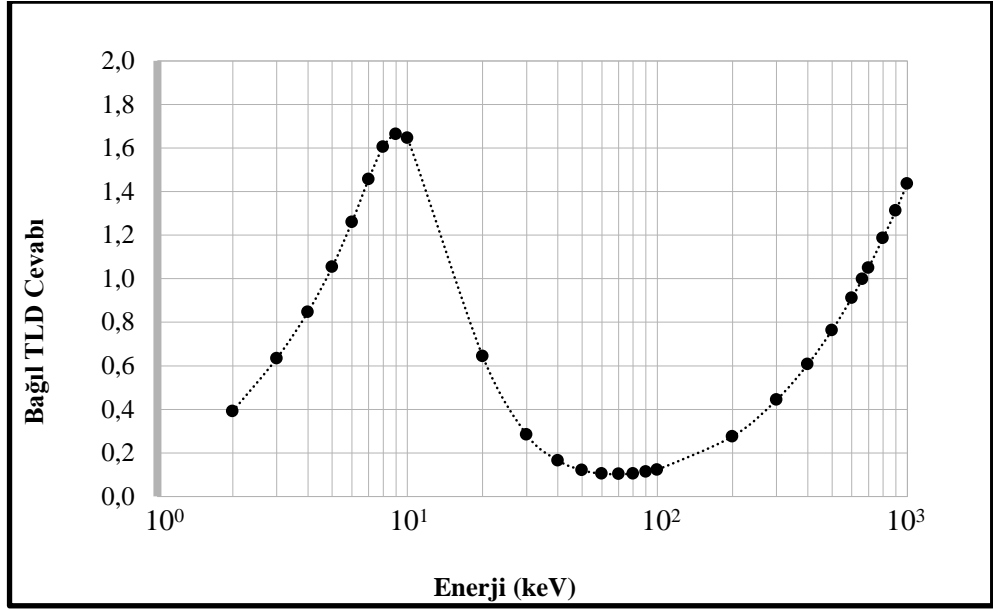
Grafikte görüldüğü üzere 33.0 ve 118.0 keV foton enerjilerinde bu çalışma ile Eakins et al. (2008) yapmış oldukları çalışma tam bir uyumluluk göstermektedir. 16.3, 20.2 48.0 ve 100.0 keV enerjilerinde makul bir uyum söz konusudur. Fakat diğer enerjiler olan 24.5, 205.0 ve 248.0 keV foton enerjilerinde uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. Bu son enerjilerdeki uyumsuzluklar ortamdan ileri gelmesi olasıdır. Yani dedektör çevresinden gelen katkıların dikkate alınıp alınmaması etkin rol oynayabilir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Eakins et al. (2008) LiF:Mg,Cu,P TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.

Bu çalışmada lif00 kodlu LiF dozimetre için 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0 ve 1000.0 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabı simülasyonla bulunmuş ve sonucu Şekil 5.8'de gösterilmiştir. TLD boyutları 1,0x1,0x0,1 cm<sup>3</sup> alınmıştır. Kaynak noktasaldır ve dozimetreye uzaklığı 10.0 cm'dir. 1.0x10<sup>+8</sup> nesil çalıştırılmıştır. Dedektör malzemeleri ve oranları şöyledir: % 26.76 Li ve % 73.24 F.

Grafikte (Şekil 5.8) görüldüğü üzere 2.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.39 değerindedir. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 1.66 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 50.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.10 değerini almaktadır. 50.0-100.0 keV aralığında yatay seyreden eğilim çizgisi, tekrar 100.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1000.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 1.43 değerine ulaşmıştır. 2.0 – 9.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük değerler aldığı görülmektedir. Yani daha çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 50.0 – 100.0 keV enerjilerinde tesir kesiti düşmektedir. 100.0 – 1000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın duruma geçmektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. LiF TL dozimetresi için bu çalışmada bulunan, fotonların Bağıl TLD Cevabı.

### 5.10.1 LiF TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağıl TLD Cevaba etkisi

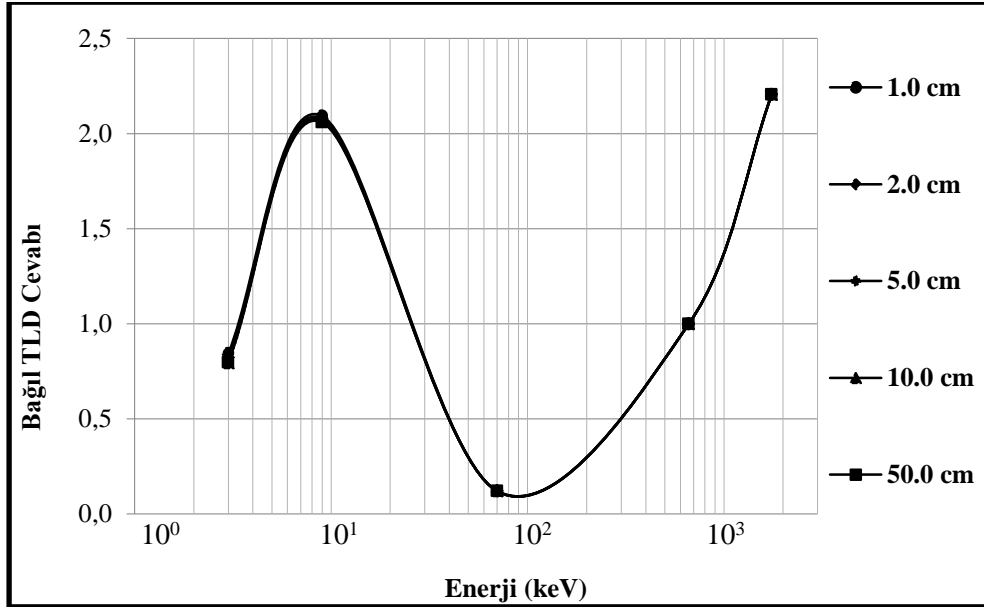
Bu bölümde LiF dozimetrelerden LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P ve LiF:Mg,Cu,Na,Si TLD'lerinin kaynak ile dozimetre arası uzaklığın Bağıl TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması yapılmıştır.

lif01 kodlu, bileşenleri % 25.40 Li, % 72.50 F, % 0.82 Mg ve % 1.28 Ti olan LiF:Mg,Ti dozimetrenin; lif04 kodlu, bileşenleri % 25.40 Li, % 72.50 F, % 0.52 Mg, % 0.36 Cu ve % 1.22 P olan LiF:Mg,Cu,P dozimetrenin; lif08 kodlu, bileşenleri % 25.40 Li, % 72.50 F, % 0.21 Mg, % 0.05 Cu, % 0.92 Na ve % 0.92 Si olan LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrenin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 9.0, 70.0, 662.0 ve 1750.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $1,27 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

### 5.10.1.1 LiF:Mg,Ti

LiF:Mg,Ti dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Ortalama olarak bütün uzaklıklar için 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.8 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.0 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.12 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 ortalama değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 5.9).

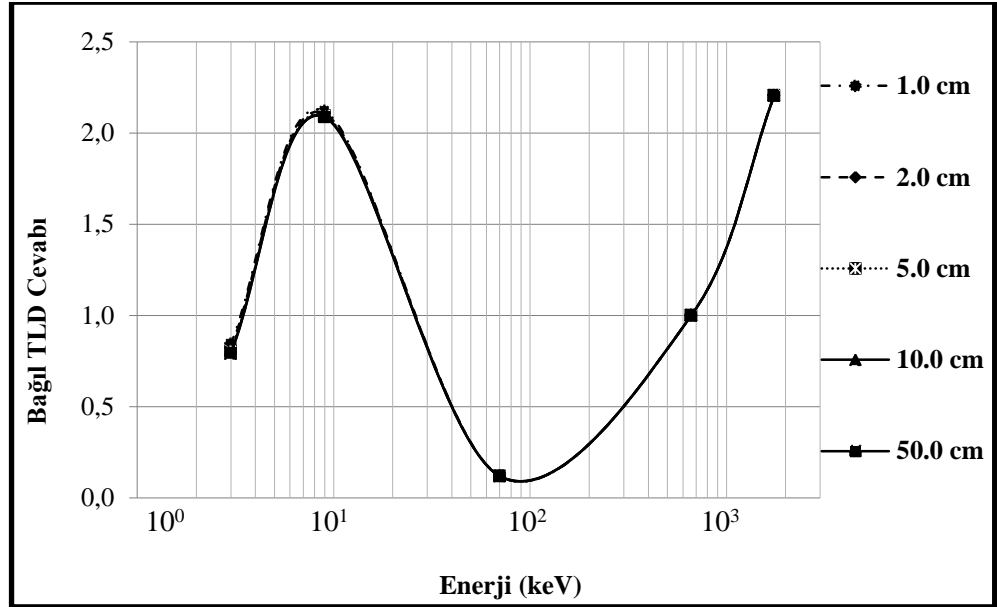


Şekil 5.9. LiF:Mg,Ti TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.10.1.2 LiF:Mg,Cu,P

LiF:Mg,Cu,P dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

Genel olarak bütün uzaklıklar için 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.8 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.1 değerindedir. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.12 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 ortalama değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 5.10).

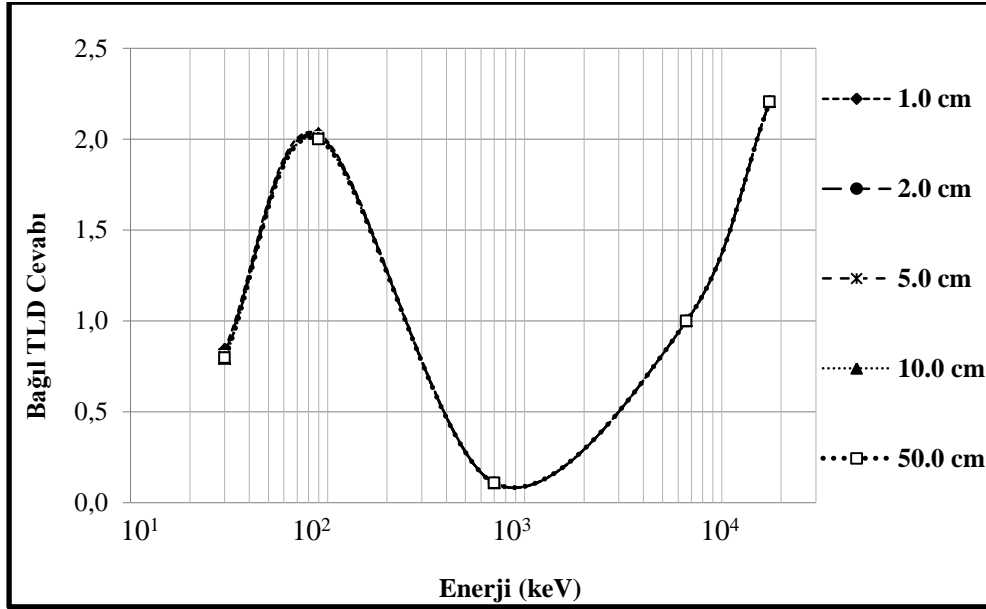


Şekil 5.10. LiF:Mg,Cu,P TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.10.1.3 LiF:Mg,Cu,Na,Si

LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.11’da gösterilmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere, 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.81 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.0 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.10 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV’den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV’e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 ortalama değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

Grafiklerde görüldüğü üzere dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu tüm durumlarda, belirlenen Bağlı TLD Cevapları hemen hemen aynı değerleri vermektedir. 3.0 – 9.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük değerler aldığı görülmektedir. Bu enerjilerde fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın

9.0 – 70.0 keV enerjilerinde bir azalış görülmektedir. 70.0 – 1750.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın olduğu görülmektedir (Şekil 5.9, 5.10, 5.11).

### 5.10.2 LiF TL dozimetrede malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi

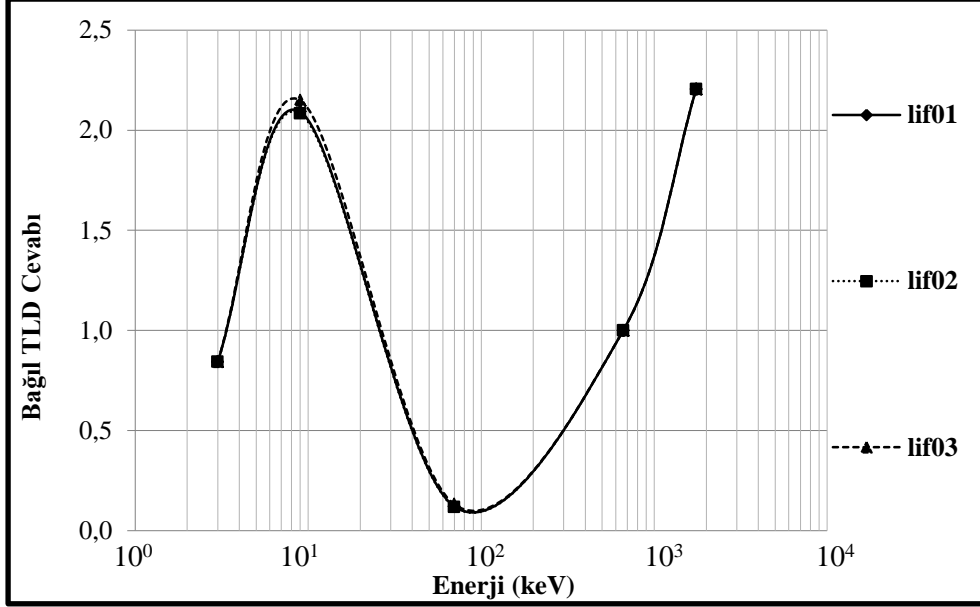
Bu bölümde LiF dozimetrelerden LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P ve LiF:Mg,Cu,Na,Si TLD'ler için malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Karışım oranları belirli lif01, lif02 ve lif03 kodlu LiF:Mg,Ti dozimetrelerin, lif04, lif05, lif06 ve lif07 kodlu LiF:Mg,Cu,P dozimetrelerin, lif08, lif09, lif10 ve lif11 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerin fotonlar için Bağlı TLD Cevapları karşılaştırılmıştır.

lif01, lif02 ve lif03 kodlu LiF:Mg,Ti dozimetrelerin, lif04, lif05, lif06 ve lif07 kodlu LiF:Mg,Cu,P dozimetrelerin, lif08, lif09, lif10 ve lif11 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerin hepsinin geometrik biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 9.0, 70.0, 662.0 ve 1750.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $1,27 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

#### 5.10.2.1 LiF:Mg,Ti

lif01, lif02 ve lif03 kodlu LiF:Mg,Ti dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

Bu üç farklı dozimetre için, 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.84 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.1 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.12 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 ortalama değerlerine ulaşmaktadır.

