

**BAZI ELEMENT VE BİLEŞİKLERDE 6 MV VE 18 MV
BREMSSTRAHLUNG RADYASYONU İÇİN VE BAZI
SU FANTOMLARINDA TEK ENERJİLİ X- IŞINLARI
İÇİN FOTON ETKİLEŞİM
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Alpdoğan ÇELİK

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Murat KURUDİREK
2012
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BAZI ELEMENT VE BİLEŞİKLERDE 6 MV VE 18 MV
BREMSSTRAHLUNG RADYASYONU İÇİN VE BAZI SU
FANTOMLARINDA TEK ENERJİLİ X- IŞINLARI İÇİN FOTON
ETKİLEŞİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Alpdoğan ÇELİK

FİZİK ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2012**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**BAZI ELEMENT VE BİLEŞİKLERDE 6 MV VE 18 MV BREMSSTRAHLUNG
RADYASYONU İÇİN VE BAZI SU FANTOMLARINDA TEK ENERJİLİ X- IŞINLARI
İÇİN FOTON ETKİLEŞİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Yrd. Doç. Dr. Murat KURUDİREK danışmanlığında, Alpdoğan ÇELİK tarafından hazırlanan bu çalışma 03/08/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rıdvan DURAK

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat KURUDİREK

İmza

Üye : Yrd.Doç. Dr. M. Tolga YURTCAN

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAZI ELEMENT VE BİLEŞİKLERDE 6 MV VE 18 MV BREMSSTRAHLUNG RADYASYONU İÇİN VE BAZI SU FANTOMLARINDA TEK ENERJİLİ X-İŞINLARI İÇİN FOTON ETKİLEŞİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Alpdoğan ÇELİK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat KURUDİREK

Bu çalışmada bazı elementlerin ve bileşiklerin foton azaltma katsayıları, foton etkileşim tesir kesitleri ve etkin enerjileri 6 MV ve 18 MV'luk *bremsstrahlung* radyasyonu için deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen etkin foton enerjilerinden verilen bileşiklerin etkin atom numaraları ve elektron yoğunlukları hesaplanmıştır. Ayrıca tıbbi açıdan önemli suya eşdeğer çeşitli su fantomları için geniş foton enerji aralığında kütle azaltma katsayılarının enerjiye bağlı değişimi incelenmiş ve çeşitli enerji aralıklarında uygun fit denklemleri elde edilerek, ampirik formüller türetilmiştir.

Element ve bileşiklerin öncelikle 6 MV ve 18 MV'luk fotonlar için deneysel olarak elde edilen kütle azaltma katsayıları kullanılarak, etkin atomik tesir kesitleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu etkin atomik tesir kesitleri kullanılarak uygun bir interpolasyon formülü yardımıyla element ve bileşiklerin etkin enerji değerleri belirlenmiştir. Etkin enerji değerleri kullanılarak bileşiklerin etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunlukları hesaplanmıştır. Ayrıca, suya eşdeğer çeşitli su fantomları için geniş bir foton enerji aralığında WinXcom programı yardımıyla kütle azaltma katsayıları elde edilerek, uygun enerji aralıklarında bu değerler interpolate edilerek kullanılabilir ve pratik yeni fit denklemleri oluşturulmuştur. Bulunan bu denklem verileri metodik veriler ile kıyaslanmıştır.

Literatürde şimdiye kadar etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu gibi parametreler genellikle tek enerjili fotonlar için hesaplanmıştır. Bu çalışmada enerji açısından heterojen yapıdaki megavolt X-ışınları için ilk defa etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunun bulunması için bir yöntem sunulmuştur. Ayrıca, çeşitli su fantomları için uygun foton enerji aralığında kullanılacak pratik fit denklemleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların metodik değerler ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

2012, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: Etkin atom numarası, foton azaltma katsayıları, tesir kesitleri, etkin elektron yoğunluğu, *bremsstrahlung* radyasyonu

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF PHOTON INTERACTION PARAMETERS IN SOME ELEMENTS AND COMPOUNDS FOR BREMSSTRAHLUNG RADIATION OF 6 MV AND 18 MV AND FOR MONO ENERGETIC X- RAY BEAMS IN SOME WATER PHANTOMS

Alpdoğan ÇELİK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Murat Kurudirek

In this study, photon attenuation coefficients, photon interaction cross sections and effective photon energies of some elements and compounds have been investigated experimentally for *bremsstrahlung* radiation of 6 MV and 18 MV. From the obtained effective photon energies, the effective atomic numbers and electron densities have been calculated for the given compounds. Also, variation of mass attenuation coefficients with energy has been investigated in the wide energy range for some water-equivalent phantoms which are medically important, and empirical formulas were derived using the appropriate fit equations.

Effective atomic cross sections of elements and compounds were calculated first by using experimental mass attenuation coefficients for 6 MV and 18 MV photons. These effective atomic cross sections were then used to determined effective photon energies of elements and compounds, with the help of appropriate interpolation formula. By using the effective energy values, effective atomic numbers and the effective electron densities have been calculated for compounds. Besides new, practical and also available fit equations have been derived by interpolation of mass attenuation coefficients for some water-equivalent phantoms in the appropriate energy regions.

In the literature, up to now, the parameters such as the effective atomic number and effective electron density have been generally calculated for mono energetic photons. In the present work, a method has been presented for the first time to calculate effective atomic numbers and electron densities for megavolt X-rays which are heterogeneous in energy. Moreover, practical fit equations which can be used in appropriate photon energy regions have been derived for some water phantoms.

2012, 51 pages

Keywords: Effective atomic number, photon attenuation coefficients, cross sections, effective electron density, *bremsstrahlung* radiation

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkoloji Bölümünde yapılmıştır.

Çalışmalarım boyunca her türlü desteği sağlayan çok değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat KURUDİREK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyasyon Onkoloji Bölümünde, çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen tüm çalışanlara, özellikle Korkmaz ŞERİFOĞLU ve Yılmaz ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bana her konuda destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Alpdoğan ÇELİK

Temmuz 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Gama Işınları	5
2.2. X-ışınları.....	5
2.2.1. Sürekli ve karakteristik X- ışınları	7
2.3. X-ışınlarının ve Gama-Işınlarnının Madde ile Etkileşmeleri	8
2.4. X-Işını ve Gama-Işını Azaltma Katsayıları	8
2.4.1. Lineer azaltma katsayısı	10
2.4.2. Kütle azaltma katsayısı.....	10
2.4.3. Atomik azaltma katsayısı	11
2.5.1. Toplam moleküler tesir kesiti.....	12
2.5.2. Toplam atomik tesir kesiti.....	13
2.5.3. Toplam elektronik tesir kesiti.....	14
2.6. Etkin Foton Enerjisi.....	14
2.7. Etkin Atom Numarası.....	15
2.7.1. İnterpolasyon yöntemi	15
2.7.2. Ampirik yöntem	15
2.8. Etkin Elektron Yoğunluğu.....	16
2.9. Veri Tabanları.....	16
2.9.1. XCOM ve WinXCom.....	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1. Lineer Hızlandırıcı	18
3.2. İyon Odası	20

3.3. Numunelerin Hazırlanması.....	21
3.4. Deney Geometrisi.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	28
4.1. Lineer Azaltma Katsayısı.....	28
4.1.1. Bileşikler.....	28
4.1.2. Elementler.....	29
4.2. Kütle azaltma Katsayısı.....	29
4.2.1 Bileşikler.....	29
4.2.2. Karışımlar.....	30
4.2.3.Elementler.....	38
4.3. Toplam Moleküler Tesir Kesiti.....	38
4.3.1. Bileşikler.....	39
4.4. Toplam Atomik Tesir Kesiti.....	39
4.4.1. Bileşikler.....	40
4.4.2. Elementler.....	40
4.5. Etkin Foton Enerjisi.....	41
4.6. Etkin Atom Numarası.....	41
4.7. Etkin Elektron Yoğunluk.....	44
5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	45
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGELER DİZİNİ