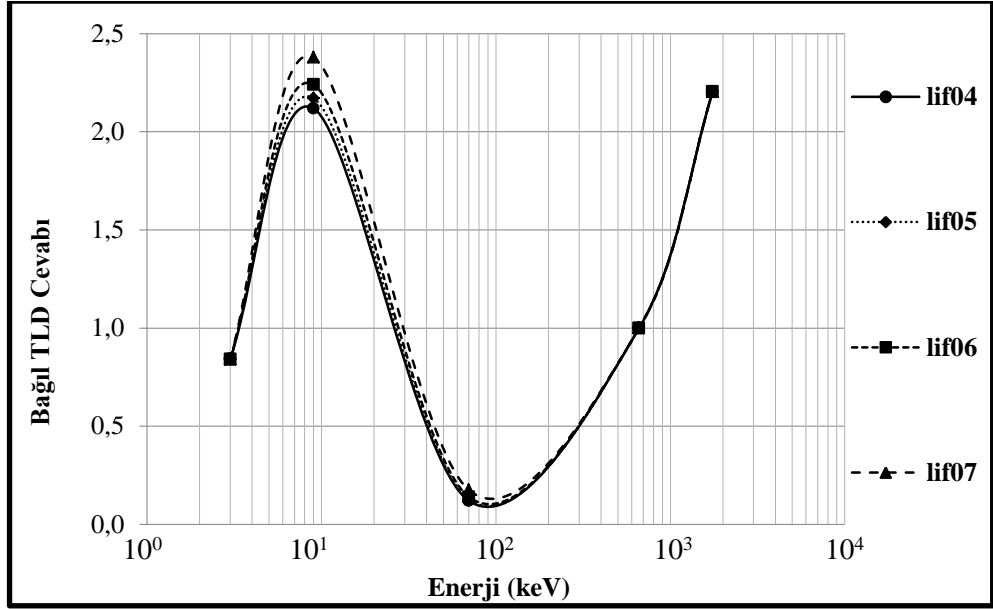


Şekil 5.12. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Ti TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

#### 5.10.2.2 LiF:Mg,Cu,P

lif04, lif05, lif06 ve lif07 kodlu LiF:Mg,Cu,P dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.13'de gösterilmiştir.

Genel olarak 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.84 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.1 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Ancak 9.0 keV'de farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu enerjide Bağlı TLD Cevabında lif04'den lif07'ye doğru bir artış söz konusudur. Dozimetrelerin duyarlılığı artış göstermektedir. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.12 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 değerlerine ulaşmaktadır.

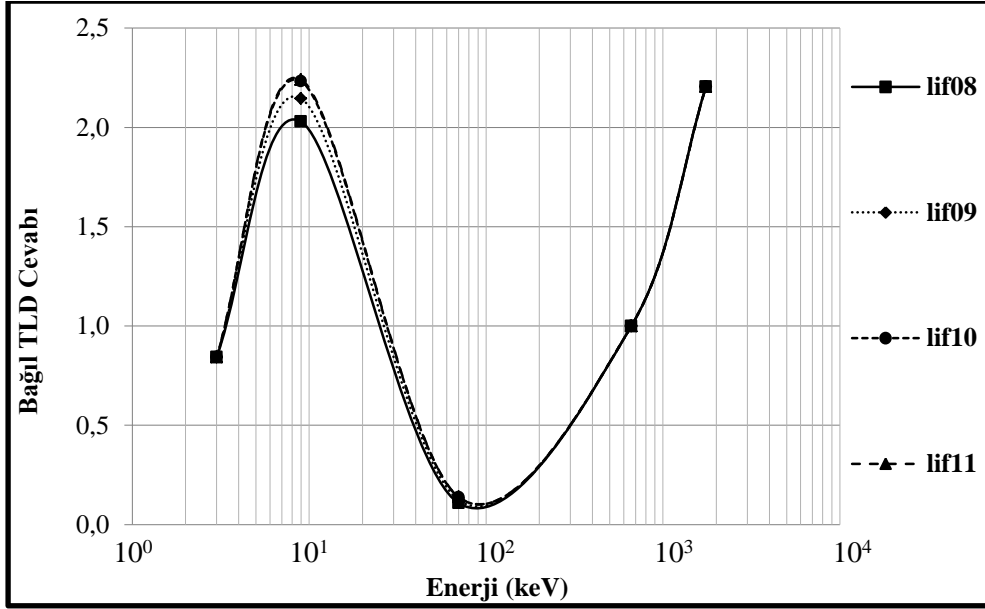


Şekil 5.13. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Cu,P TL dozimetrelerinin, fotonlar için Bağlı TLD Cevablarının karşılaştırılması.

### 5.10.2.3 LiF:Mg,Cu,Na,Si

lif08, lif09, lif10 ve lif11 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerinin, fotonlar için Bağlı TLD Cevablarının karşılaştırılması Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

Ortalama olarak 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.84 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 9.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 9.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 2.1 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Ancak 9.0 keV'de farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu enerjide Bağlı TLD Cevabında lif08'den lif11'e doğru bir artış söz konusudur. Dozimetrelerin duyarlılığı artış göstermektedir. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.13 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1750.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 2.2 ortalama değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.14. Karışım oranları farklı LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

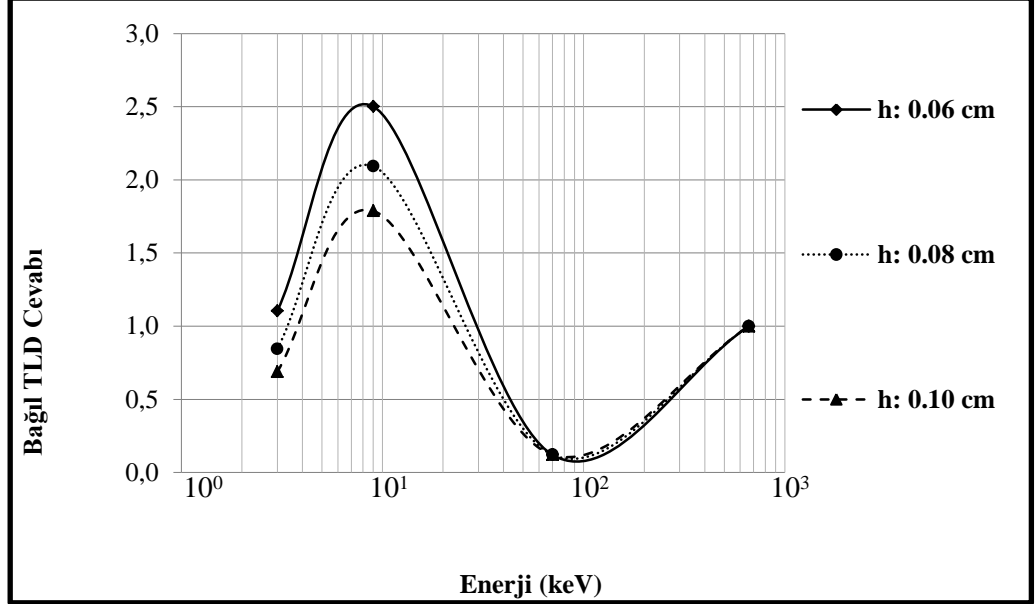
Grafikte görüldüğü üzere lif01, lif02 ve lif03 kodlu LiF:Mg,Ti dozimetrelerin, lif04, lif05, lif06 ve lif07 kodlu LiF:Mg,Cu,P dozimetrelerin, lif08, lif09, lif10 ve lif11 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerin fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 – 9.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük değerler aldığı görülmektedir. Yani daha çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 9.0 – 70.0 keV enerjilerinde tesir kesitinin düşüş gösterdiği görülmektedir. 70.0 – 1750.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisinin baskın duruma geçtiği görülmektedir (Şekil 5.12, 5.13, 5.14).

### 5.10.3 LiF TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi

Bu bölümde LiF dozimetrelerden LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P ve LiF:Mg,Cu,Na,Si TLD'lerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P ve LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 9.0, 70.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>'dir. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

### 5.10.3.1 LiF:Mg,Ti

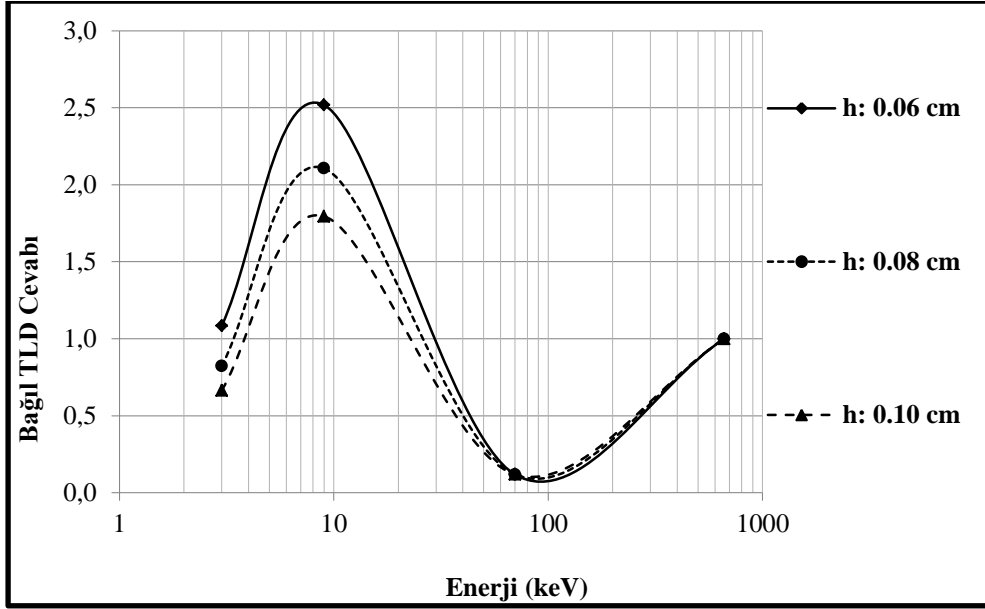
lif01 kodlu LiF:Mg,Ti dozimetrelerdeki 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. LiF:Mg,Ti TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.10.3.2 LiF:Mg,Cu,P

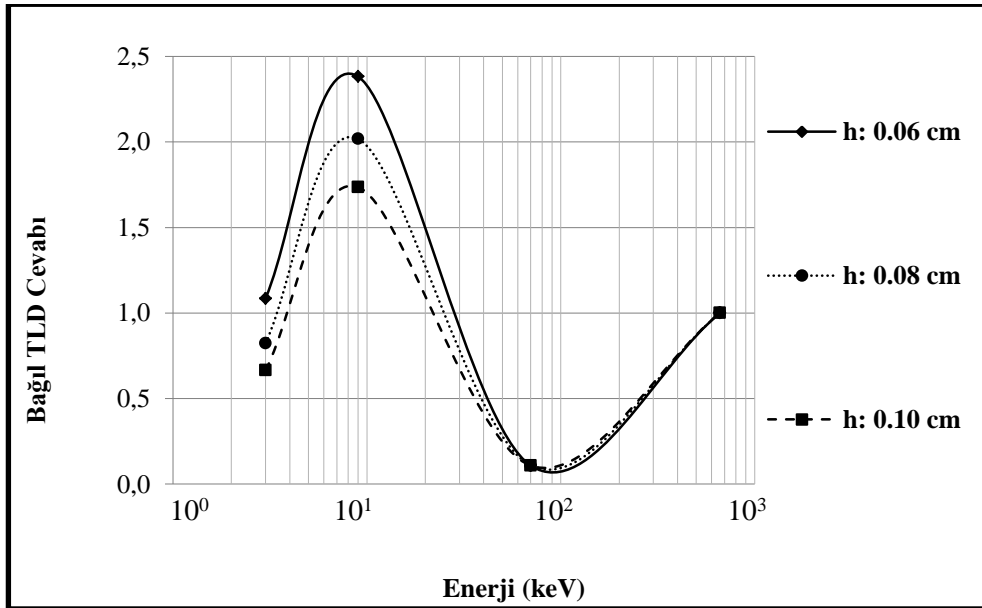
lif04 kodlu LiF:Mg,Cu,P dozimetredeki 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. LiF:Mg,Cu,P TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.10.3.3 LiF:Mg,Cu,Na,Si

lif08 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.17'da gösterilmiştir.



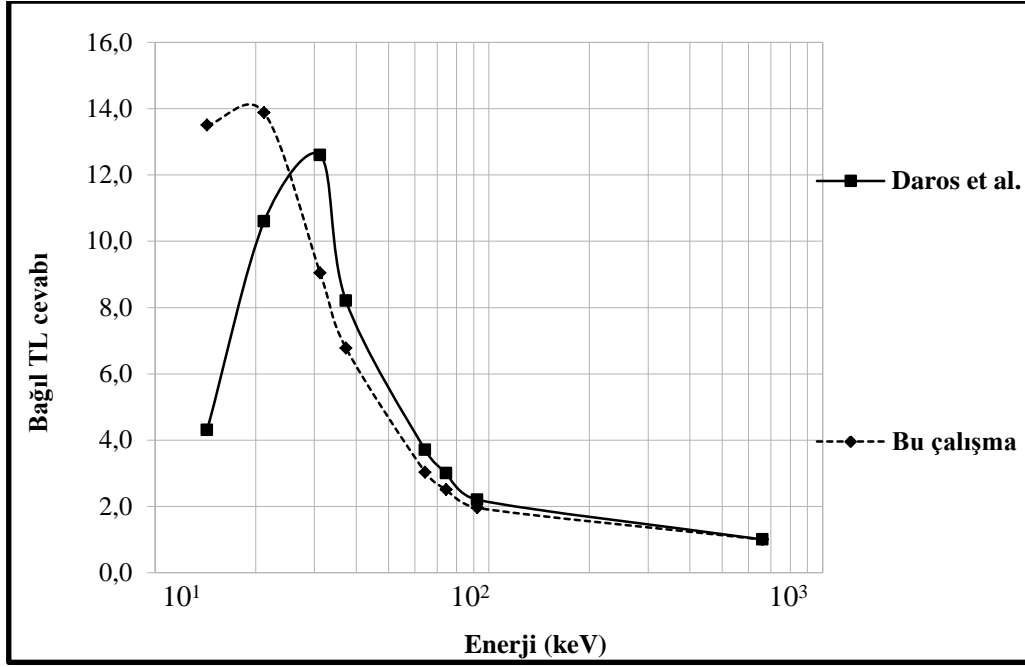
Şekil 5.17. LiF:Mg,Cu,Na,Si TL dozimetrede 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

Grafiklerde görüldüğü üzere, lif01 kodlu LiF:Mg,Ti, lif04 kodlu LiF:Mg,Cu,P, lif08 kodlu LiF:Mg,Cu,Na,Si dozimetrelerdeki 0.06, 0.08 ve 0.10 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV'den - 9.0 keV'e kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 3.0 ve 9.0 keV foton enerjisinde, silindir kalınlığı azaldıkça Bağlı TLD Cevabı artış göstermektedir. 9.0 keV'den sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 70.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 70.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 70.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 662.0 keV'e kadar devam etmektedir. 3.0 – 9.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük değerler aldığı görülmektedir. Yani daha çok fotoelektrik etkinin baskın olduğu bir durum söz konusudur. Buna karşın 9.0 – 70.0 keV enerjilerinde grafikteki eğilim çizgisi en düşük düzeylerde dir. 70.0 – 662.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisinin baskın olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.15, 5.16, 5.17).

### 5.11 CaSO<sub>4</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular

Daros et al. (2001) deneysel olarak yapmış oldukları çalışmada CaSO<sub>4</sub>:Dy için belirledikleri Enerji-Bağlı TLD Cevabını bu çalışma ile karşılaştırmak için 14.3, 21.2, 31.2, 37.3, 64.4, 74.5, 92.3 ve 662.0 keV enerjili fotonların simülasyonu yapılmıştır. TLD boyutları r:0,30 cm, h:0,08 cm alınmıştır. Dozimetreyi oluşturan elementler yüzdeleri ile % 29.0 Ca + % 47.0 O + % 23.0 S + % 1.0 Dy'dir. Kaynak noktasal ve dozimetreye uzaklığı 1.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.18'de verilmiştir.

Bu çalışmada incelenen fotonların 37.3, 64.4, 74.5 ve 92.3 keV enerjilerdeki Bağlı TLD Cevabı, Daros et al. (2001) yapmış olduğu çalışmada bulunan değerlerle uyumlu çıkmıştır. Buna karşın, 14.3, 21.2, 31.2, keV enerjilerde ise farklılıklar vardır. Genel anlamda grafiğin şeklinde bir uyum söz konusu olmakla birlikte ilk üç sayısal değerlerin farklı olması, elde edilen verilerin farklı olarak değerlendirilmesinden kaynaklanmış olabilir (Şekil 5.18).