μ_a	Atomik Azaltma Katsayısı
b	Barn
Z_{etk}	Etkin Atom Numarası
τ	Fotoelektrik Tesir Kesiti
Z_{FE}	Foton Etkileşimi İçin Etkin Atom Numarası
σ	İnkoherent Saçılma Tesir Kesiti
α	Kısmi Elektron Sayısı
μ_m	Kütle Azaltma Katsayısı
Σ	Makroskopik Tesir Kesiti
μ_{mol}	Molar Azaltma Katsayısı
σ_a	Toplam Atomik Tesir Kesiti
σ_e	Toplam Elektronik Tesir Kesiti
σ_m	Toplam Moleküler Tesir Kesiti
μ	Lineer Azaltma Katsayısı
N_e	Etkin Elektron Yoğunluğu
N_A	Avogadro Sayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. X- ışınlarının oluşum mekanizması.....	7
Şekil 2.2. X- ve gama ışınlarının azaltılması.....	9
Şekil 2.3. Tesir kesiti ve şua şiddetinin numunede azaltılması.....	12
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı	19
Şekil 3.2. Lineer hızlandırıcının genel yapısı	26
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan iyon odasının şematik gösterimi	27
Şekil 3.4. Çalışmadaki ölçüm sisteminin elektronik bölümleri	27
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan plastik suya ait 12 MeV-30 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi	31
Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan plastik suya ait interpolate edilmiş 12 MeV-30 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi.....	32
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan katı suya ait 6 MeV-50 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi	35
Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan katı suya ait interpolate edilmiş 6 MeV-50 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi	36
Şekil 4.5. HgCl ₂ bileşiği için etkin atomik tesir kesiti ile enerjinin değişimi.....	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bileşiklerin numune kalınlığı	22
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan elementlerin numune kalınlığı	22
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan elementlerin birim yüzey alanındaki kütle miktarları.....	23
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan bileşiklerin birim yüzey alanındaki kütle miktarları.....	23
Çizelge 3.5 Katı su numunesine ait bileşim kesri oranları	24
Çizelge 3.6 Plastik su numunesine ait bileşim kesir oranları.....	24
Çizelge 3.7. Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı için 6 MV enerji düzeyinde deneysel koşullar.....	25
Çizelge 3.8 Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı için 18 MV enerji düzeyinde deneysel koşullar.....	25
Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde lineer azaltma katsayıları	28
Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan elementlerin 6 MV-18 MV enerjilerinde lineer azaltma katsayıları	29
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde kütle azaltma katsayıları	30
Çizelge 4.4. Çalışmada kullanılan plastik suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları	31
Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan plastik suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları fit değerleri.....	33
Çizelge 4.6. Çalışmada kullanılan katı suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları	34
Çizelge 4.7. Çalışmada kullanılan katı suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları fit değerleri	37
Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan elementlerin 6 MV-18 MV enerjilerinde kütle azaltma katsayıları	38
Çizelge 4.9. Çalışmada kullanılan bileşikler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam	

moleküler tesir kesitleri	39
Çizelge 4.10. Çalışmada kullanılan bileşikler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam atomik tesir kesitleri	40
Çizelge 4.11. Çalışmada kullanılan elementler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam atomik tesir kesitleri	40
Çizelge 4.12. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde etkin foton enerjileri.....	41
Çizelge 4.13. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde etkin atom numaraları.....	42
Çizelge 4.14. Çalışmada kullanılan bileşiklerin bağıl elektron kesri.....	42
Çizelge 4.15. Çalışmada kullanılan bileşiklerin ampirik formül değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	43
Çizelge 4.16. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV enerjisindeki etkin elektron yoğunlukları.....	44

1. GİRİŞ

X-ışını ve gama ışınlarının madde ile etkileşimleri radyasyon fiziği, medikal fizik ve dozimetri alanlarında kullanıma bağlı olarak, çoğu bilimsel, endüstriyel ve biyolojik işlemlerde uygulanmaktadır. Buna bağlı olarak, radyasyonun madde ile etkileşimi gama-aktif izotopların nükleer tanı bilimi (bilgisayarlı tomografi), radyasyondan korunma, nükleer tıp, radyasyon dozimetri, gama ışını floresans çalışmaları, radyasyon biyofiziği gibi bir çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmasıyla gittikçe önemi artan bir kavram haline gelmiştir. X- veya gama ışınlarından oluşan bir şua maddenin yüzeyine düştüğünde demeti oluşturan fotonların maddenin atomları ile etkileşmesiyle, bu şua soğurulur, saçılır ve/veya geçirilir (El-Kateb *et al.* 2000). Yoğunluktan bağımsız bir nicelik olan kütle azaltma katsayısı radyasyonun madde içinde azalmasını belirleyen uygun bir parametredir. Kütle azaltma katsayısı maddenin birim alan başına düşen birim kütlesiyle, gelen fotonlar arasında etkileşme olasılığını ifade eder. Radyasyon azaltma parametreleri özellikle kütle azaltma katsayıları, farklı foton enerjilerinde birçok değişik ortamda incelenmiştir. Yukarıda sözü edilen alanlarda kullanılmak üzere temel bilgiler sağlamanın yanında, teoriye dayalı parametrelerin geçerli olduğu bölgelerin belirlenmesi açısından da foton kütle azaltma katsayılarının doğru değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Gowda *et al.* 2004). Kütle azaltma katsayıları kullanılarak moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu gibi birçok diğer önemli parametre elde edilebilir.

Radyasyonun madde ile etkileşimini ifade eden en temel parametrelerden X-ışını ve gama ışını azaltma katsayılarının ölçümleri ve hesaplanmaları ile ilgili literatürde yeterince çalışma bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse, bu azaltma katsayıları elementlerde (Davisson and Evans 1951; Davisson and Evans 1952; McCrary *et al.* 1967; Conner *et al.* 1970; Goswami and Chaudhuri 1973; Tartari *et al.* 1998; Prešeren and Kodre 1999), bileşiklerde (Angelone *et al.* 2001; Turgut *et al.* 2002; Turgut *et al.* 2005), alaşımlarda (El-Kateb *et al.* 2000; Kaewkhao *et al.* 2008), sulu ortamlarda (Kaur *et al.* 2000; El-Kateb 2001), camlarda (Singh *et al.* 2002; Singh *et al.* 2006; Singh *et al.* 2008), suda (Reddy *et al.* 1999; Sidhu *et al.* 1999), biyolojik maddelerde

(Singh *et al.* 2002), dedektörlerde (Bhandal and Singh 1996) çalışılmıştır. 1 keV'den 20 MeV'e kadar değişen foton enerjilerinde birçok sayıda element için kütle azaltma katsayıları ve kütle enerji soğurma katsayıları daha önce tablo edilmiştir (Hubbell and Seltzer 1995). Bu tablolar, daha önce belirtilen değerlerin yeniden düzenlenmiş ve genişletilmiş halidir (Hubbell 1982). Ayrıca, kütle azaltma katsayıları 1 keV'den 100 GeV'e kadar değişen enerjilerde de sunulmuştur (Lide 1996). Bu tablo değerleri, 1 keV ile 100 GeV arasındaki enerjiler için herhangi bir element, bileşik ya da karışımın foton etkileşim tesir kesitlerinin veya kütle azaltma katsayılarının hesaplanması için geliştirilen ve XCOM adı verilen bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilebilmektedir (Berger and Hubbell 1987-1999). Daha sonra bu program, tesir kesiti ve kütle azaltma verilerinden oluşan tabloları önceden tanımlanmış bir Microsoft Excel şablonuna taşıma kolaylığı sağlayan WinXCom adı verilen bir program sayesinde Windows ortamına taşınmıştır (Gerward *et al.* 2001).

Elementler için literatürde foton etkileşim parametrelerini gösteren geniş veri tabanları bulunmaktadır. Bileşiklerde, karışımlarda veya kompozit maddelerde bu çalışmaların elementlere oranla daha sınırlı oranda olduğu görülmektedir. X-ışını ve gama ışınlarının azaltılması bir elementin atom numarasına ve yoğunluğuna bağlıdır. Bileşik, karışım yâda kompozit maddeler söz konusu olduğunda, X-ışını ve gama ışınlarının azaltılması o maddenin yoğunluğuna ve etkin atom numarasına bağlıdır.

Madde ile radyasyonun farklı enerjilerde farklı kısmi etkileşiminden dolayı etkin atom numarası enerjiye bağlı bir parametre olup maddedeki farklı atom numaraları da birbirinden farklı ağırlıklandırılmalıdır (Hine 1952). Etkin atom numarasının fiziksel bir mana olup birden fazla elementten oluşan madde hakkında temel bilgiler sağlar. Etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu gibi temel sabitlerle uygun formüller yardımıyla verilen bir ortamdaki enerji soğurulması hesaplanabilir. Etkin atom numarası ayrıca radyasyonun madde ile etkileşimini gösteren bir nicelik olması nedeniyle radyasyon zırlama tasarımı, soğurulan doz ve foton yığılma faktörlerinin hesaplanmasında da kullanılabilir. Bazı durumlarda bir maddenin kimyasal kompozisyonu hakkında ilk bilgileri elde etmek için etkin atom numarası kullanılabilir. Örneğin, büyük etkin

atom numarasına sahip maddeler genellikle inorganik bileşiklere ve metallere karşılık gelirken küçük etkin atom numarasına sahip maddeler organik içerikli maddelerin bir göstergesidir (Manohara *et al.* 2008).

Çoğu farklı madde ortamlarında etkin atom numarasını hesaplamayı gösteren birçok çalışma literatürde mevcuttur. Örneğin, alaşımlarda (El-Kateb *et al.* 2000; Murty 2000; Murty 2004; Kaewkhao *et al.* 2008; Kurudirek *et al.* 2010), çözelti ve çözücülerde (Kaur *et al.* 2000; El-Kateb 2001; Singh *et al.* 2007), aminoasitler ve şekerlerde (Gowda *et al.* 2005; Manohara and Hanagodimath 2007), yağ asitleri ve karbonhidratlarda (Manohara *et al.* 2008), dedektörlerde (Bhandal and Singh 1996), çimentolarda (Bhandal and Singh 1993; Kurudirek *et al.* 2010), bileşiklerde (Perumallu *et al.* 1984; Lingam *et al.* 1984; Singh *et al.* 1996; Kumar and Reddy 1997; Özdemir and Kurudirek 2009) bu parametreler incelenmiştir. Bazı araştırmacılar termoluminesans, dozimetrik ve biyolojik olarak önemli olan bileşiklerde etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunu hesaplamak için piece-wise interpolasyon ve matris metotlarını başarıyla uygulamışlardır (Gowda *et al.* 2004; Manjunathaguru and Umesh 2006; Manjunathaguru and Umesh 2007). Ayrıca, foton etkileşiminden başka foton enerji soğurulması da çeşitli madde ortamlarında incelenmiştir (Shivaramu and Ramprasath 2000; Shivaramu *et al.* 2001; Manohara and Hanagodimath 2007; Manohara *et al.* 2009). Bundan başka foton enerji soğurması için etkin atom numarasının 200-1500 keV aralığında dolaylı yoldan yarı deneysel olarak elde edilmesi için bir model sunulmuştur (Kurudirek 2011).

Megavolt düzeyinde *bremstrahlung* X-ışınları radyasyonu, megavolt düzeyinde hızlandırılan elektronların hedef madde içinde adım adım yavaşlaması ile elde edilmektedir. *Bremstrahlung* radyasyonu yüksek hızlı bir elektron çekirdeğin yakınından geçerken çekirdeğin çekim kuvveti sebebiyle elektronun yolundan saptırılmasıyla elde edilir. Bu durum bir ivmelenmeye sebep olur. İvmelenen bir yük de elektromagnetik ışımaya yapar, yani foton salar. Oluşan bu ışınımaya “frenleme ışınımı” anlamındaki *bremstrahlung* radyasyonu denir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve etkin elektron

yoğunluğu gibi foton madde etkileşim parametreleri genellikle tek enerjili foton radyasyonu için hesaplanmıştır. Lineer azaltma katsayısı ve kütle azaltma katsayısı *bremstrahlung* radyasyonu için farklı uygulamalarda Beer-Lambert yasası kullanılarak elde edilmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda foton etkileşim parametrelerinden etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu, genellikle tek enerjili fotonlar için elde edilmiştir ve megavolt (MV) düzeyinde çok enerjili *bremstrahlung* radyasyonu için bu parametreler daha önce hesaplanmamıştır. Bu çalışmamızda radyasyon azaltma parametreleri *bremstrahlung* radyasyonu altında ele alınmıştır. Ayrıca, MV X-ışınları için etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunun hesaplanması üzerine bir model sunulmuştur. *Bremstrahlung* radyasyonu için bazı element ve bileşiklerde çeşitli foton azaltma parametreleri incelenerek, çok enerjili fotonlar için etkin foton enerjileri ve radyasyon azaltma parametreleri 6 MV ve 18 MV'luk sürekli X- ışınları için deneysel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, suya eşdeğer bazı plastik ve katı su fantomlarında lineer azaltma katsayıları geniş bir enerji aralığında incelenmiş ve uygun enerji aralıklarında bu parametrenin elde edilebileceği ampirik formüller elde edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Gama Işınları

Radyoaktif bozunum veya bir nükleer reaksiyondan sonra uyarılmış enerji seviyesinde kalan çekirdek ikinci bir bozunum ile bir foton yayınlamaya daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban enerji seviyesine düşer. Böylelikle enerji seviyeleri arasındaki bu geçiş sırasında yayınlanan fotonlara gama ışını denir.

Gama ışınlarının enerji aralığı genel olarak 0,1 – 10 MeV arasındadır. Çekirdek durumları arasındaki enerji farkı mertebesi 10^4 ile 10^2 fm dalga boyu aralığına karşılık gelir. Gama ışınları elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu ve en fazla enerjili olanlarıdır. Bir kütleyle sahip değildir ve yüksüzdürler. Elektrik ve manyetik alanda etkilenmezler. Yüksek enerjili olduklarından madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar ve gazları iyonlaştırabilirler.

Evrende gama ışınlarının meydana gelmesini sağlayan çeşitli işlemler vardır. Bu işlemler,

- Yüksek enerjili bir parçacığın bir başka parçacık ile çarpışması,
- Bir parçacık ve onun karşıt parçacığının birbirlerini yok etmesi,
- Radyoaktif bozunma,
- İvmelendirilmiş yüklü parçacıklar,

şeklinde verilir.

2.2. X-ışınları

Kaynağından doğru çizgiler boyunca ıraksayan, uzaya doğru dalga veya parçacıklar şeklinde yayılan enerjiye radyasyon denir. Bu tanım kapsamında, doğal ya da yapay

radioaktif çekirdeklerin kararlı hale geçebilmek için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri, ivmeli hareket eden yüklü parçacıkların ışıdığı enerji, genel anlamda radyasyon olarak adlandırılır. Radyasyonu genel olarak parçacık ve dalga tipi radyasyon olarak iki şekilde sınıflandırabiliriz. Parçacık radyasyonu; belli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden minik parçacıkları ifade eder. Bunlar hızla giden mermilere benzerler, ancak çıplak gözle doğrudan görülemeyecek kadar küçüktürler. Dalga tipi radyasyon ise belli bir enerjiye sahip ancak kütsüz radyasyon çeşididir. Bunlar, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgaları gibidir (elektromanyetik dalgalar). Bütün elektromanyetik radyasyonlar ışık hızıyla (boş uzayda $\sim 3 \times 10^8$ m/s) hareket ederler.

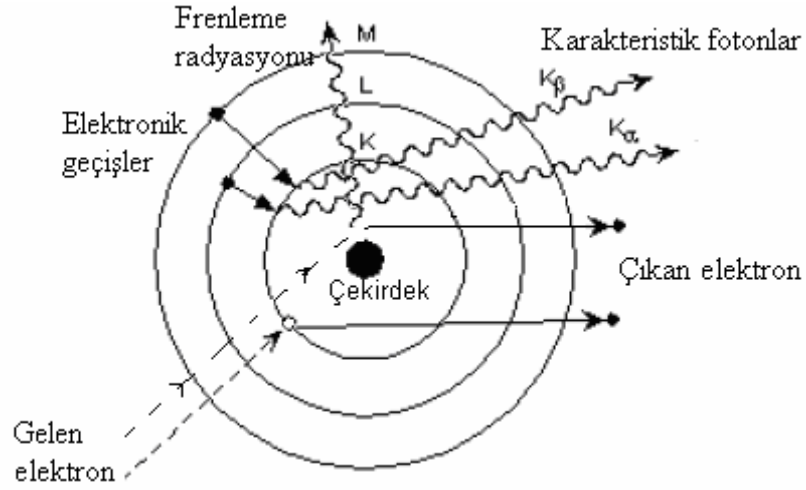
Parçacık ve dalga tipi radyasyonları, özellikleri itibariyle de iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar; iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır. İyonlaştırıcı radyasyon, çarptığı madde de yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşturabilen radyasyon demektir. İyonlaşma, herhangi bir maddede meydana gelebileceği gibi insanlar dahil tüm canlılarda da oluşabilir. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyonlar, önlem alınmadığı takdirde tüm canlılar için oldukça zararlı olabilecek radyasyon çeşitleridir. Başlıca beş çeşit iyonlaştırıcı radyasyon vardır. Bunlar alfa parçacıkları, beta parçacıkları, X-ışınları, gama ışınları ve küçük ihtimalli de olsa nötronlardır.

X-ışınları, yaklaşık 10^{-8} m ile 10^{-13} m aralığında dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalardır. X-ışınlarının en genel kaynağı bir metal hedefi bombardımana tabi tutan yüksek enerjili elektronların yavaşlamasıdır. Bunlar ayrıca, elektronların yörünge atlaması ile de meydana gelebilirler.