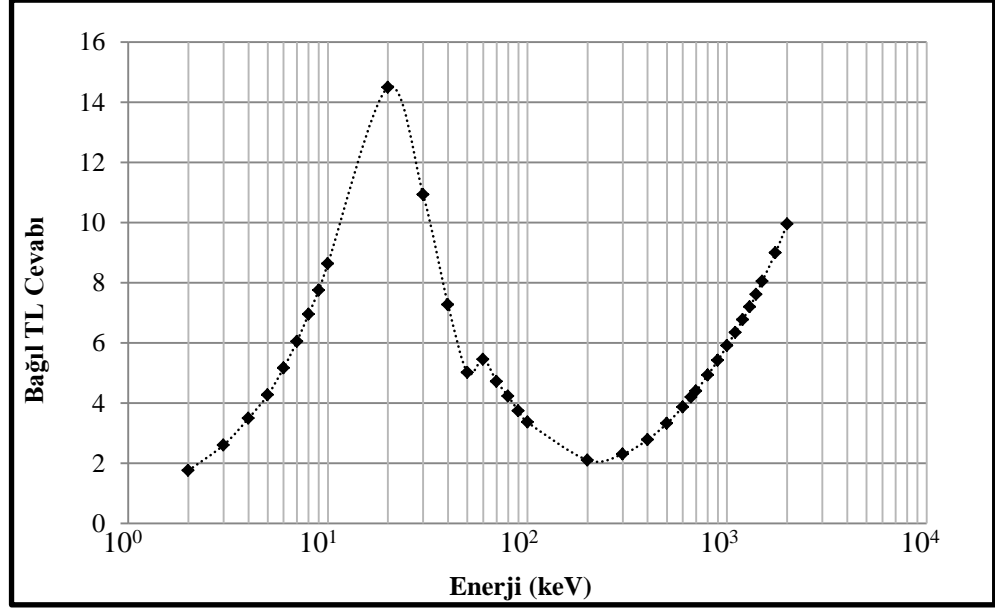


Şekil 5.18. Daros et al.(2001) CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması.

Bu çalışmada CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetre için belirlenen 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0, 1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1750.0, 2000.0 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabı Şekil 5.19'de gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve Dozimetre arası uzaklık 1.0 cm'dir. Dozimetrenin yarıçapı  $3.0 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8.0 \times 10^{-2}$  cm'dir. Fotonlar  $2,8 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>'lik bir alandan dozimetreye giriş yapmışlardır. Dozimetrenin bileşenleri % 28.0 Ca + % 45.0 O + % 22.0 S + % 5.0 Dy'dir. Dozimetrenin hacmi  $2,26 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır.

Grafikte görüldüğü üzere 2.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 1.76 değerindedir. Bu noktadan itibaren 20.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 20.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 14.5 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 200.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 200.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 2.1 değerini almaktadır. Yalnız 50.0-60.0 keV aralığında bir dalgalanma söz konusudur. 20 keV'den itibaren düşen eğilim çizgisi 50 keV'de 5.02'den 60.0 keV'de 5.45'e yükselmekte ve tekrar düşüşe geçmektedir. 200.0 keV'den itibaren tekrar yükselişe geçen eğilim çizgisi simülasyonumuz için son foton enerjisi olan

2000.0 keV'de Bağıl TLD Cevabı 9.96 değerine ulaşmıştır. 2.0 – 20.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük değerler aldığı görülmektedir. Yani daha çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 20.0 – 200.0 keV enerjilerinde tesir kesiti düşmüş olmasına karşın hala fotoelektrik etki baskın durumdadır. 200.0 – 2000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın duruma geçmiştir (Şekil 5.19).



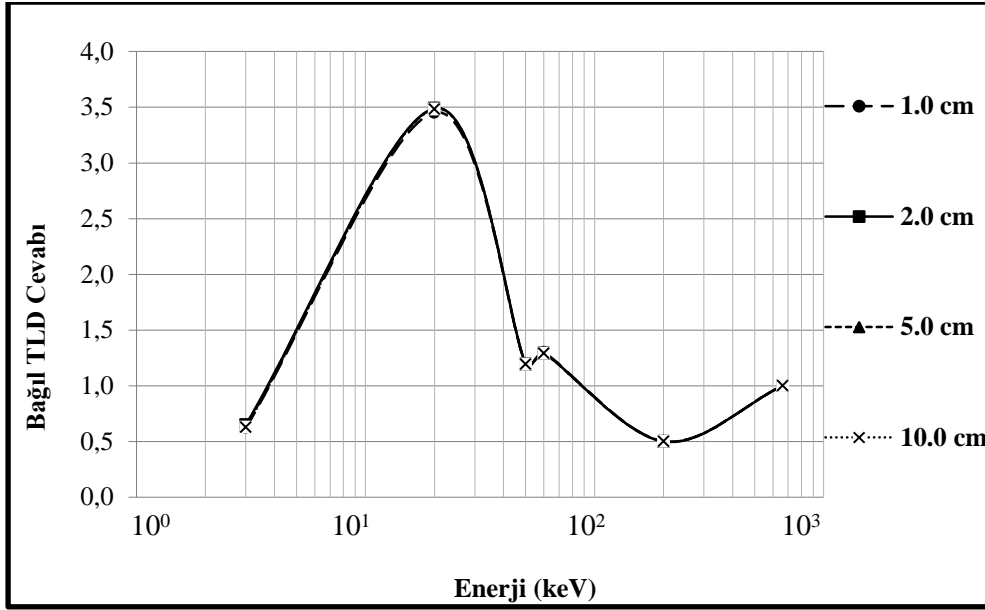
Şekil 5.19. Bu çalışmada incelenen CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı.

### 5.11.1 CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağıl TLD Cevaba etkisi

Bileşenleri % 28.00 Ca, % 45.00 O, % 22.00 S ve % 5.00 Dy olan CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetrenin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $3.0 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 20.0, 50.0, 60.0, 200.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $2,8 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $2,26 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{-5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Radyasyon kaynağı ile dozimetre

arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 ve 50.0 cm olduğu tüm durumlarda, belirlenen Bağıl TLD Cevapları hemen hemen aynı değerleri vermektedir.



Şekil 5.20. CaSO<sub>4</sub>:DyTL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

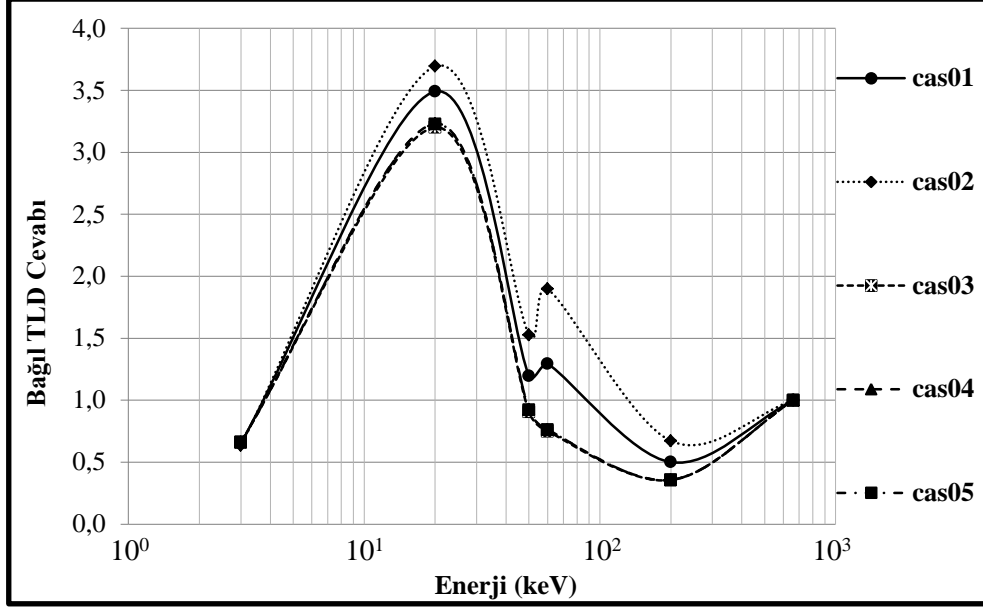
Grafikte görüldüğü üzere 3.0 keV foton enerjisinde Bağıl TLD Cevabı 0.6 değerindedir. Bu noktadan itibaren 20.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 20.0 keV enerjide Bağıl TLD Cevabı en yüksek değer olan 3.48 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağıl TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 50.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 50.0 keV enerjisinde Bağıl TLD Cevabı 1.19 değerini almaktadır. Yalnız 50.0-60.0 keV aralığında bir dalgalanma söz konusudur. 20 keV'den itibaren düşen eğilim çizgisi 50 keV'de 1.19'dan 60.0 keV'de 1.29'e yükselmekte ve tekrar düşüşe geçmektedir. 200.0 keV'de en düşük değer olan 0.5 değerini almaktadır. 200.0 keV'den itibaren tekrar yükselişe geçen eğilim çizgisi, simülasyonumuz için son foton enerjisi olan 662.0 keV'de Bağıl TLD Cevabı 1.0 değerine ulaşmıştır. 2.0 – 20.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük olduğu anlaşılmaktadır. Yani daha çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 20.0 – 200.0 keV enerjilerinde tesir kesiti düşmüş olmasına karşın hala fotoelektrik etki baskın durumdadır. 200.0 – 662.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisinin baskın olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.20).

### 5.11.2 CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dozimetrede malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi

Karışım oranları belirli cas01, cas02, cas03 cas04 ve cas05 kodlu CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.21’de gösterilmiştir.

cas01, cas02, cas03 cas04 ve cas05 kodlu CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetrelerin, hepsinin geometrik biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $3,0 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 20.0, 50.0, 60.0, 200.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $2,8 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $2,2 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>’dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiş, kaynak dozimetre arası uzaklık 2.0 cm’dir.

Grafikte görüldüğü üzere cas01, cas02, cas03 cas04 ve cas05 kodlu CaSO<sub>4</sub>:Dy dozimetrelerin fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.66 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 20.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 20.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 3.5 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 50.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 50.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 1.5 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 50.0 keV’den sonra yükselişe geçmektedir. 60.0 keV’de 1,3 değerini alıp bu noktadan 200.0 keV’e kadar düşmektedir. Bu noktada en düşük değer olan 0,5 değerini aldıktan sonra eğilim çizgisi 662.0 keV’e kadar yükselir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 662.0.0 keV’e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı 1.0 ortalama değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Karışım oranları farklı  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

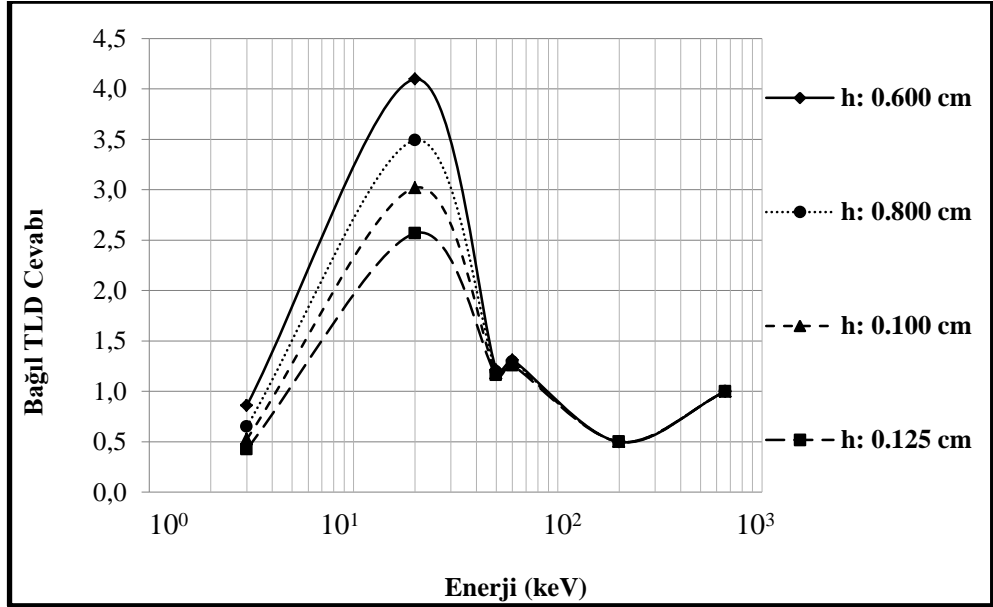
### 5.11.3 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi

cas05 kodlu  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  dozimetrede 0.060, 0.080, 0.100 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  dozimetrelerin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarı çapı  $3,0 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $8,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3.0, 20.0, 50.0, 60.0, 200.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $2,8 \times 10^{-1}$   $\text{cm}^2$ , dozimetrenin hacmi  $2,2 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^3$ 'dür. Simülasyonda  $1,0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiş, kaynak dozimetre arası uzaklık 2.0 cm'dir.

Grafiklerde görüldüğü üzere,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  dozimetredeki 0.060, 0.080, 0.100 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.65 değeri civarındadır. Bu noktadan itibaren 20.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 20.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 3.5 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 50.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 50.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 1.16 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar

50.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. 60.0 keV'de 1,25 değerini alıp bu noktadan 200.0 keV'e kadar düşmektedir. Bu noktada en düşük değer olan 0,5 değerini aldıktan sonra eğilim çizgisi 662.0 keV'e kadar yükselir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 662.0 keV'e kadar devam ederek, Bağlı TLD Cevabı 1.0 ortalama değerlerine ulaşmaktadır. Burada da en belirgin sonuç silindir kalınlığı azaldıkça Bağlı TLD Cevap değerinin artmış olmasıdır. (Şekil 5.22).



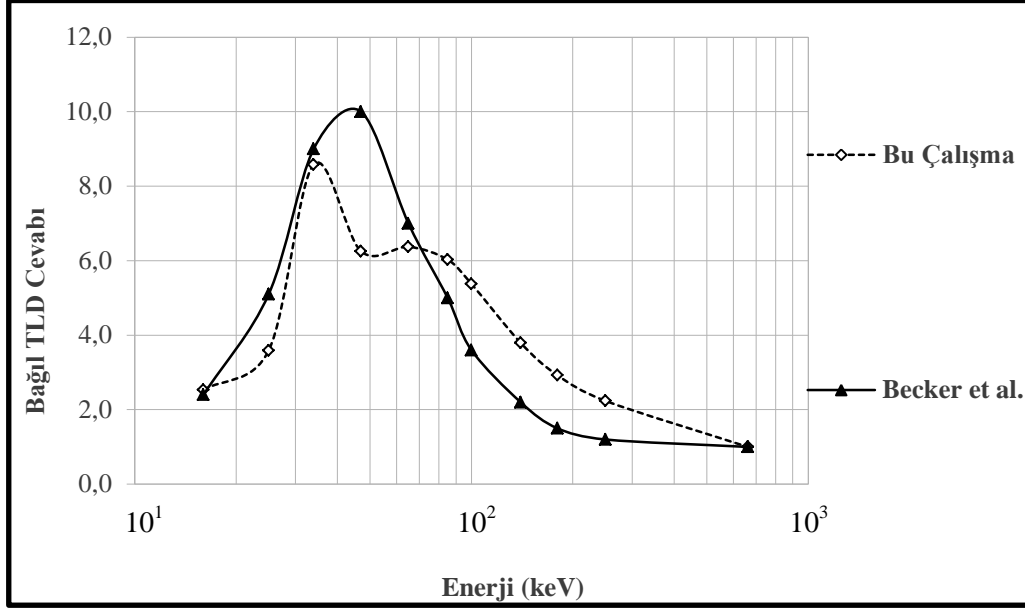
Şekil 5.22. CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dozimetrede 0.060, 0.080, 0.100 ve 0.125cm kalınlıkları için belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.12 CaF<sub>2</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular

Becker et al. (2008) deneysel olarak yapmış oldukları çalışmada CaF<sub>2</sub>:Tm için belirledikleri Bağlı TLD Cevabını bu çalışma ile karşılaştırmak için 16.0, 25.0, 34.0, 47.0, 65.0, 85.0, 100.0, 140.0, 180.0, 250.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların simülasyonu yapılmıştır. TLD boyutları 3,2x3,2x0,9 cm<sup>3</sup> alınmıştır. Dozimetreyi oluşturan elementler yüzdeleri ile % 40.0 Ca + % 40.0 F + % 20.0 Tm'dur. Kaynak noktasal ve dozimetreye uzaklığı 4.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.23'de verilmiştir.