X-ışınları tıpta bir tanı aracı olarak ve belirli kanser türlerinin tedavisinde kullanılır. X-ışınları canlı dokulara ve organizmalara zarar verici veya öldürücü etki yaptığından, bu ışınlara gereksiz yere maruz kalmanın önlenmesine dikkat edilmelidir. X-ışınları kristal yapının incelenmesinde de kullanılır; çünkü, X-ışını dalga boyları katı cisimlerdeki atomlar arası uzaklık (0,1 nm) mertebesindedir.

2.2.1. Sürekli ve karakteristik X- ışınları

X-ışınları, uygun enerjili elektronların yörüngesindeki elektronlarla veya atomun çekirdeği ile etkileşmeleri sonucunda oluşur (Kato 2004). X-ışını üretmek için iki tür atomik işlem vardır. Etkileşme türüne göre X-ışını üretiminin biri karakteristik X-ışını yayılımı, diğeri sürekli spektruma sahip sürekli X- ışını veya frenleme ışınımı anlamına gelen *bremstrahlung*'dur. İki atomik islemin yer aldığı X-ışını oluşumu mekanizmaları Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. X- ışınlarının oluşum mekanizması

Karakteristik X-ışınlarının oluşması için hedef atoma gönderilen elektronlar hedef atomun yörüngesindeki elektronlarla etkileşmesi neticesinde alınan enerji ile üst enerji seviyelerine çıkarlar veya atomu terkederler. Bu durum atomun uyarılmış durumudur. Kararsız haldeki belirtilen enerji seviyeleri bozduğunda dışarıya foton salınımı yapılır. Seviyeler arasındaki enerji farkı kadar enerjiye sahip olan bu fotonlara karakteristik X-ışınları denir. Elektron demeti, atomun çekirdeğine yaklaştığında, çekirdeğin pozitif yükünden kaynaklanan elektrik alan etkileşiminden ivmeli hareket yaparak fotonlar yayar. Sürekli bir enerji spektrumuna sahip bu fotonlara sürekli X-ışınları da denir. Bu olaya da *bremstrahlung* veya frenleme ışınımı adı verilir. K-kabuğu yayılımı atom ve moleküllerdeki iç elektron geçişleridir (Renner *et al.* 2004).

Karakteristik X- ışınları elektronların büyük ölçüde orbitaller arası elektron geçişi ve büyük bir oranda hedefin belli enerjili elektronlar veya başka yüklü parçacıklar ile bombardıman edilmesi ile üretilir. Elektron hedeften iç elektronlara doğru nüfuz ederek atomları kararsız hale getirir. Kararlı hale gelmek için, atomlar dış değerlikli elektronlarını daha iç seviyelere geçirirler. Enerjideki bu değişim foton salınımına neden olur, bu fotonlar X- ışını enerjisine sahiptirler. Yüklü parçacıklar hızlandığında ve ışınım yaptığı da X-ışınları üretilir. Çoğu X-ışını kaynağında yüksek enerjilerde sürekli bant radyasyon çıkışı olmasına rağmen, frenleme ışını olarak bilinen X- ışını spektrumları karakteristik olarak dar çizgi spektrumundan oluşmuştur.

2.3. X-ışınlarının ve Gama-Işınlarının Madde ile Etkileşmeleri

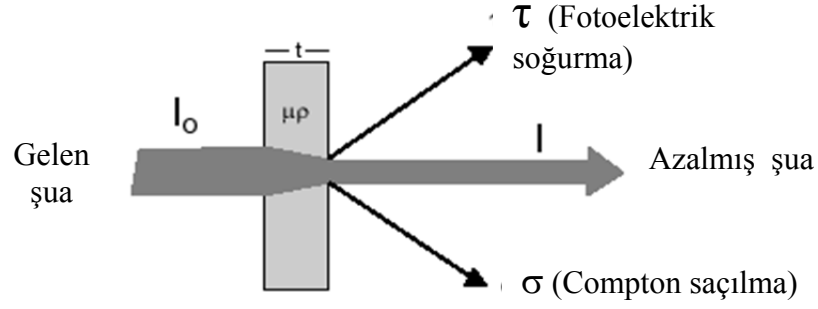
X-ışınlarının gözlemlenmesi onların enerji spektrumlarının ve madde ile etkileşmelerinin incelenmesi ile mümkündür. Bu ışınların madde ile etkileşmelerini, etkileşme alanlarına göre aşağıdaki gibi gruplandırmak mümkündür.

- 1-Atomun elektronu ile etkileşme.
- 2-Çekirdekle etkileşme.
- 3-Çekirdek ve elektronların etrafındaki elektrik alanla etkileşme.
- 4-Çekirdek çevresindeki mezon alanı ile etkileşme.

X-ışınlarının madde ile etkileşmeleri, etkileşme tarzlarına göre azaltma, saçılma ve çift oluşum olayları olarak incelenebilir. X-ışınlarının madde ile etkileşmesinde çeşitli azaltma ve saçılma olayları meydana gelebilmesine rağmen, en fazla gözlenen azaltma şekli fotoelektrik azaltma, saçılma biçimi ise *Compton* saçılmasıdır.

2.4. X-Işını ve Gama-Işını Azaltma Katsayıları

dt kalınlığında olan bir maddenin üzerine gelen şuanın şiddeti, maddeyi geçtikten sonra azalacaktır.



Şekil 2.2. X- ve gama ışınlarının azaltılması

Bu azalış;

$$-dI_0 = I_{son} - I_{ilk} = I_{geçen} - I_{gelen} = I - I_0 < 0 \quad \text{şeklinde} \quad \text{gösterilebilir.}$$

Söz konusu dI_0 pozitif bir nicelik olup şiddetteki azalmadan ötürü negatif işaretlidir. Bu azalma gelen şuanın şiddeti ve maddenin kalınlığıyla doğru orantılıdır. Buradaki orantı katsayısına azaltma katsayısı (μ) denilirse;

$$-dI_0 = \mu I_0 dt \quad (2.1)$$

yazılabilir. Buradan,

$$\int_{I_0}^I \frac{dI_0}{I_0} = -\int_0^t \mu dt \quad (2.2)$$

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.3)$$

bulunur. $I = I_0 e^{-\mu t}$ ifadesi "Beer-Lambert kanunu" olarak ifade edilir. Bu eşitlikten yazılan

$$\text{Geçen şiddet / Gelen şiddet} = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (2.4)$$

ifadesi geçme ihtimalini verir. Madde birden fazla saf elementten oluşmuşsa, maddeyi meydana getiren elementlerin toplam azaltma katsayılarının ağırlıklı ortalaması

$$\mu = \sum_m C_m \mu_m \quad (2.5)$$

eşitliğinden bulunabilir. C_m numune içinde m . elementin ağırlık kesri, μ_m ise m . elementin azaltma katsayısıdır.

Yukarıdaki belirtilen azaltma katsayısı dört şekilde tanımlanmaktadır:

2.4.1. Lineer azaltma katsayısı

Birim yüzeyin, birim kalınlığı başına düşen enerji azaltma kesrine denir. Başka bir ifadeyle birim yüzeydeki gelen enerjinin birim kalınlıktaki azaltılma oranıdır.

$$\mu = \frac{\ln(I/I_0)}{t} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (2.6)$$

Lineer azaltma katsayısı; gelen fotonun enerjisine, geçtiği maddenin atom numarasına, kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı bir niceliktir. Lineer azaltma katsayısı ortama giren gama radyasyonunun madde ile etkileşim faktörlerindedir.

2.4.2. Kütle azaltma katsayısı

Birim alandaki birim kütle başına düşen azaltma oranını ya da alınan enerji kesrini verir:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} (cm^2 / g) \quad (2.7)$$

ile verilir. ρ yoğunluğu temsil etmektedir. Kütle azaltma katsayısı yoğunluktan ve kalınlıktan bağımsız bir niceliktir. Kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısının yoğunluktan bağımsız bir durumu da denilebilir.