Bu çalışmada fotonların 16.0, 25.0, 34.0, 65.0, 85.0, 100.0, 140.0, 180.0 ve 250.0 keV enerjilerdeki Bağlı TLD Cevabı, Becker et al, (2008) yapmış

oldukları çalışmada bulunan değerlerle uyumlu çıkmıştır. Buna karşın sadece 47.0 keV enerjide ise farklılıklar ortaya çıkmıştır. (Şekil 5.23).

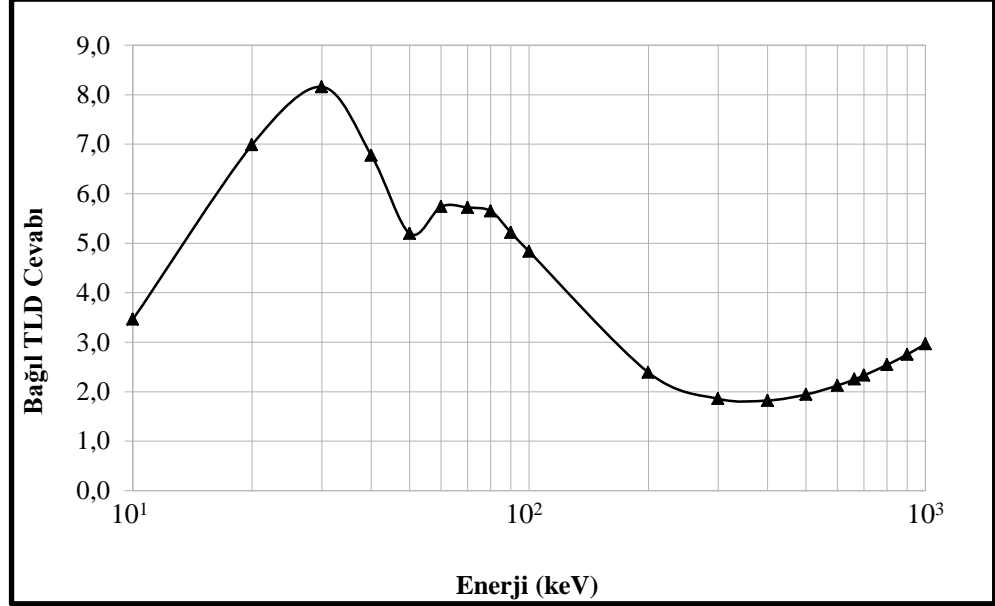


Şekil 5.23. Becker et al.(2008) CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetre için belirledikleri, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.

Bu çalışmada caf01 kodlu CaF<sub>2</sub>:Tm dozimetre için belirlenen 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0 ve 1000.0 keV enerjili fotonların Bağlı TLD Cevabı Şekil 5.24'de gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 100.0 cm'dir. Dozimetrenin boyutları a: 0.32 cm, b: 0.32 cm, c: 0.09 cm'dir. Fotonlar  $1,02 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>'lik bir alandan dozimetreye geçmişlerdir. Dozimetrenin bileşenleri % 40.0 Ca + % 40.0 F + % 20.0 Tm'dir. Dozimetrenin hacmi  $9,21 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır.

Grafikte görüldüğü üzere 10.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 3.46 değerindedir. Bu noktadan itibaren 30.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 30.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 8.16 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak 50.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 50.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 5.2 değerini almaktadır. Eğilim çizgisi 60.0 keV'de 5.74'e yükselmekte ve tekrar düşüşe geçmektedir. 400.0 keV'de 1.82 en düşük değer oluşmaktadır. 200.0 keV'den itibaren tekrar yükselişe geçen eğilim çizgisi simülasyon için son foton enerjisi olan 1000.0 keV'de Bağlı TLD Cevabı 2.96

değerine ulaşmıştır. 2.0 – 20.0 keV enerjilerindeki fotonlar için, dozimetrenin tesir kesitinin büyük olmasından dolayı daha çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 20.0 – 200.0 keV enerjilerinde hala fotoelektrik etki baskın durumdadır. 200.0 – 2000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın duruma geçmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetresi için bu çalışmada bulunan, fotonların Bağıl TLD Cevabı.

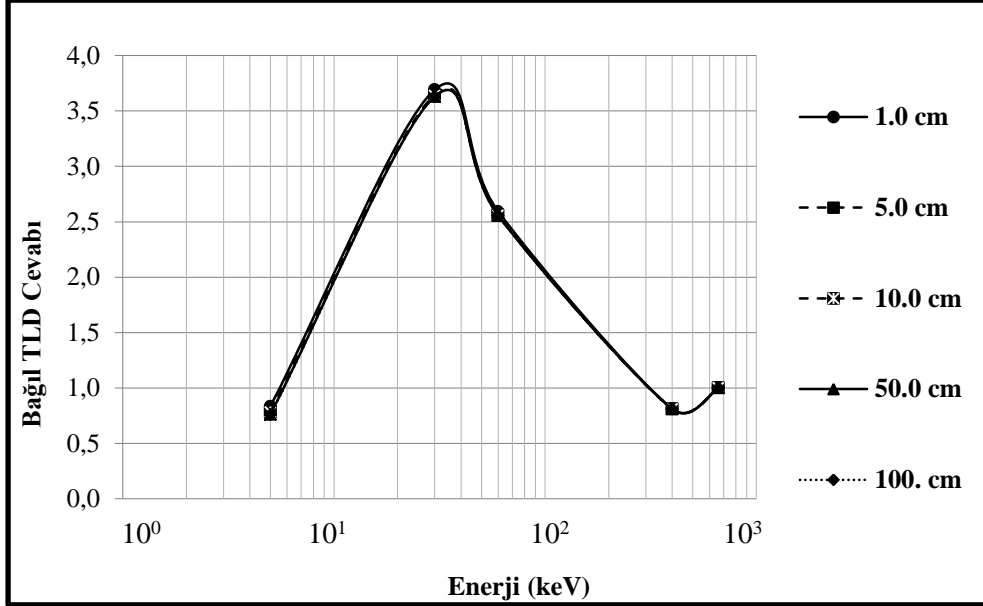
### 5.12.1 CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağıl TLD Cevaba etkisi

Bileşenleri % 40.00 Ca, % 40.00 F ve % 20.00 Tm olan CaF<sub>2</sub>:Tm dozimetrenin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $1.8 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $9,0 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 5.0, 30.0, 60.0, 400.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,0 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $0,92 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

caf01 kodlu CaF<sub>2</sub>:Tm dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.25'de gösterilmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu tüm durumlarda, belirlenen Bağıl TLD Cevapları aynı değerleri vermektedir. 3.0 keV foton enerjisinde Bağıl TLD

Cevabı 0.75 değerindedir. 30.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 3.63 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 400.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 400.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.81 değerini almaktadır. Simülasyonda son foton enerjisi olan 662.0 keV’de Bağlı TLD Cevabı 1.0 değerindedir (Şekil 5.25).



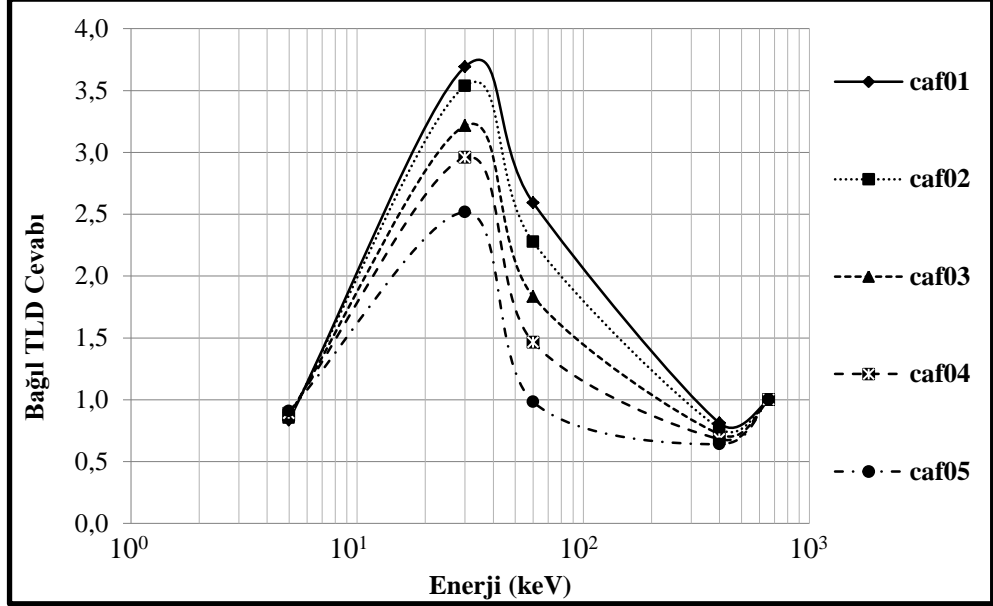
Şekil 5.25. CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.12.2 CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetredeki malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi

Karışım oranları belirli caf01, caf02, caf03, caf04 ve caf05 kodlu CaF<sub>2</sub>:Tm dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.26’da verilmiştir. Radyasyon kaynağı ile dozimetre arası uzaklık 1.0 cm’dir.

Grafikte görüldüğü üzere caf01, caf02, caf03, caf04 ve caf05 kodlu CaF<sub>2</sub>:Tm dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 5.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.90 değerindedir. 30.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 3.00 değerine ulaşmaktadır. 30.0 keV ayırt edici bir durum sergilemektedir. caf01, caf02, caf03, caf04 ve caf05 noktalarında Bağlı TLD Cevapları sırasıyla 3.69, 3.53,

3.21, 2.95 ve 2.51 değerlerini almaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 400.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 400.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.64 değerini almaktadır. Simülasyonda son foton enerjisi olan 662.0 keV’de Bağlı TLD Cevabı 1.0 değerindedir. (Şekil 5.26).

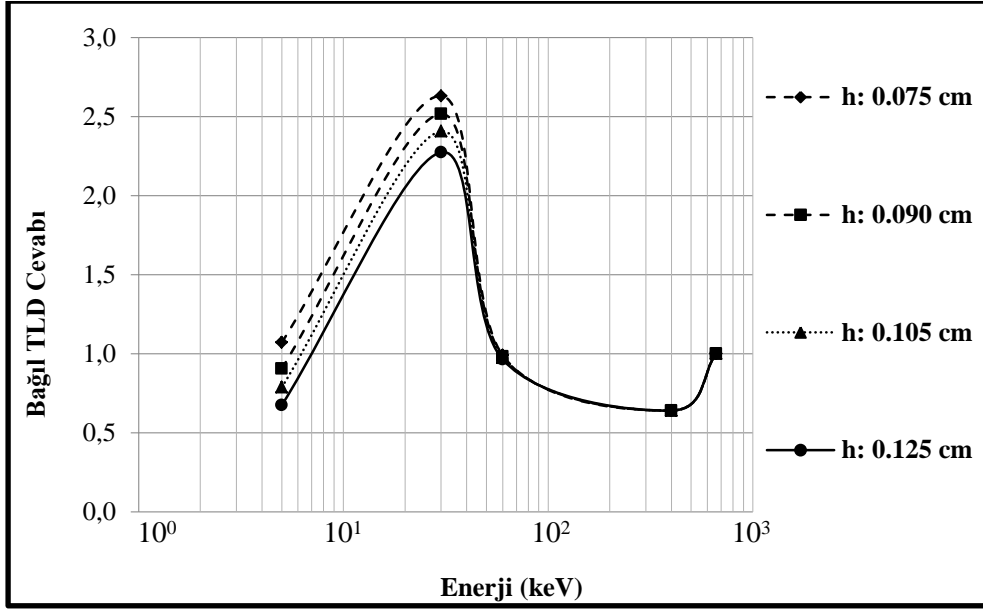


Şekil 5.26. Karışım oranları farklı  $\text{CaF}_2:\text{TmTL}$  dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.12.3 $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi

caf05 kodlu  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  dozimetrelerde 0.075, 0.090, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.27’de gösterilmiştir. Kaynak dozimetre arası uzaklık 1.0 cm’dir.

Grafiklerde görüldüğü üzere,  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  dozimetrede 0.075, 0.090, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarında uyum söz konusudur. 60.0 keV ve 400.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı tüm kalınlıklarda aynı sonucu vermektedir. 5.0 keV ve 30.0 keV enerjilerde belirgin farklılıklar vardır. En büyük değerler 30.0 keV enerjilerindedir. Burada da en dikkat çekici sonuç silindir kalınlığı azaldıkça Bağlı TLD Cevap değerinin artmış olmasıdır (Şekil 5.27).

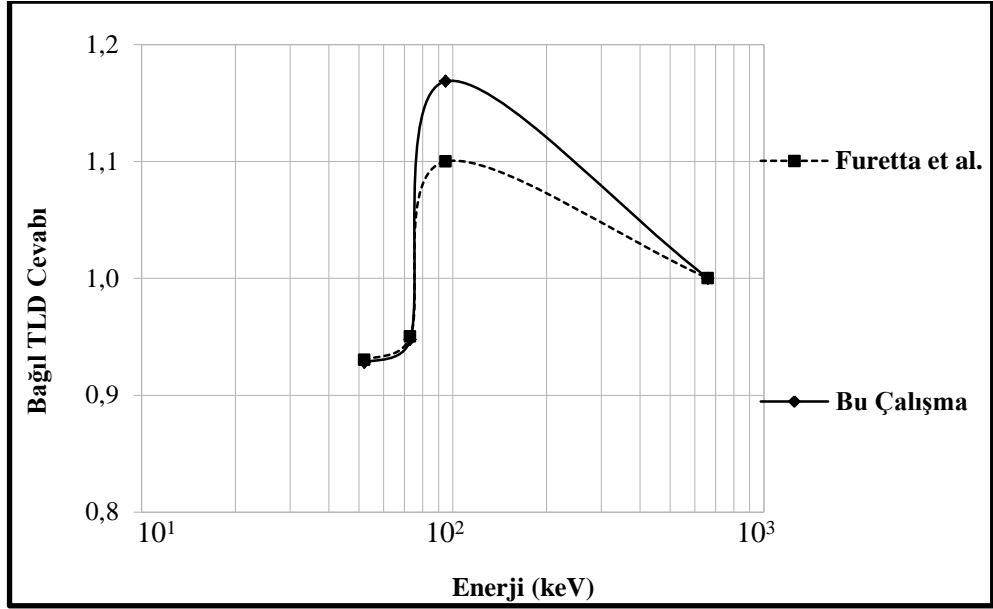


Şekil 5.27. CaF<sub>2</sub>:Tm TL dozimetrelerde 0.075, 0.090, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabının karşılaştırılması.

### 5.13 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> TLD Malzemesi İçin Elde Edilen Bulgular

Furetta et al. (2001) Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu için belirlediği, Bağıl TLD Cevabını bu çalışma ile karşılaştırmak için 52.0, 73.0, 95.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların simülasyonu yapılmıştır. TLD boyutları r:2,25x10<sup>-1</sup> cm, h:9,5x10<sup>-2</sup> cm alınmıştır. Dozimetreyi oluşturan elementlerin yüzdeleri % 08.20 Li + % 25.54 B + % 66.00 O, % 0.06 Cu'dur. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 5.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.28'de verilmiştir.

Bu çalışmada fotonların 52.0, 73.0, 95.0 ve 662.0 keV enerjilerdeki Bağıl TLD Cevabı, Furetta et al. (2001) yapmış oldukları çalışmada bulunan değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Buna karşın sadece 95.0 keV enerjide farklılık ortaya çıkmıştır. Genel anlamda grafiğin eğilim çizgisinde bir uyum söz konusu olmakla birlikte sadece bir değer farklı olması, simülasyon yöntemindeki kısıtlılıktan ileri gelebilir (Şekil 5.28).

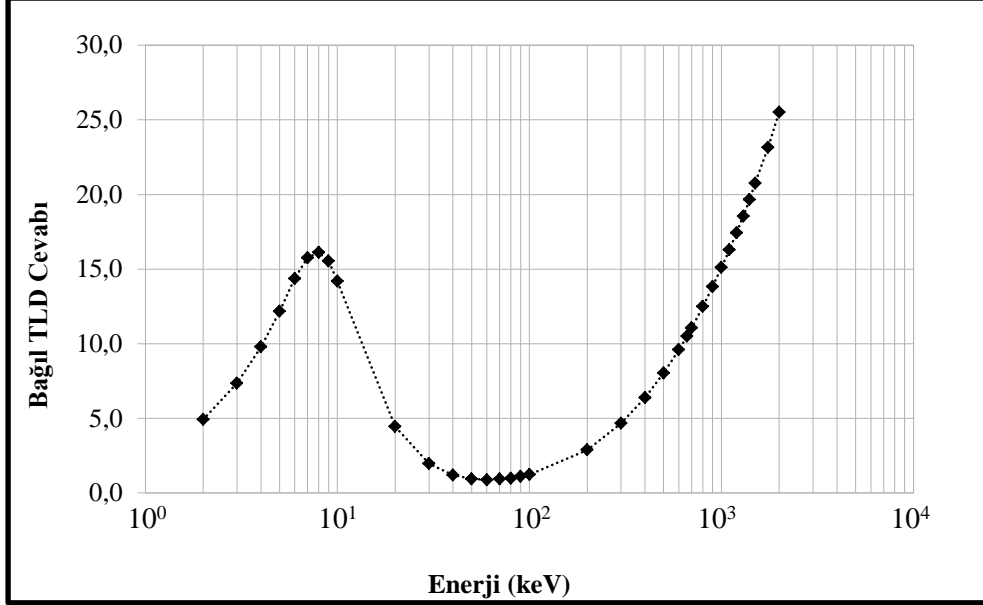


Şekil 5.28. Furetta et al.(2001)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetresi için belirledikleri, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması.

Bu çalışmada  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  dozimetre için belirlenen 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0, 1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1750.0, 2000.0 keV enerjili fotonların Bağıl TLD Cevabı Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 5.0 cm'dir. TLD boyutları  $r:2,25 \times 10^{-1}$  cm,  $h:9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Fotonlar  $1,59 \times 10^{-1}$   $\text{cm}^2$ 'lik bir alandan dozimetreye geçmişlerdir. Dozimetrenin bileşenleri % 08.20 Li + % 25.54 B + % 66.11 O, % 0.06 Cu'dur. Dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^3$ 'dür.

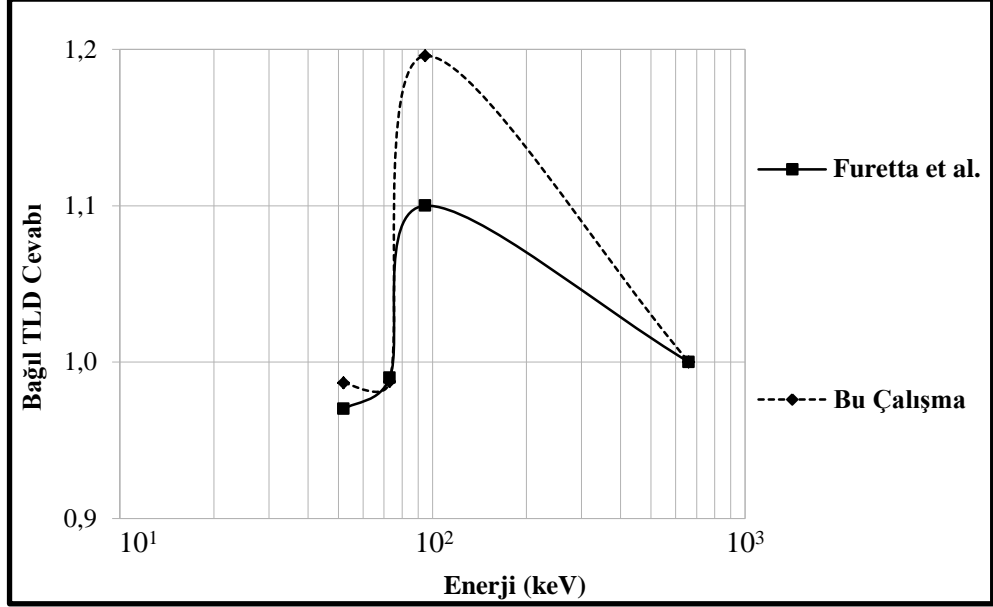
Grafikte görüldüğü üzere 2.0 keV foton enerjisinde Bağıl TLD Cevabı 4.92 değerindedir. Bu noktadan itibaren 8.0 keV enerjiye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 8.0 keV enerjide Bağıl TLD Cevabı en yüksek değer olan 15.75 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağıl TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağıl TLD Cevabı en düşük olarak 0.88 değerini almaktadır. 40.0-90.0 keV aralığında yatay seyreden eğilim çizgisi, tekrar 90.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 2000.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağıl TLD Cevabı en yüksek değer olan 25.51 değerine ulaşmıştır. 2.0 – 7.0 keV enerjilerindeki fotonlar için dozimetrenin tesir kesitinin büyük olması ile

fotoelektrik etkinin baskın durumu ortaya çıkmaktadır. Buna karşın 90.0 – 2000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın hal almaktadır (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. Bu çalışmada  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı.

Furetta et al. (2001)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu},\text{In}$  dozimetre için belirlediği Bağıl TLD Cevabını, bu çalışma ile karşılaştırmak için 52.0, 73.0, 95.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların simülasyonu yapılmıştır. TLD boyutları  $r:2,25 \times 10^{-1}$  cm,  $h:9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Dozimetreyi oluşturan elementler yüzdeleri ile % 08.20 Li + % 25.54 B + % 66.11 O, % 0.01 Cu ve % 0.05 In'dur. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Fotonların dozimetreye ulaştığı ilk yüzeyin alanı  $1,59 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2$ , dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^3$ 'dür. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 10.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.30'da verilmiştir.

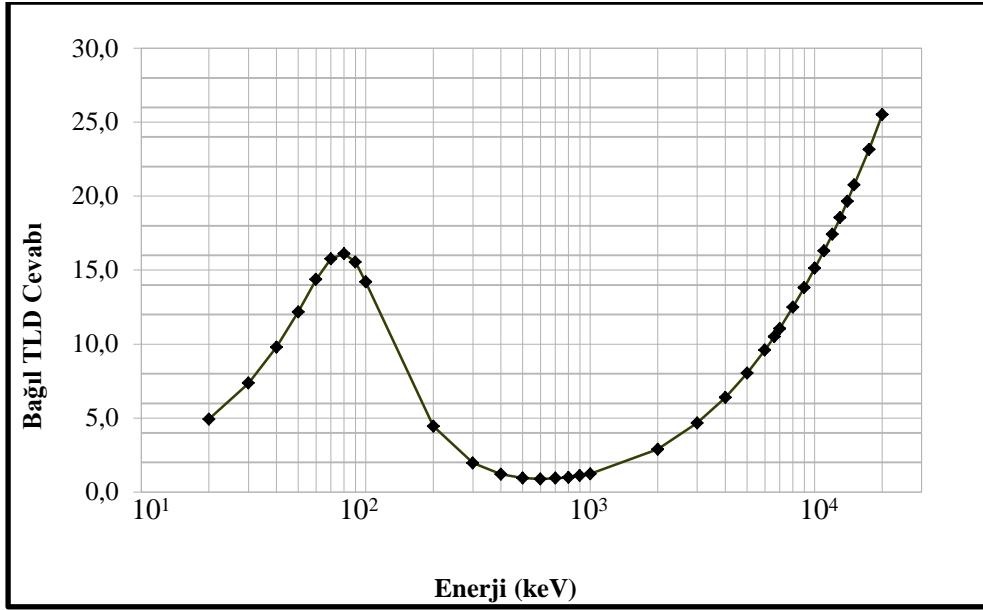


Şekil 5.30. Furetta et al. (2001)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetresi için belirlediği, fotonların Bağıl TLD Cevabı ile, bu çalışmada bulunan sonucun karşılaştırılması

Bu çalışmada  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  dozimetre için belirlenen 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0, 1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1750.0, 2000.0 keV enerjili fotonların, bulunan Bağıl TLD cevabı Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık  $10.0 \text{ cm}^3$ ’dir. TLD boyutları  $r: 2,25 \times 10^{-1} \text{ cm}$ ,  $h: 9,5 \times 10^{-2} \text{ cm}$  alınmıştır. Fotonlar  $1,59 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$ ’lik bir alandan dozimetreye geçmişlerdir. Dozimetrenin bileşenleri % 08.20 Li + % 25.54 B + % 66.11 O, % 0.01 Cu ve % 0.05 In’dur. Dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$ ’dür.

Grafikte görüldüğü üzere 2.0 keV foton enerjisinde Bağıl TLD Cevabı 4.92 değerindedir. Bu noktadan itibaren 8.0 keV enerjeye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 8.0 keV enerjide Bağıl TLD Cevabı 15.75 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağıl TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjeye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağıl TLD Cevabı en düşük olarak 0.88 değerini almaktadır. 40.0-90.0 keV aralığında yatay seyreden eğilim çizgisi, tekrar 90.0 keV’den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 2000.0 keV’e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağıl TLD Cevabı en yüksek değer olan 25.51 değerine ulaşmıştır. 2.0 – 8.0 keV enerjilerinde

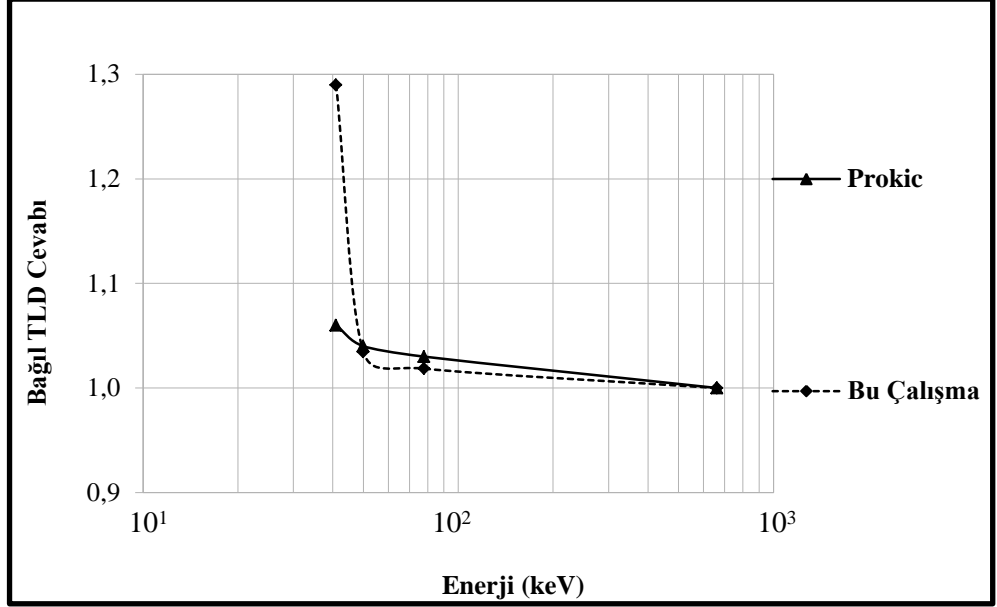
fotoelektrik etki baskın durumdadır. 90.0 – 2000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın durumdadır (Şekil 5.31).



Şekil 5.31. Bu çalışmada  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevabı.

Prokic'in (2002)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  dozimetresi için yapmış olduğu deneysel çalışmada belirlediği Bağıl TLD Cevabını bu çalışma ile karşılaştırmak için 41.0, 50.0, 78.0 ve 662.0 keV enerjili fotonların simülasyonu yapılmıştır. TLD boyutları  $r: 2,25 \times 10^{-1}$  cm,  $h: 9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Dozimetreyi oluşturan elementlerin yüzdeleri % 8.00 Li + % 26.00 B + % 66.00 O, % 0.03 Cu, 0.03 Ag ve % 0.80 P'dir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Fotonların dozimetreye ulaştığı ilk yüzeyin alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 10.0 cm'dir. Simülasyonun sonucu Şekil 5.32'de verilmiştir.

Bu çalışmada fotonların 50.0, 78.0 ve 662.0 keV enerjilerdeki Bağıl TLD Cevabı, Prokic'in (2002) yapmış olduğu çalışmada bulunan değerlerle uyumlu çıkmıştır. Buna karşın sadece 41.0 keV enerjide ise farklılık ortaya çıkmıştır. Genel anlamda grafiğin eğilim çizgisinde bir uyum söz konusu olmakla birlikte, bir değer farklılık arz etmiş olması, küçük enerjilerde farklı sonuçların ortaya çıkmasının doğasındandır (Şekil 5.32).

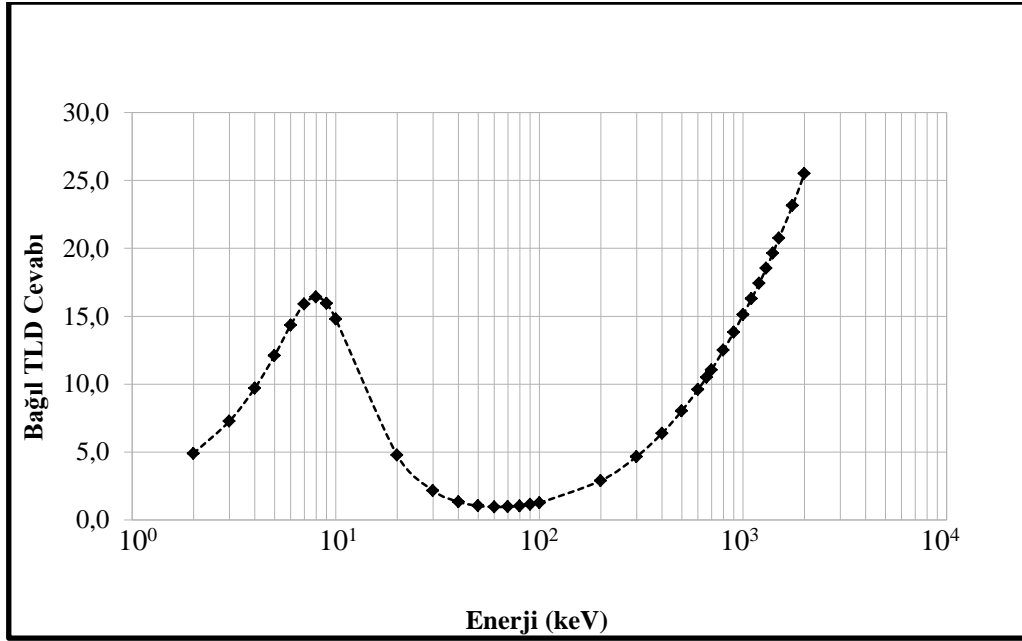


Şekil 5.32. Prokic'in (2002)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetresi için belirlediği, fotonların Bağlı TLD Cevabı ile, bu çalışmada elde edilen sonucun karşılaştırılması.