2.4.3. Atomik azaltma katsayısı

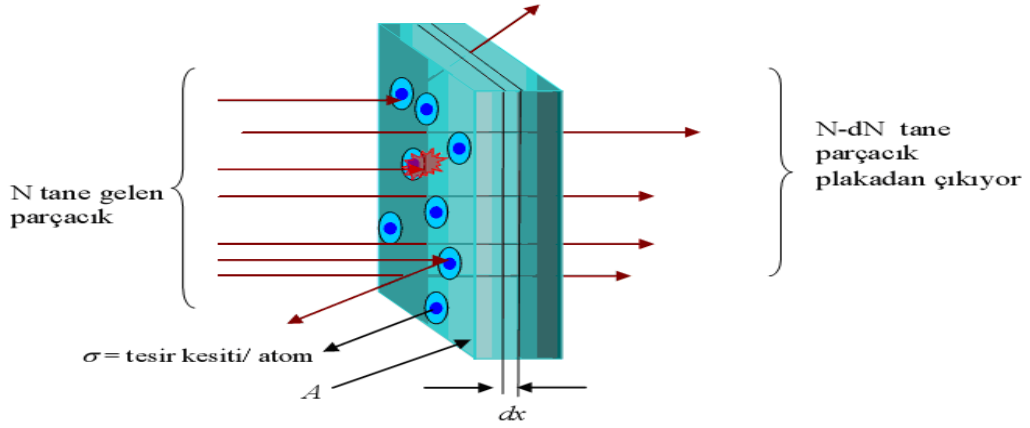
Birim alanda atom başına düşen azaltmayı oranıdır. Şöyle ifade edilir:

$$\mu_a = \frac{\mu A}{\rho N} = \frac{\mu}{n} (cm^2 / atom) \quad (2.8)$$

Burada A , atomik kütle ve N , Avagadro sayısıdır. n , atom sayısını ifade eder.

2.5. Tesir Kesiti

Nükleer fizikte yapılan tüm çalışmaların esası radyasyonun madde ile olan etkileşimi temeline dayanır. Hedef parçacıkla gelen radyasyonun belli bir düzeyde ve biçimde etkileşme olasılığını en verimli ve kullanışlı yoldan belirtmek için tesir kesiti ifadesi kullanılır. Tesir kesiti etkileşmelerin gerçekleşme olasılığının bir ölçüsüdür. Tesir kesiti, deneysel olarak ölçülebilen, deneysel ve teorik değerleri karşılaştırılabilen bir kavram olduğundan, nükleer işlemlerin ayrıntılı olarak incelenmesine imkân sağlar. Tesir kesiti, soğurma tesir kesiti, saçılma tesir kesiti gibi ışının madde ile etkileşmesine göre isimlendirilir. Tesir kesiti hakkındaki doğru bilgiler reaktör zırhlama, endüstriyel radyografî, tıbbi fizikte enerji taşıma ve depolama konularında, radyasyon azaltma katsayılarının hesaplanmasında ve X-ışını kristalografisine ilaveten birçok alanlarda kullanılmaktadır (Kurudirek 2011).



Şekil 2.3. Tesir kesiti ve şua şiddetinin numunede azaltılması

Birim alana ve dx kalınlığına sahip ince bir levha üzerine N parçacıktan (veya ışıdan) oluşan bir parçacık (veya ışın) şuasını göz önüne alalım, maddenin birim hacminde n atom ve toplam maddedeki N atomdan, N_s tanesinde etkileşme oluyorsa etkileşme tesir kesiti σ ,

$$\sigma = \frac{N_s}{Nnx} \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Böylelikle, $N_s = Nnx\sigma$ olacaktır. Tesir kesitinin birimi barn'dır.

2.5.1. Toplam moleküler tesir kesiti

Molekül başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesitidir. Toplam moleküler tesir kesiti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{\sum n_i A_i}{N_A} \text{ (barn / molekül)} \quad (2.10)$$

n_i , i. bileşiğin toplam atom sayısı, A_i , i. bileşiğin toplam atomik kütleini ifade etmektedir.

2.5.2. Toplam atomik tesir kesiti

Atom başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesitidir. Toplam atomik tesir kesiti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_m}{\sum_i n_i} (\text{barn / atom}) \quad (2.11)$$

Farklı olarak toplam atomik tesir kesiti, numunenin toplam kütle azaltma katsayısının numunenin bir gramındaki toplam atom sayısına bölünerek de bulunulabilir.

$$\sigma_a = \frac{(\mu/\rho)_c}{N_A \sum_i \frac{w_i}{A_i}} (\text{barn / atom}) \quad (2.12)$$

$(\mu/\rho)_c$, bileşiğin kütle azaltma katsayısı, w_i , i nci elementin ağırlıkça yüzdesi ve A_i ise i nci elementin atomik kütleidir.

Toplam atomik tesir kesiti kısmi foton etkileşim tesir kesitlerinin toplamı olarak da yazılabilir:

$$\sigma_{top} = \sigma_{fe} + \sigma_{inkoh} + \sigma_{koh} + \sigma_{çift} + \sigma_{üçlü} + \sigma_{nük.fe} \quad (2.13)$$

Burada σ_{fe} atomik fotoelektrik olayı tesir kesiti, σ_{inkoh} ve σ_{koh} sırasıyla inkoherent (*Compton*) ve koherent (*Rayleigh*) tesir kesitleri, $\sigma_{çift}$ ve $\sigma_{üçlü}$ ise sırasıyla çekirdek alanındaki ve atomik elektronların oluşturdukları alandaki elektron-pozitron çift

oluşumu için tesir kesitleri ve $\sigma_{nük.fe.}$ de nükleer fotoelektrik olayı tesir kesitidir (Hubbell 1999).

2.5.3. Toplam elektronik tesir kesiti

Elektron başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesitidir. Toplam elektronik tesir kesiti,

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i (\text{barn / elektron}) \quad (2.14)$$

ile verilir. Burada, N_A (atom/g) Avagadro sayısı, A_i i nci elementin atomik kütlesi ve Z_i ise i . elementin atom numarasıdır. f_i , i . elementin kısmi bolluğudur. $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$, numunede var olan i . elementin kütle azaltma katsayısıdır.

2.6. Etkin Foton Enerjisi

Megavolt düzeyindeki X- ışınları enerji açısından heterojen olması nedeniyle bu durumdaki X- ışını enerjilerini etkin foton enerjisi olarak ifade etmek daha uygun olacaktır. Megavolt düzeyindeki X –ışını için etkin enerji kavramı aynı atomik tesir kesitine sahip tek enerjili foton demetinin enerjisi olarak ifade edilebilir. Kullanılan numuneler için azaltma eğrileri etkin atomik tesir kesiti ile karakterize edilir. Böylelikle etkin foton enerjisi, çok enerjili X-ışınları ile aynı etkin atomik tesir kesitine sahip tek enerjili fotonların enerjileri bulunarak belirlenebilir. Bu çalışmada 6 MV ve 18 MV enerjili fotonlar için etkin foton enerjileri, toplam atomik tesir kesitleri değerleri kullanılarak logaritmik interpolasyon formülü yardımıyla belirlendi. Bu formül aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_{eff} = \frac{E_1(\log \sigma_2 - \log \sigma) + E_2(\log \sigma - \log \sigma_1)}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (2.15)$$

Burada σ_1 ve σ_2 numunelerin atomik tesir kesitinin (σ) arasında yer aldığı tesir kesiti değerleri, E_1 ve E_2 ise σ_1 ve σ_2 tesir kesitlerine karşılık gelen foton enerjileridir.

2.7. Etkin Atom Numarası

2.7.1. İnterpolasyon yöntemi

Etkin atom numarası logaritmik interpolasyon yöntemi kullanılarak elde edilebilir. Bileşiklerin toplam atomik tesir kesiti değeri WinXCom (Gerward *et al.* 2001; Gerward *et al.* 2004) veritabanı yardımıyla elde edilen azaltma tesir kesiti değerlerinde, belirli enerjilerde interpolate edilerek, aşağıdaki logaritmik interpolasyon formülü ile etkin atom numarası elde edilebilir (Singh *et al.* 2007):

$$Z_{eff} = \frac{Z_1(\log \sigma_2 - \log \sigma) + Z_2(\log \sigma - \log \sigma_1)}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (2.16)$$

burada σ_1 ve σ_2 bileşiğin atomik tesir kesitinin (σ) arasında yer aldığı elementel tesir kesiti değerleri, Z_1 ve Z_2 ise σ_1 ve σ_2 tesir kesitlerine karşılık gelen elementlerin sahip olduğu atom numaralarıdır.

2.7.2. Ampirik yöntem

Etkin atom numarası ayrıca ampirik formüller yardımıyla da bulunabilir. Aşağıdaki Mayneord formülü kullanılarak etkin atom numarası hesaplanabilir (Khan 2010):

$$Z_{eff} = \sqrt[2,94]{\sum_{i=1}^n \alpha_i Z_i^{2,94}} \quad (2.17)$$

burada α_i i . elementin bağıl elektron yoğunluğu kesrini ifade eder.