Bu çalışmada lib01 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  dozimetresi için belirlenen 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 662.0, 700.0, 800.0, 900.0, 1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1750.0, 2000.0 keV enerjili fotonların, bulunan Bağlı TLD Cevabı Şekil 5.33'de gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru konik olarak yönlendirilmiştir. Kaynak ve dozimetre arası uzaklık 10.0 cm'dir. TLD boyutları  $r: 2,25 \times 10^{-1}$  cm,  $h: 9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Fotonlar  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>'lik bir alandan dozimetreye geçiş yapmışlardır. Dozimetrenin bileşenleri % 8.00 Li + % 26.00 B + % 66.00 O, % 0.03 Cu, 0.03 Ag ve % 0.80 P'dir. Dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür.

Grafikte görüldüğü üzere 2.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 4.9 değerindedir. Bu noktadan itibaren 8.0 keV enerjeye kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 8.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı 16.41 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjeye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük olarak 0.94 değerini almaktadır. 40.0 - 90.0 keV aralığında yatay seyreden eğilim çizgisi, tekrar 90.0 keV'den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 2000.0 keV'e kadar devam etmektedir. Bu noktada Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 25.51 değerine ulaşmıştır. 2.0 - 8.0 keV enerjilerinde daha

çok fotoelektrik etki baskın durumdadır. Buna karşın 90.0 – 2000.0 keV foton enerjilerinde ise Compton etkisi baskın hal almaktadır (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. Bu çalışmada  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetresi için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevabı.

### 5.13.1 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ TL dozimetrelerde kaynağa olan uzaklığın Bağlı TLD Cevaba etkisi

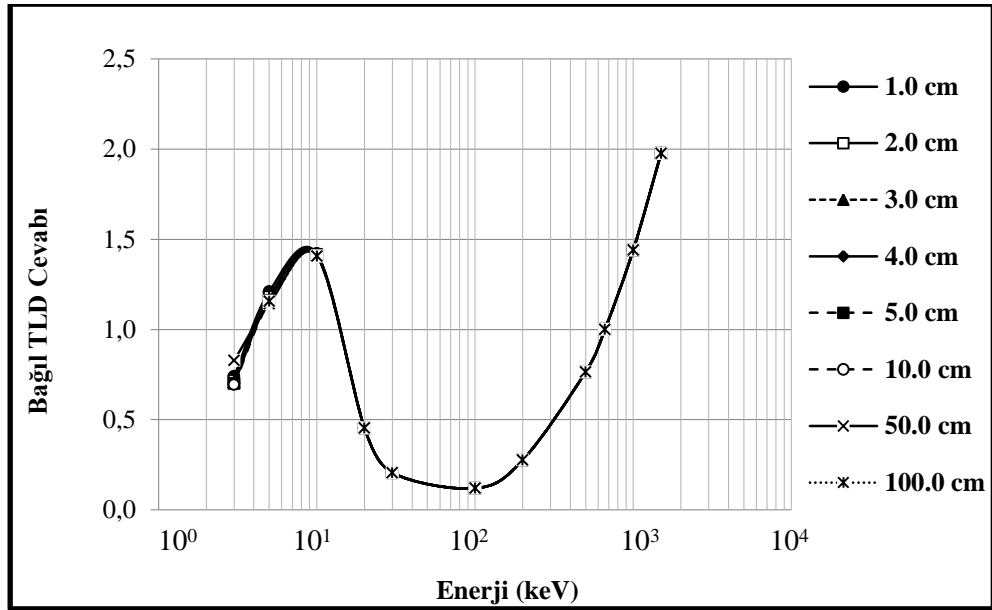
Bu bölümde  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  dozimetrelerden  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  ve  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TLD'lerinin kaynak ile dozimetre arası uzaklığın Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 50 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Tasarlanan dozimetrelerin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1.0 \times 10^{+6}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

### 5.13.1.1 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,Ag,P

lib01 kodlu Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,Ag,P TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.34'de gösterilmiştir. Radyasyon kaynağından çıkan fotonların enerjileri 3.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 100.0, 200.0, 500.0, 662.0, 1000.0 ve 1500.0 keV alınmıştır.

Grafikten görüldüğü üzere, bütün uzaklık değerlerinde bir uyum söz konusudur. 3.0 keV'de 0.69 değeri 10.0 keV'de 1.4 değerine yükselmektedir. 100.0 keV'e kadar düşen eğri burada 0.11 değerini alır. Sonra yükselişe geçen değer 1500.0 keV'de en yüksek 1.97 değerini almaktadır (Şekil 5.34).

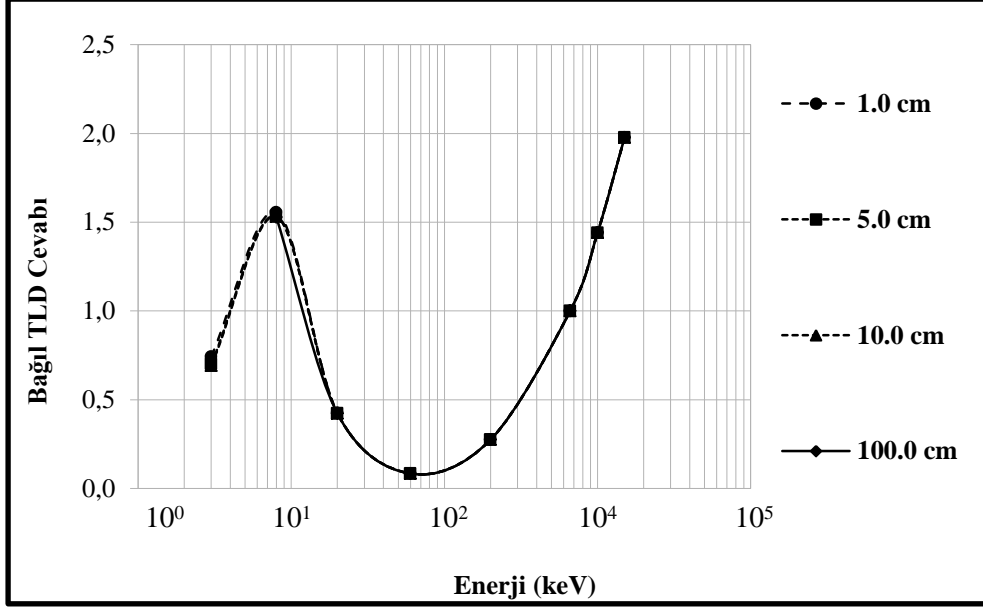


Şekil 5.34. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,Ag,P TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0, 50.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.1.2 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu

lib07 kodlu Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.35'de gösterilmiştir. Radyasyon kaynağından çıkan fotonların enerjileri 3.0, 8.0, 20.0, 60.0, 200.0, 662.0, 1000.0 ve 1500.0 keV alınmıştır.

Grafikten görüldüğü üzere, bütün uzaklık değerlerinde bir uyum söz konusudur. 3.0 keV’de 0.69 değeri 8.0 keV’de 1.52 değerine yükselmektedir. 60.0 keV’e kadar düşen eğri burada 0.08 değerini alır. Sonra yükselişe geçen değer 1500.0 keV’de en yüksek 1.97 değerini almaktadır (Şekil 5.35).

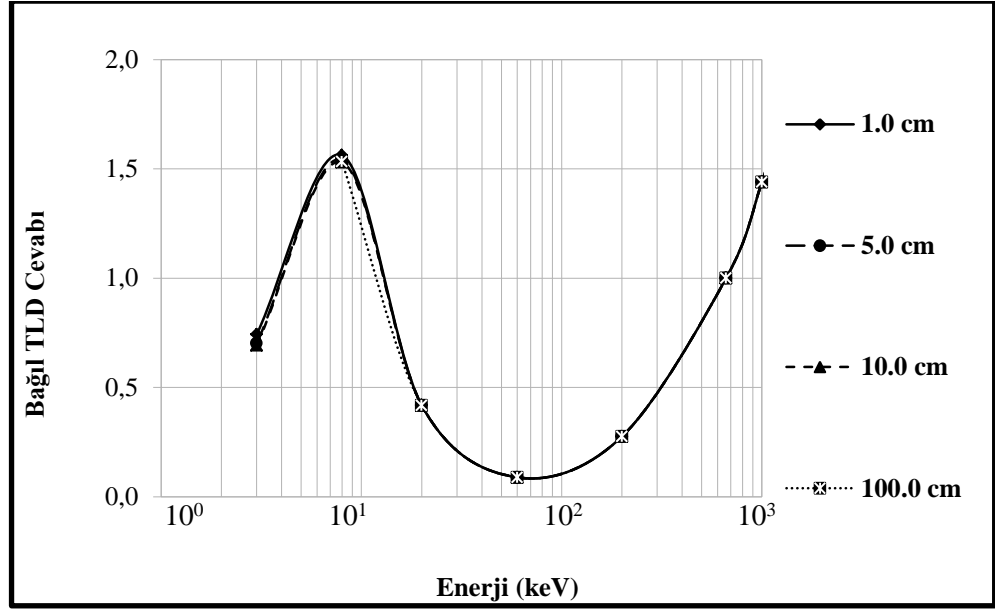


Şekil 5.35.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.1.3 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$

lib11 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetre ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.36’da gösterilmiştir. Radyasyon kaynağından çıkan fotonların enerjileri 3.0, 8.0, 20.0, 60.0, 200.0, 662.0 ve 1000.0 keV alınmıştır.

Grafikten görüldüğü üzere, bütün uzaklık değerlerinde bir uyum söz konusudur. 3.0 keV’de 0.69 değeri 8.0 keV’de 1.53 değerine yükselmektedir. 60.0 keV’e kadar düşen eğri burada 0.08 değerini alır. Sonra yükselişe geçen değer 1000.0 keV’de 1.44 değerini almaktadır (Şekil 5.36).



Şekil 5.36.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetresi ile kaynak arası uzaklığın 1.0, 5.0, 10.0 ve 100.0 cm olduğu durumlarda belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.2 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ TL dozimetrelerdeki malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba etkisi

Bu bölümde  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  dozimetrelerden  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  ve  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TLD'ler için malzeme karışım oranlarının Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Karışım oranları belirli bu dozimetrelerin fotonlar için Bağlı TLD Cevapları karşılaştırılmıştır.

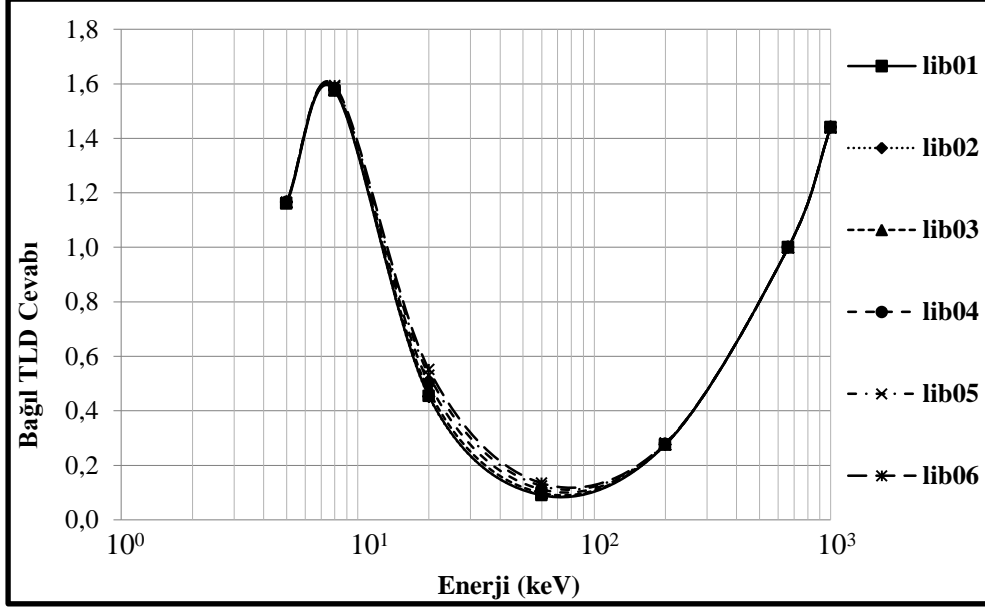
Dozimetrelerin hepsinin biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm, kalınlığı  $9,5 \times 10^{-2}$  cm alınmıştır. Fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>, dozimetrenin hacmi  $1,51 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>'dür. Simülasyonda  $1,0 \times 10^{+6}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

#### 5.13.2.1 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$

Karışım oranları belirli lib01, lib02, lib03, lib04, lib05 ve lib06 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.37'de gösterilmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere lib01, lib02, lib03, lib04, lib05 ve lib06 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam

bir uyum vardır. 5.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 1.16 değerindedir. 8.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 1.59 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.13 değerini almaktadır. Simülasyonda son foton enerjisi olan 1000.0 keV’de Bağlı TLD Cevabı 1.43 değerindedir (Şekil 5.37).

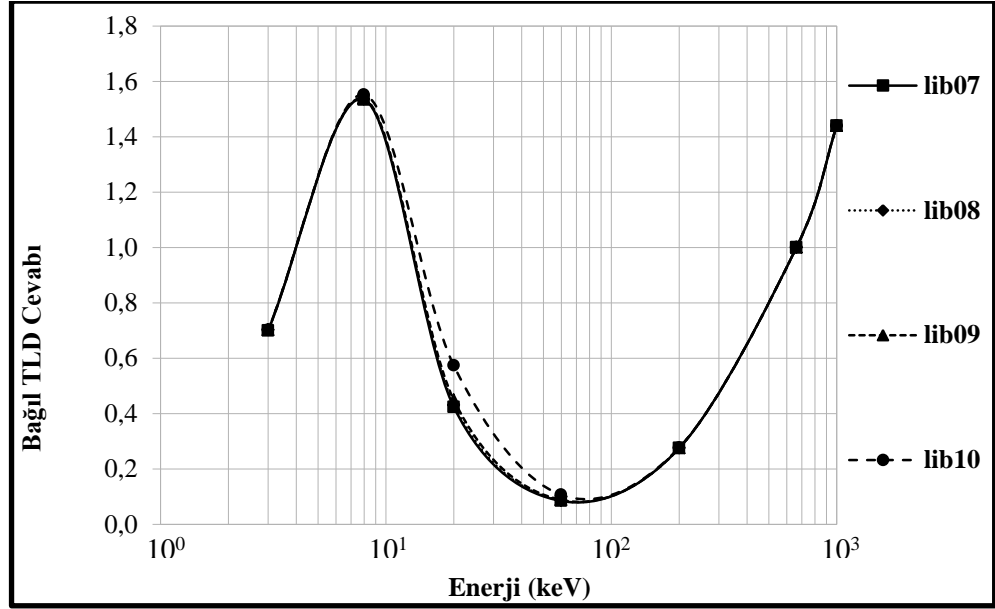


Şekil 5.37. Karışım oranları farklı  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.2.2 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$

Karışım oranları belirli lib07, lib08, lib09 ve lib10 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.38’de gösterilmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere lib07, lib08, lib09 ve lib10 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.7 değerindedir. 8.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 1.55 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.10 değerini almaktadır. Simülasyonda son foton enerjisi olan 1000.0 keV’de Bağlı TLD Cevabı 1.44 değerindedir. (Şekil 5.38).

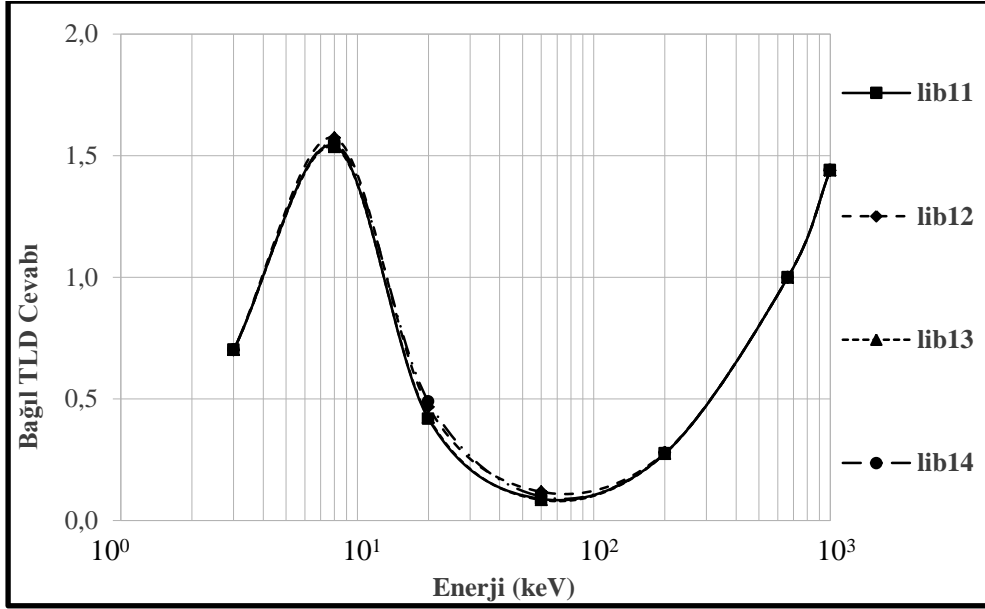


Şekil 5.38. Karışım oranları farklı  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.2.3 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$

Karışım oranları belirli lib11, lib12, lib13 ve lib14 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.39'da gösterilmiştir.

Grafikte görüldüğü üzere lib11, lib12, lib13 ve lib14 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV foton enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.7 değerindedir. 8.0 keV enerjide Bağlı TLD Cevabı en yüksek değer olan 1.54 değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı 0.09 değerini almaktadır. Simülasyonda son foton enerjisi olan 1000.0 keV'de Bağlı TLD Cevabı 1.44 değerindedir (Şekil 5.39).



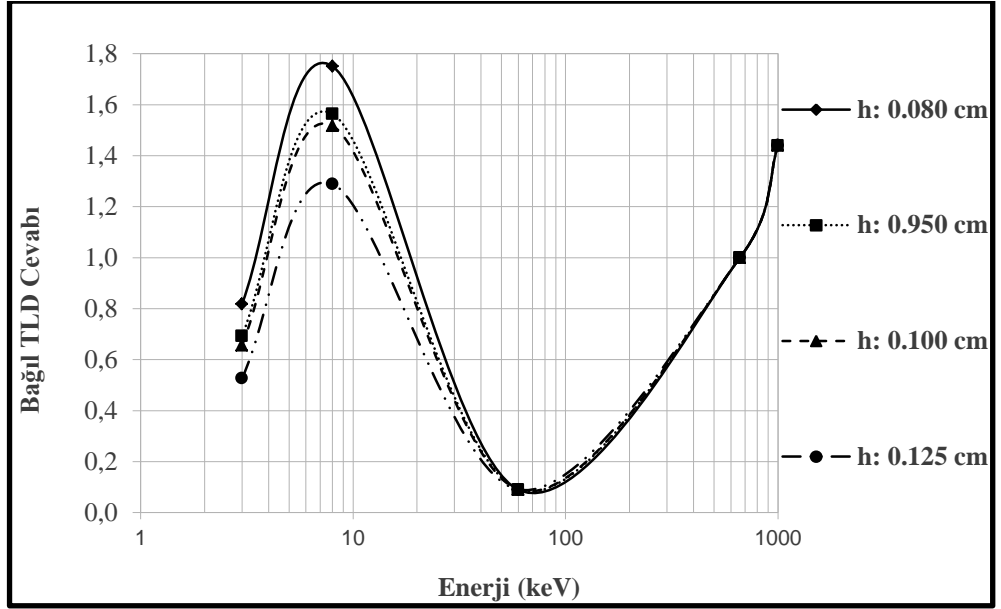
Şekil 5.39. Karışım oranları farklı  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TL dozimetrelerin, fotonlar için Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.3 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ TL dozimetrelerde kalınlığın Bağlı TLD Cevaba etkisi

Bu bölümde  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  dozimetrelerden  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  ve  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,In}$  TLD'lerde, kalınlığın Bağlı TLD Cevaba olan etkisi araştırılmıştır. Dozimetrelerin geometrik biçimi silindirdir. Bu silindirin yarıçapı  $2,25 \times 10^{-1}$  cm alınmıştır. Radyasyon kaynağından çıkan 3,0, 8,0, 60,0 662,0 ve 1000,0 keV enerjili fotonların ilk geçtiği dozimetre yüzey alanı  $1,59 \times 10^{-1}$   $\text{cm}^2$ 'dir. Simülasyonda  $1,0 \times 10^{+5}$  tane nesil çalıştırılmıştır. Kaynaktan çıkan fotonlar dozimetreye doğru yönlendirilmiştir.

#### 5.13.3.1 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$

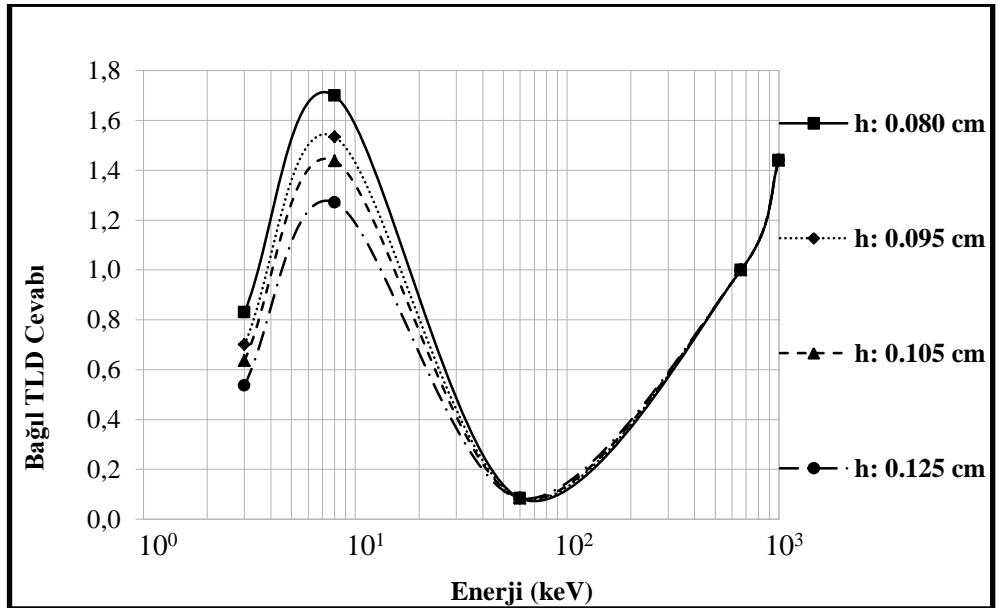
lib01 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  dozimetrede 0,080, 0,095, 0,105 ve 0,125 cm kalınlıklar için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.40'da gösterilmiştir.



Şekil 5.40.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu,Ag,P}$  TL dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.3.2 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$

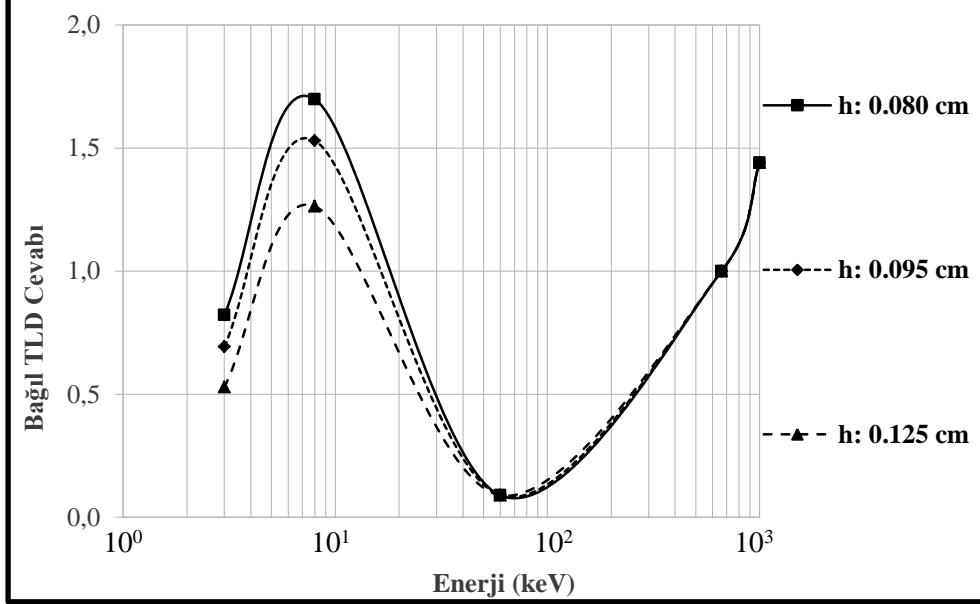
lib07 kodlu  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıklar için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.41'da gösterilmiştir.



Şekil 5.41.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  TL dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağıl TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

### 5.13.3.3 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,In

lib11 kodlu Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,In dozimetrede 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125 cm kalınlıklar için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması Şekil 5.42’de gösterilmiştir.



Şekil 5.42. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,In dozimetrede 0.080, 0.095 ve 0.125 cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarının karşılaştırılması.

Grafiklerde görüldüğü üzere, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,Ag,P, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu ve Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu,In dozimetrelerdeki 0.080, 0.095, 0.105 ve 0.125cm kalınlıkları için belirlenen, fotonların Bağlı TLD Cevaplarında tam bir uyum vardır. 3.0 keV’den 8.0 keV’e kadar eğilim çizgisi yükselmektedir. 3.0 ve 8.0 keV foton enerjisinde, silindir kalınlığı azaldıkça Bağlı TLD Cevabı artış göstermektedir. 8.0 keV’den sonra Bağlı TLD Cevabı düşmeye başlayarak düşüş eğilimi 60.0 keV enerjiye kadar devam etmektedir. 60.0 keV enerjisinde Bağlı TLD Cevabı en düşük değerini almaktadır. Eğilim çizgisi, tekrar 60.0 keV’den sonra yükselişe geçmektedir. Bu yükselme durumu simülasyonun en son enerji değeri olan 1000.0 keV’e kadar devam etmektedir (Şekil 5.40, 5.41, 5.42).

## 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Monte Carlo yöntemiyle yapılan hesaplamalarda dikkate alınan fiziki etkileşmeler, simülasyon işlemiyle elde edilen neticelerin doğruluğu bakımından önem arz etmektedir. Günümüzde fizik uygulamalarında, doz hesaplama ile ilgili çalışmalarda, görüntüleme işlemlerinde, zırhlama uygulamalarında vb. işlemlerde radyasyon taşınımını simüle etmek amacıyla kullanılan Monte Carlo programları mevcuttur. MCNP kod sistemi, uzun zamandır kullanılan, deneysel ölçüm sonuçları ile de uygunluk gösterdiği birçok çalışma ile kanıtlanmış, herhangi bir ortamda elektron, foton ve nötron taşınımını simüle edebilen bir bilgisayar kodudur. MCNP çok düşük enerjiden başlayıp çok yüksek enerjilere ulaşan elektron ve fotonların madde içindeki taşınımını simüle edebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı diğer Monte Carlo programlarına göre bazı işlemleri daha hassas hesaplayabilmektedir.

Bu çalışmada dozimetre olarak kullanılan bazı TL malzemelerin dedektör cevap fonksiyonlarının enerji bağımlılığı Monte Carlo hesaplama yöntemi ile bulunmuştur. Çalışmada bazı TLD'ler Monte Carlo simülasyonu metodu kullanılarak modellenmiş ve dozimetrelerin radyasyon enerjisine bağlı cevapları incelenmiştir. Doz üzerinde etkisi olabilecek olan durumlar incelenmiştir.

Elde edilen değerlere ait istatistiksel hata miktarlarının %1.0'ında olması istenilen bir sonuçtur. İstatistiksel hata miktarını etkileyen etmenler bu çalışmada dikkate alınarak incelenmiştir. Kaynağın noktasal olması durumunda istatistiksel hataların en aza indirgenebilmesi için çok büyük sayılarda nesil çalıştırılmasını gerektirmektedir. Bu ise çalışma süresini arttırmaktadır. Çalışma süresini azaltmak için nesil sayısının da azaltılması gerekmektedir. Bu ikilemi ortadan kaldırmak için kaynağın yönlü olmasının sonuçları olumlu etkilemesi ile istatistiksel hata oranları istenilen düzeylere düşürülmüştür. Yani, kaynağın yönlü geometriye sahip olmasının sağlanması ile daha az sayıda nesil ile çalışılmış ve daha az sürelerde bilgisayarlar çalıştırılmıştır. Bunun için kaynak dozimetre arası uzaklık ile dozimetrenin yarıçapı dikkate alınarak, yönlü radyasyon kaynağı ile dozimetre geometrisinde belli açılarda konik dağılımla parçacık üretilmesini sağlamaya yardımcı olan bir hesaplama aracı geliştirilmiştir. Sonuç olarak, simülasyon çalışmalarında gereksiz durumlar atlanarak çalışma süresi de azalacağından dolayı, deneysel çalışmalarda ekonomik katkı sağlanmış olacaktır.

Çizelgede görüldüğü üzere noktasal kaynaktan çıkan fotonların dozimetreye istenilen hata limitleri içinde ulaşabilmesi için  $2 \times 10^9$  nesille çalışması gerekmektedir. Bu ise bilgisayarın 320.00 dakika civarında çalışmasını gerektirirken, kaynaktan çıkan fotonlar yönlendirilirse 6.0 saniye gibi çok küçük bir zaman diliminde binde 1.0 hata oranı ile dozimetreye ulaşabilmektedirler (Çizelge 5.2).

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere dozimetreye bırakılan enerjinin nesille ilişkisi  $1 \times 10^6$ ’dan sonra yatay olarak devam etmektedir. Benzer şekilde yapılan bir çalışmada fotonların dedektör cevabı, yaklaşık olarak  $1 \times 10^6$  foton nesli simüle edilerek bulunmuştur (Das et al., 1996). Dozimetreye bırakılan enerjinin nesille ilişkisi dikkate alındığında nesil sayısının en az  $1 \times 10^6$  olması gerekmektedir.

Çalışılan kaynaklar istenilen enerji spektrumuna sahiptir. Çalışmada istenildiği şekilde foton enerjisi kullanılarak yapılan hesaplamalarda verilerin birbiri ile ve literatür değerleri ile göz önünde bulundurulacak bir farklılığın olmadığı ortaya konmuştur. Bu ise simülasyon çalışmalarında çalışma zamanını etkileyen bir faktörlerden biridir.