2.8. Etkin Elektron Yoğunluğu

Birim kütle başına düşen elektron sayısı olarak tanımlanan etkin elektron yoğunluğu N_e , etkin atom numarasıyla yakından ilişkilidir. Bir element için, elektron yoğunluğu $N_e = N_A Z / A$ ifadesi ile verilmektedir. Bu ifade bir bileşik için şu şekilde genelleştirilebilir:

$$N_e = N_A \frac{nZ_{Etk}}{\sum_i n_i A_i} = N_A \frac{Z_{Etk}}{\langle A \rangle} \quad (2.18)$$

burada, $\langle A \rangle$ bileşiğin ortalama atomik kütlesidir. Etkin elektron yoğunluğu ayrıca şu şekilde de ifade edilebilir:

$$N_e = \frac{\mu / \rho}{\sigma_e} (\text{elektron/g}) \quad (2.19)$$

2.9. Veri Tabanları

2.9.1. XCOM ve WinXCom

Berger and Hubbell (1987/99) 1 keV-100 GeV enerji aralığında herhangi bir element, bileşik ya da karışım için foton etkileşim tesir kesitlerini veya kütle azaltma katsayılarını hesaplamak üzere XCom adlı bir program geliştirmişlerdir. 1 keV'den 20 MeV'e kadar değişen foton enerjilerinde birçok sayıda element için kütle azaltma katsayıları ve kütle enerji soğurma katsayıları daha önce tablo edilmiştir (Hubbell and Seltzer 1995). Daha sonra, bu çok iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan XCom programı Gerward *et al.* (2001, 2004) tarafından Windows ortamına taşınmıştır. Programın

WinXCom adı verilen bu Windows sürümü, Windows işletim sistemi ile çalışmakta ve malzemeleri bir malzeme tanım listesinde tanımlamak, yeniden tanımlamak ve kaydetmek üzere tasarlanan ara yüzü sayesinde, kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Bu program sayesinde herhangi bir element, bileşik ya da karışımın kütle azaltma katsayıları, atomik fotoelektrik olay, inkoherent, koherent saçılma ve çift oluşumu gibi kısmi foton etkileşimleri için bulunabileceği gibi, toplam foton etkileşimi hesaplanması için de kullanılabilir. WinXCom kaydedilen verileri bir Microsoft Excel ortamına aktarabilmektedir. Dolayısıyla daha sonra yapılacak olan sayısal ve grafik işlemlerde kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada çeşitli su fantomları için kütle azaltma katsayıları teorik olarak WinXCom programı yardımıyla elde edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Lineer Hızlandırıcı

Bu çalışmada Erzurum Araştırma Hastanesinde var olan Siemens Primus™ platform modeli lineer hızlandırıcı kullanılmıştır. Lineer hızlandırıcıda farklı enerjilerde (6 ve 18 MV) foton ve 6, 8, 10, 12 ve 15 MeV şeklinde elektron enerjisi üretebilmektedir. Lineer hızlandırıcılar, sık kullanılan radyoterapi cihazları arasında önemli bir yer oluşturmaktadır. Lineer hızlandırıcılar, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları kullanarak elektronları doğrusal tüp boyunca hızlandıran cihazlardır (Khan 2003). Depolanmış elektrik akımı, 50 ila 200 Hz frekansında belli aralıklarla titreşimin oluşturulduğu mikrodalga üreteçleri *magnetron* adı verilen kısma ve elektron tabancasına gönderilir. Titreşimlerle eş zamanlı olarak ısıtılan flamandan serbest hale gelen elektronlar, kinetik enerjilerinin artırılması için elektromanyetik alan içinde hızlandırılırlar. Hızlandırılmış bu yüksek enerjili elektronlar genellikle yüzeysel tümör tedavilerinde kullanıldığı gibi, elektronların tungsten gibi yüksek atom numaralı bir hedefe çarptırılmalarıyla elde edilen *bremssstrahlung* X-ışınları da derine yerleşmiş tümör tedavilerinde kullanılır (Khan 2003). *Heterojen* yapıdaki X-ışınları enerjisi, X-ışını tüpünde oluşturulan voltaj ile üretilmiş olması nedeniyle megavolt (MV) olarak belirtilir. Lineer hızlandırıcılar yüksek enerjili olmaları nedeniyle saçılan ışınlar azdır. Lineer hızlandırıcılarda ışın eksenine dik bir düzlemde, merkezi ışıdan uzaklaştıkça özellikle alan kenarlarına yakın kısımlarda, yarı gölge şeklinde *penumbra* olarak tanımlanan doz azalması meydana gelir.

Şekil 3.1'de çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı cihazı görülmektedir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı

Lineer hızlandırıcının baş kısmı kurşun, tungsten veya bunların alaşımından yapılmıştır. Lineer hızlandırıcı kaynak, X-ışını oluşumu için elektron demetinin çarpıldığı hedef, birinci *kolimatör*, düzleştirici filtre ve çok yapraklı *kolimatör* bölümlerinden oluşur.

Lineer hızlandırıcı kaynak bölümü kaynak boyutunun belirlendiği bölümdür. Odaklanan derinlikteki alan keskinliği, kaynak ve odak noktası boyutuna bağlıdır. X-ışını oluşumu için elektron demetinin çarpıldığı hedef genellikle büyük atom numarasına ve yüksek erime sıcaklığına sahip olan ağır metallerdir. Hızlandırılmış elektronların bu hedefe çarparak enerjilerinin bir kısmı X-ışınına dönüşürken, kalan diğer enerji hedef tarafından soğrulur ve ısı enerjisine dönüşür. Bu nedenle hedef soğutma işlemi su ile yapılır lineer hızlandırıcıda birinci *kolimatör* tungstenden yapılmıştır. Hareketlidir ve iki pozisyona sahiptir. Birinci pozisyon düşük enerjili X-ışını ve elektronlar için kullanılır. İkinci pozisyonda düşük atom numaralı maddeden yapılmış düzleştirici filtre ve demet sertleştirici filtre vardır. Düzleştirici filtre bölümü X-ışınlarını *homojen* hale getirmek ve alanda ışın demet yoğunluğunu düzleştirmek için koni şeklinde olup, tungstenden yapılmıştır. Çok yapraklı *kolimatör* kısmı tungstenden yapılmış karşılıklı yapraklardan oluşur. Ayrıca lineer hızlandırıcılarda *elektronik portal* görüntüleme cihazı lineer hızlandırıcıya eklenmiş bir cihaz olup, çalışılan alanı iki boyutlu olarak görüntülemeyi sağlar.

3.2. İyon Odası

İyon odası radyasyon enerjisini elektrik sinyaline dönüştüren fiziki araçlardır. İyon odaları kalibre edilerek elektrik sinyali, radyasyon doz değerine çevrilir. İyon odası 10^2 - 10^3 Volt değerleri arasında çalışan iki elektrot ve elektrotları izole eden gaz kısımlarından oluşur. İyon odasındaki gaz kısmının hacmi kullanıma bağlı olarak 10^{-2} – 10^4 cm³ arasında değişmektedir. Bu kısımlar plastik ve karbon gibi atom numarası suya yakın maddelerden yapılan ve duvar olarak adlandırılan yapıyla kaplanmıştır. İyon odasında bulunan gaz gelen foton demeti, yüklü parçacıklar ve iyon ürünleri ile iyonize olur. İyonlaşma sonucu iyonlar yüksek voltaj nedeniyle elektrotlara doğru hareket ederek iyonizasyon akımının oluşmasına sağlar. Oluşan akım elektrometreyle belirlenir.