Nesil sayısı arttırıldıkça dozimetrenin ilk yüzeyini geçen tanecik sayısının artması gerektiği Çizelge 5.3’de görülmektedir. Şekil 5.3’de görüldüğü üzere dozimetreye ulaşan her bir parçacık başına bırakılan enerji için, bağıl hata değeri nesil sayısı arttıkça azalmaktadır.

Radyasyon kaynağı ile dozimetre arasındaki uzaklığın az ya da çok olması, fotonlar için Bağıl TLD Cevabının sonucunu etkilememektedir (Şekil 5.9, 5.10, 5.11, 5.20, 5.25, 5.34, 5.35, 5.36).

Dozimetre malzemesinin dilimlenmesi ile yapılan simülasyonda 1, 2 ve 4. silindirlerin dozimetre cevaplarında belirgin bir paralellik olmasına karşın arada kalan 3. dilim farklılık göstermektedir (Şekil 5.4). Buradaki farklılık 2. ve 4. dilimlerden 3. dilime bir katkının olmasıdır. Yani 3. dilimde daha fazla enerji birikimi söz konusudur. TL dozimetrelere için tek olarak düşünülerek elde edilen Bağıl TLD Cevapları, diğer çalışmalarda bir kerede bir hacimde hesaplandığı halde bu çalışmada birden fazla olan kaynak elemanı için istenen noktalarda yapılmıştır. Yani bir TLD birden fazla bölmeye ayrılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada her bir Bağıl TLD Cevabı incelenmiştir. TLD

malzemelerin içyapısının ayrıntılı olarak Bağlı TLD Cevabı deneysel olarak saptanamamaktadır. Bu çalışma ile her bir parçadaki cevap fonksiyonunun ne şekilde değiştiği ortaya konmuştur. TL dozimetre tasarımlarında cevap fonksiyonlarının elde edilmesine yönelik hesap ve tasarımlarda bölümlendirilmeden gelen katkıların değişimi yol gösterici olacaktır. İstenen diferansiyel parça değiştirilerek ya da ekleme-çıkarma yapılarak, yeni dağılım görünüşleri elde edilebilir. Bu hesaplamalar yeni kaynak tasarımlarında ya da içyapının etkilerinin bilinmesi hususunda yol gösterici olacaktır.

Fotonların dozimetreye ulaştığı ilk yüzeyin dairesel veya dikdörtgen olması koşuluyla, yüzey alanlarının aynı değerde olması ve dozimetre kütlelerinin eşit olması durumunda Enerji-Bağlı TLD Cevaplarının hemen hemen aynı değerleri verdikleri görülmüştür. Şekil 5.5’de görüldüğü üzere fotonlar için Bağlı TLD Cevabının grafiğe dökümünde belirgin bir farklılık yoktur. Bu bağlamda, kullanım kolaylığı açısından yeni dozimetrelerin silindirik biçiminde tasarlanarak oluşturulması uygun olacaktır.

Bu çalışmada incelenen dozimetrelerin disk biçiminde olması durumunda kalınlık önem arz etmektedir. İncelemesi yapılan disk biçimindeki dozimetrelerin kalınlıkları azaltıldıkça duyarlılığı artmaktadır. Silindirik disk biçiminde tasarlanacak TL dozimetrelerin kalınlıklarının 0.6 mm’den daha büyük seçilmesi uygun olacaktır.

TLD malzemesini oluşturan elementlerin karışımdaki yüzdeleri cevap fonksiyonuna farklı olarak etkilemektedir. Literatürdeki çalışmalar arasında da farklılıklar göze çarpmaktadır. Malzeme bileşenleri ve malzemelerin yüzdeleri de sonuçlara doğrudan etkilemektedir (Şekil 5.12, 5.13, 5.14, 5.21, 5.25, 5.37, 5.38, 5.39).

Bu çalışmada modellenen durumlar için birer FN ( File Name –Dosya Adı) verilerek bir yazılım paketi oluşturulmuştur. Kullanıcıların hizmetine sunulacak pakette, bu çalışmada kullanılan FN numaraları paketin veri tabanında yer alacaktır. Bu veri tabanının önemli kısmı mümkün olduğunca gerçek ölçülere ve durumlara sahip geometrik tanımlamalardan meydana gelmektedir. Sonuç olarak bu çalışma ile bilim dünyasına sunulacak olan bu yazılım paketinin veri tabanının bir kısmı oluşturulmuştur. Bu veri tabanının yeni modellemelerle genişletilmesi bu konuda çalışacak bilim insanlarına büyük kolaylıklar sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Becker, F., Nagels, S., Burgkhardt, B., Böttger, R., Lizon Aguilar, A., Hampel, G., and Wortmann, B.,** 2008, Dosimetry in mixed gamma-neutron radiation fields and energy compensation filters for CaF<sub>2</sub>:Tm TL detectors, *Radiation Measurements* 43, 921-924
- Berger, M.J., and Seltzer, S.M.,** 1970, “Bremsstrahlung and Photoneutrons from Thick Tungsten and Tantalum Targets,” *Phys. Rev.* C2621.
- Bethe, H.A., and Heitler, W.,** 1934, “On Stopping of Fast Particles and on the Creation of Positive Electrons,” *Proc. Roy.Soc. (London)* A146 83.
- Blomquist, R.N., and Gelbard, E.M.,** 1983, “An Assessment of Existing Klein-Nishina MonteCarlo Sampling Methods,” *Nucl.Sci.Eng.*, 83, 380.
- Blunck, O., and Leisegang, S.,** 1950, “Zum Energieverlust schneller Elektronen in dünnen Schichten,” *Z. Physik* 128 500.
- Bozkurt, A.,** 2011, Nükleer Fizik II, Ders Notları. Harran Üni., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl., Şanlıurfa
- Briesmeister, J.F.,** Editor, 2000, MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code System. LA-12625-M, Version C
- Camgöz, B.,** 2008, Düşük Doz Hızlı (I-125, Pd-103) Brakiterapi Kaynaklarının Geometrisindeki Değişikliklerin Doz Dağılımına Etkisinin EGSnc Monte Carlo Kodu Kullanılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü, 163s.
- Chilton, A.B., Shultis J.K., and Faw R.E.,** 1984, Principles of Radiation Shielding, New Jersey, 489 p.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Daros, K.A.C., Campos, L.L., and Medeiros, R.B.**, 2001, TL response study of the CaSO<sub>4</sub>:Dy. Pellets with graphite for dosimetry in beta radiation and low-energy photons fields. *Applied Radiation and Isotopes* 54, 957–960pp.
- Das, R.K., Li, Z., Perera, H., and Williamson, J.F.**, 1996, Accuracy of Monte Carlo photon transport simulation in characterizing brachytherapy dosimeter energy-response artefacts, *Phys. Med. Biol.*, 41, 995-1006pp
- Davies, H., Bethe, H.A., and Maximom, L.C.**, 1955, “Theory of Bremsstrahlung and Pair Production. II. Integral Cross Section for Pair Production,” *Phys. Rev.* 93 (1954) 788; and H. Olsen, “Outgoing and Ingoing Waves in Final States and Bremsstrahlung,” *Phys. Rev.* 991335.
- Eakins, J.S., Bartlett, D.T., Hager, L. G., Solsona C.M., and Tanner, R.J.**, 2007, The MCNP-4C2 Design Of A Two Element Photon/Electron Dosemeter That Uses Magnesium/Copper/Phosphorus Doped Lithium Fluoride Radiation Protection Dosimetry, 128, 1, 21–35pp.
- Eakins, J.S., Bartlett, D.T., Hager, L.G., and Tanner, R.J.**, 2008, Monte Carlo modelling of a TLD device containing <sup>7</sup>LiF:Mg,Cu,P detectors *Radiation Measurements*, 43, 631–635pp.
- Elwert, G.**, 1939, “Verschärte Berechnung von Intensität und Polarisation im Kontinuierlichen Röntgen spektrum,” *Ann. Physick*, 34178.
- Everett, C.J., and Cashwell, E.D.**, 1973, “MCP Code Fluorescence-Routine Revision,” Los Alamos Scientific Laboratory report LA-5240-MS.
- Freire, L., Calado, A., Cardoso, J.V., Santos, L.M., and Alves, J.G.**, 2008, Comparison of LiF (TLD-100 and TLD-100H) detectors for extremity monitoring, *Radiation Measurements*, 43, 646–650pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Furetta, C., Prokic, M., Salamon, R., Prokic, V., and Kitis, G.,** 2001, Dosimetric characteristics of tissue equivalent thermoluminescent solid TL detectors based on lithium borate, *Nuklear Instruments and Methods in Physics Research A*, 546, 411-417pp.
- Goudsmit S., and Saunderson, J.L.,** 1940, “Multiple Scattering of Electrons,” *Phys. Rev.*, 57, 24p.
- Grodstein, G.W.,** 1957, “X-Ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV,” National Bureau of Standards, Circular No. 583.
- Hançerlioğulları, A.,** 2006, Monte Carlo Simülasyon Metodu ve MCNP Kod Sistemi, *Kastamonu Education Journal*, 14, 2, 545-546s.
- Horowitz, Y.S.,** 1981, Theoretical and microdosimetric basis of thermoluminescence and applications to dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, 26, 4, 765-824pp.
- Hranitzky, C., Stadtmann H., and Olko, P.,** 2006, Determination of LiF:Mg,Ti and LiF:Mg,Cu,P TL efficiency for x-rays and their application to Monte Carlo simulations of dosimeter response, *Radiation Protection Dosimetry*, 119, 1–4, 483–486pp.
- Hubbell, J.H., Veigele, W.J., Briggs, E.A., Brown, R.T., Cromer, D.T., and Howerton, R.J.,** 1975, “Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections”, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 4, 471p.
- Hubbell, J.H., and Seltzer, S.M.,** 1995, Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements  $Z \frac{1}{4} 1$  to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. NIST, Report NISTIR 5632.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Jabbur R.J., and Pratt, R.H.**, 1963-1964, “High-Frequency Region of the Spectrum of Electron and Positron Bremsstrahlung,” *Phys. Rev.*,129, 184p; and “High-Frequency Region of the Spectrum of Electron and Positron Bremsstrahlung II,” *Phys. Rev.*,133, 1090p.

**Jung, H., Lee, K.J., and Kim, J.L.**, 2003,A personal thermoluminescence dosimeter using LiF:Mg,Cu,Na,Si detectors for photon fields. *Applied Radiation and Isotopes*, 59, 87–93pp.

**Kahn, H.**, 1956, “Applications of Monte Carlo,” AEC-3259 The Rand Corporation.

**Krane, K.S.**, 2001, Nükleer Fizik, 1

**Koblinger, L.**, 1975, “Direct Sampling from the Klein-Nishina Distribution for Photon Energies Above 1.4 MeV," *Nucl. Sci. Eng.*, 56, 218p.

**Landau, L.**, 1944, “On the Energy Loss of Fast Particles by Ionization,” *J. Phys. USSR*, 8,201p.

**Lux, I., and Koblinger, L.**, 1991, Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations, CRC Press, Boca Raton.

**Moscovitch, M., St. John, T.J., Cassata, J.R., Blake, P.K., Rotunda, J.E., Ramlo, M., Velbeck, K.J., and Luo, Z.**, 2006, The application of LiF:Mg,Cu,P to large scale personnel dosimetry: Current status and future directions, *Rad. Pro. Dos.*, 119, 1-4, 248-254pp.

**Obryk, B., Cywicka-Jakiel T., Budzanowski, M., Bilski, P., Harinitzky, C., Olko, P., and Stadtmann, H.**, 2008, Measurement and Monte Carlo Simulations of the response of the RADOS personal dosimeters with MTS-N and MCP-N thermoluminescent detectors to X- and gamma – rays *Radiation Measurements*, 43, 616-620pp.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Olko, P., Bilski, P., and Kim, J.L.**, 2002, Microdosimetrik interpretation of the photon energy response of LiF:Mg,Ti detectors. *Radiation Protection Dosimetry*, 100, 1–4, 119–122pp.
- Pratt, R.H., Tseng, H., Lee, C.M., Kissel, L., MacCallum, C., and Riley, M.**, 1981, “Bremsstrahlung Energy Spectra from Electrons of Kinetic Energy  $1 \text{ keV} < T < 2000 \text{ keV}$  Incident on Neutral Atoms  $2 < Z < 92$ ,” *Atom.Data and Nuc.Data Tables* 20.
- Prokic, M.**, 2002, Dosimetric characteristics of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu,Ag,P}$  solid TL detectors, *Radiation Protection Dosimetry*, 100, 1-4, 265-268pp.
- Şarer, B., Hançerlioğulları, A., ve Übeyli, M.**, 2003, Nükleer Hesaplamalarda Monte Carlo Yönteminin Kullanımı, 8. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Kongresi, Ekim 2003, Kayseri.
- Seltzer S.M., and Berger, M.J.**, 1985, “Bremsstrahlung Spectra from Electron Interactions with Screened atomic Nuclei and Orbital Electrons”, *Nucl. Instr. Meth.*, 12, 95p.
- Seltzer S.M., and Berger, M.J.**, 1986, “Bremsstrahlung Energy Spectra from Electrons with Kinetic Energy  $1 \text{ keV} - 10 \text{ GeV}$  Incident on Screened Nuclei and Orbital Electrons of Neutral Atoms with  $Z=1$  to 100”, *Atom. Data and Nuc. Data Tables*, 35, 345p.
- Seltzer, S.M.**, 1988, “Cross Sections for Bremsstrahlung Production and Electron Impact Ionization,” in *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*, edited by Theodore M. Jenkins, Walter R. Nelson, and Alessandro Rindi, Plenum Press, New York, 81.
- Storm, E., and Israel, H.I.**, 1967, “Photon Cross Sections from 0.001 to 100 MeV for Elements 1 through 100,” Los Alamos Scientific Laboratory report LA-3753.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Tseng H.K., and Pratt, R.H.,** 1971, “Exact Screened Calculations of Atomic-Field Bremsstrahlung,” *Phys. Rev.* A3100.

**Tseng H.K., and Pratt, R.H.,** 1974, “Electron Bremsstrahlung from Neutral Atoms,” *Phys. Rev. Lett.*,33, 516p.

**Tsoufanidis, N.,** 1983, Measurement and Detection of Radiation, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 571p.

**Yeğın G.,** 2002, Ir-192 Brakiterapi Kaynaklarının Dozimetrik Karakteristiklerinin Monte Carlo Yöntemi İle İncelenmesi, Doktora Tezi, E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü, 154s.

**ÖZGEÇMİŞ**

**Adı Soyadı** : Bünyamin Aydın

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Gediz – 01.03.1966

**Medeni Hali** : Evli

**Lisans, Fizik** : 1986 – 1992 İstanbul Üniversitesi,  
İstanbul

**Yüksek Lisans, (Nükleer Fizik)** : 1993 – 1997 Ege Üniversitesi, İzmir

“Gediz Nehrinin Ege Denizine Taşıdığı Doğal Radyoaktif Element Miktarının İncelenmesi”

Danışman: Doç. Dr. Mehmet N. KUMRU

**Doktora, Nükleer Bilimler (Fizik)** : 2014 Ege Üniversitesi, İzmir

“Bazı Termoluminesans Dedektörlerin Farklı Enerjilerdeki Fotonlara Karşı Dedektör Cevap Fonksiyonlarının Monte Carlo Yöntemiyle İncelenmesi”

Danışman: Prof. Dr. Mehmet N. KUMRU