Bu akım $10^{-14} - 10^{-7}$ Amper değerleri arasında oluşur. Elektronlar, *puls*lar şeklinde üretildiğinden iyon odasında toplama verimi sorunu oluşur. İyon odası için iyon toplama verimi ve doyum şartları önemlidir. İyon odası voltaj ayarı ve iyon tekrar birleşme faktörü nedeniyle oluşan iyon kaybının % 1'den az olacak şekilde düzenlenmesi gerekir. İyon odasının merkezinde *puls* başına doz değeri 0,1 cGy ya da daha az ise toplama voltajının yaklaşık 300 V alınması yeterlidir. Bu şartlar altında farmer iyon odasının toplama etkinliği % 99'dan daha iyidir (Khan 2003). İyon toplama etkisi için düzeltme faktörü tanımlanması gerekebilir (AAPM 1983). İyon tekrar birleşme faktörü P_s ' in bulunmasında, $V_1=2V_2$ olmak koşuluyla V_1 ve V_2 gibi iki besleme geriliminde sırasıyla Q_1 ve Q_2 yükleri ölçülür. İyon odasının sızıntı kontrolü yapılmalıdır. Sızıntı % 0,1'den az olmalıdır (AAPM 1983). İyon odasının duyarlılığı periyodik olarak ölçülmelidir. Duyarlılığındaki değişim % 1'den büyük olmamalıdır (AAPM 1983). Standart bir kaynak - yüzey uzaklığı durumunda bir fantomun ışınlanmasıyla derinliğin bir fonksiyonu olan iyon yükü ölçülür. Fantom oda sıcaklığına eşit hale gelmelidir ve iyon odası hassasiyetini değerlendirmek için ölçüm öncesi ve sonrası sıcaklık ve basınç ölçülmelidir. İyon odasının kutuplanma etkisini hesaba katmak için, elektrotlarda oluşan kutuplanmanın ölçülmesi gerekir. Kutuplanma etkisine yüzeyde, maksimum iyonlaşma derinliğinde ve % 50 iyonlaşma derinliğinde bakılmalıdır (AAPM 1983). Yüksek enerjili fotonların etkileşimi sonucu *Compton* elektronlarının gazla etkileşmeleriyle oluşan elektronların oluşturduğu akımlar, toplayıcı elektrotun kutbuna bağlı olarak toplayıcı akımı değiştirir. Duyarlı hacmin dışında toplanan akım kutuplanma etkisinin nedeni olabilir (Khan 2003).

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada deneysel ölçümler için kullanılan element ve bileşikler toz numune formundadır. Numuneler $<37\mu\text{m}$ (~ 400 mesh) ölçekli eleklerde elenerek parçacık büyüklüğü *homojenitesi* sağlanılmaya çalışılmıştır. Analizden önce, numuneler 1,3 cm çapında disk şeklinde numune olacak şekilde 10 ton/cm^2 basınç altında SPEX PmaxTM marka hidrolik pres ile sıkıştırılmıştır. Bu işlem oldukça düz bir yüzeyin oluşmasını sağlamakta dolayısıyla düzgün olmayan yüzeye sahip numunelerden kaynaklanan

hataları minimize etmektedir. Ayrıca presleme sonucu numune kalınlıkları ve birim yüzey alanındaki kütle miktarları aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir. Numune kalınlıkları $0,05 \leq t \leq 0,36$ ve birim yüzey alanındaki kütle miktarları $0,23 \leq \frac{m}{A} \leq 1,23$ belirtilen aralıklarda olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan bileşiklerin numune kalınlığı

Bileşik	Numune Kalınlığı (cm)
CeCl ₃ 7H ₂ O	0,15
HgCl ₂	0,36
Dy ₂ (SO ₄) ₃	0,12
Cl ₃ La	0,20
Dy ₂ O ₃	0,10
CuBr	0,23
ZnF ₂	0,14
Nb ₂ O ₅	0,21
Tl ₂ O ₃	0,06

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan elementlerin numune kalınlığı

Element	Numune Kalınlığı (cm)
Dy	0,07
Gd	0,07
Sb	0,10
Ho	0,05
Se	0,14
Cd	0,14
Sn	0,15
Er	0,06
Bi	0,07
Lu	0,08

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan elementlerin birim yüzey alanındaki kütle miktarları

Element	Birim Yüzey Alanındaki Kütle Miktarı (g/cm ²)
Dy	0,39
Gd	0,38
Sb	0,44
Ho	0,32
Se	0,43
Cd	0,77
Sn	0,70
Er	0,33
Bi	0,46
Lu	0,49

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan bileşiklerin birim yüzey alanındaki kütle miktarları

Bileşik	Birim Yüzey Alanındaki Kütle Miktarı (g/cm ²)
CeCl ₃ 7H ₂ O	0,38
HgCl ₂	1,23
Dy ₂ (SO ₄) ₃	0,31
Cl ₃ La	0,49
Dy ₂ O ₃	0,50
CuBr	0,23
ZnF ₂	0,44
Nb ₂ O ₅	0,59
Tl ₂ O ₃	0,43

Çizelge 3.5 Katı su numunesine ait bileşim kesri oranları (Ramaseshan *et al.* 2008)

Katı Su	Element	Kütle Kesri(%)
	H	8,1
	C	67,2
	Ca	2,3
	N	2,4
	O	19,9
	Cl	0,1

Çizelge 3.6 Plastik su numunesine ait bileşim kesir oranları (Ramaseshan *et al.* 2008)

Plastik Su	Element	Kütle Kesri(%)
	H	7,40
	B	2,26
	C	46,70
	N	1,56
	O	33,52
	Mg	6,88
	Al	1,40
	Cl	0,24

Bu çalışmamızda kullanılan foton demetinin numunedeki deneysel koşulları aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı için 6 MV enerji düzeyinde deneysel koşullar

Koşullar	Değerler
Numune ölçüm alanı	0,8×0,8 cm ²
Ölçüm birimi	cGy
Detektör tipi	İyonizasyon odası
Ölçüm zamanı	30 s
Sıcaklık	21,5 °C
Basınç	828,4 mBar
Enerji	6 MV
Derinlik	1,7 cm

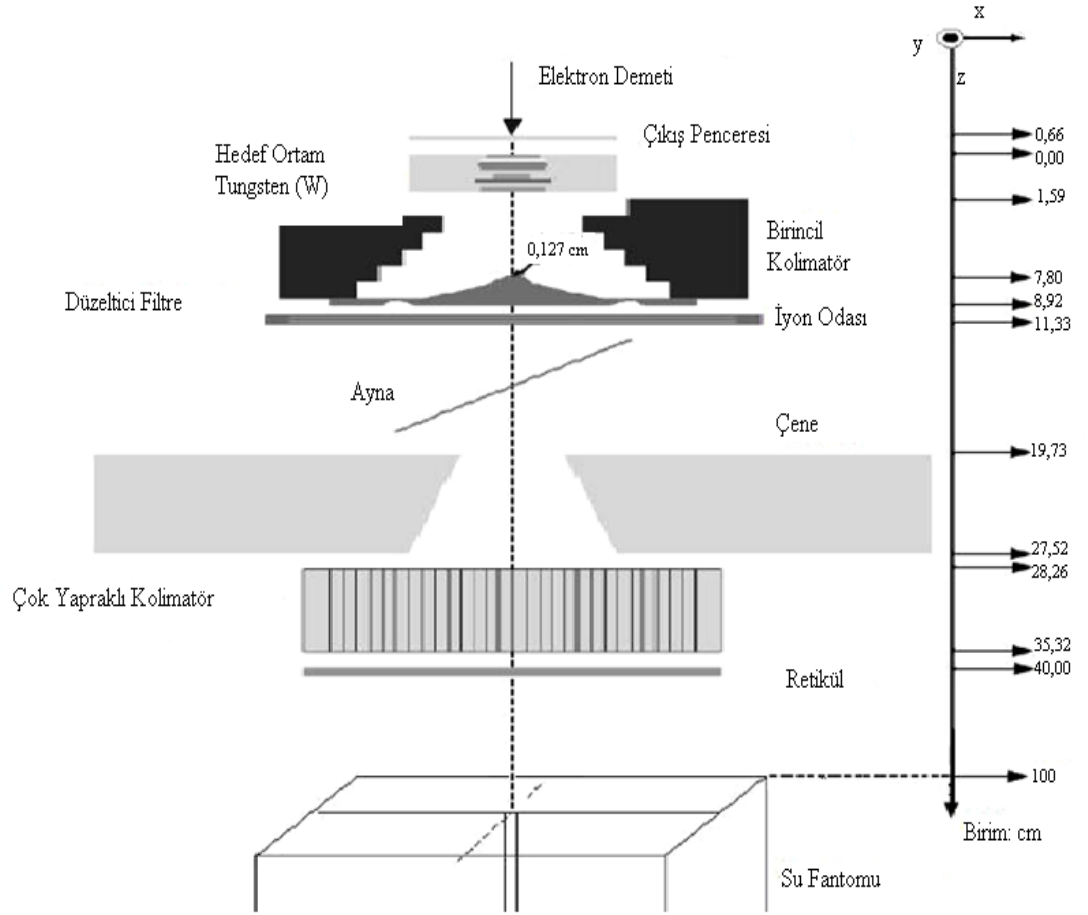
Çizelge 3.8 Çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcı için 18 MV enerji düzeyinde deneysel koşullar

Koşullar	Değerler
Numune ölçüm alanı	0,8×0,8 cm
Ölçüm birimi	cGy
Detektör tipi	İyonizasyon odası
Ölçüm zamanı	30 s
Sıcaklık	21,5 C
Basınç	828,4 mBar
Enerji	18 MV
Derinlik	3,2 cm

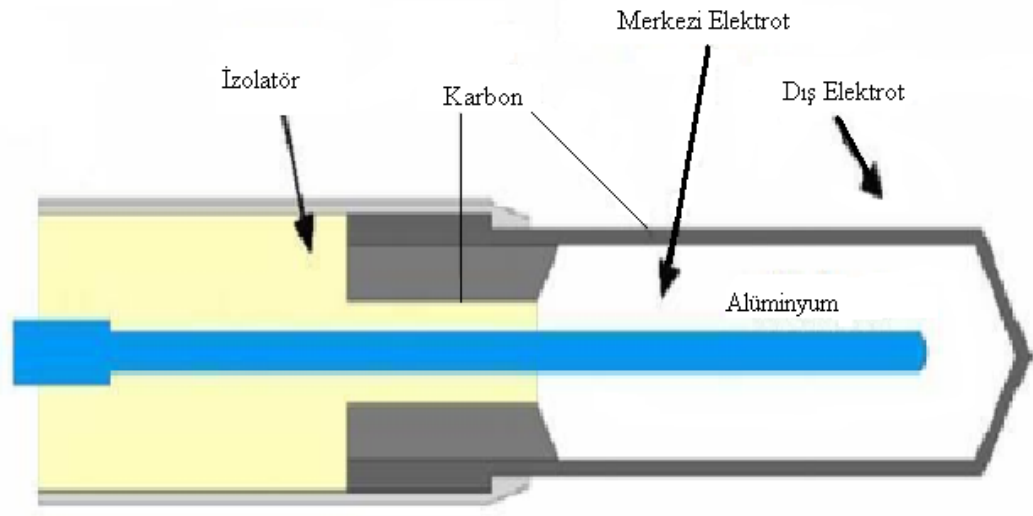
3.4. Deney Geometrisi

Sistemin kararlılığı ve tekrarlanabilirliği numuneli ve numunesiz alınan ölçümlerle test edilmiştir. Ölçümler her bir numune için üç kere alınmıştır. Numuneler kaynak ve iyon odası arasında tek tek yerleştirilmiştir. Numune çapı 10⁻² mm'ye kadar ölçüm yapabilen

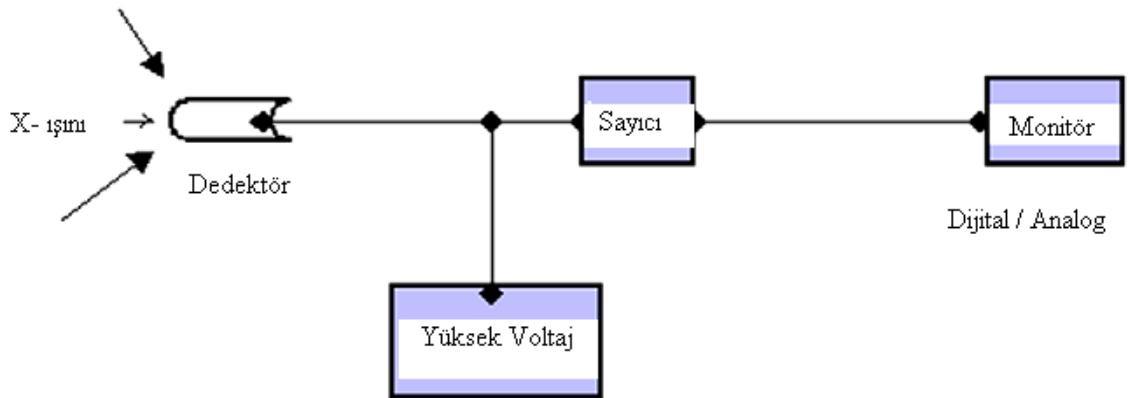
bir mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 3.2’de ise çalışmada kullanılan lineer hızlandırıcının genel yapısı görülmektedir (Lin *et al.* 2001).



Şekil 3.2. Lineer hızlandırıcının genel yapısı



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan iyon odasının şematik gösterimi



Şekil 3.4. Çalışmadaki ölçüm sisteminin elektronik bölümleri (Demir vd 2010)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Lineer Azaltma Katsayısı

Bu çalışmada 6 MV ve 18 MV çoklu enerjili X-ışınları için bazı bileşiklerin ve elementlerin lineer azaltma katsayıları belirlendi.

4.1.1. Bileşikler

Çizelge 4.1. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde lineer azaltma katsayıları

Bileşik	Lineer Azaltma Katsayısı	
	6 MV	18 MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	0,021 ± < 0,001	0,081 ± 0,001
HgCl ₂	0,067 ± < 0,001	0,138 ± 0,005
Cl ₃ La	0,064 ± 0,002	0,071 ± 0,007
Dy ₂ O ₃	0,131 ± < 0,001	0,215 ± 0,025
CuBr	0,142 ± < 0,001	0,081 ± 0,003
ZnF ₂	0,087 ± 0,002	0,089 ± 0,001
Nb ₂ O ₅	0,065 ± 0,001	0,099 ± 0,014
Tl ₂ O ₃	0,577 ± < 0,001	0,225 ± 0,009

4.1.2. Elementler

Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan elementlerin 6 MV-18 MV enerjilerinde lineer azaltma katsayıları

Element	Lineer Azaltma Katsayısı	
	6 MV	18 MV
Dy	0,074 ± < 0,001	0,208 ± 0,009
Gd	0,159 ± 0,003	0,211 ± 0,011
Sb	0,122 ± 0,001	0,145 ± 0,006
Ho	0,214 ± 0,004	0,218 ± 0,003
Se	0,085 ± 0,001	0,086 ± < 0,001
Cd	0,103 ± 0,002	0,201 ± 0,005
Sn	0,096 ± 0,002	0,164 ± 0,009
Er	0,209 ± 0,003	0,214 ± 0,003
Bi	0,182 ± 0,007	0,252 ± 0,001
Lu	0,169 ± 0,003	0,238 ± 0,001

4.2. Kütle azaltma Katsayısı

Bu çalışmada kütle azaltma katsayısı çoklu foton enerjileri hesaplanırken genelde doğrudan yöntem kullanılmıştır. Teorik değerler ise WinXCom programı ile hesaplanmıştır.

4.2.1 Bileşikler

Bazı bileşiklerde çoklu foton enerjileri için kütle azaltma katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel veriler Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde kütle azaltma katsayıları

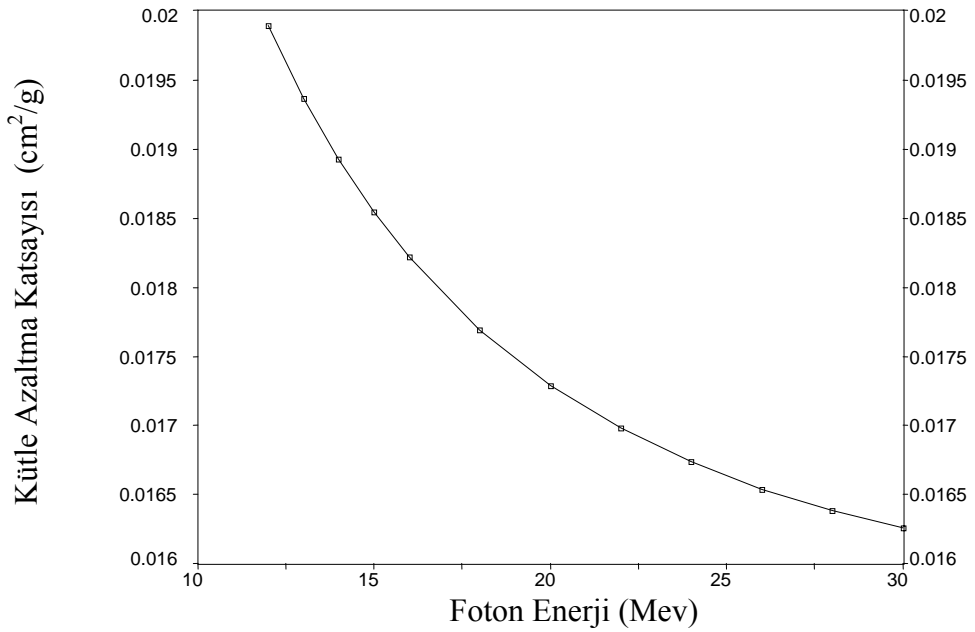
Bileşik	Kütle Azaltma Katsayısı	
	6 MV	18 MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	0,051± < 0,001	0,032± < 0,001
HgCl ₂	0,044± < 0,001	0,041± < 0,001
Dy ₂ (SO ₄) ₃	0,230 ± 0,008	0,032 ± 0,003
Cl ₃ La	0,164 ± 0,005	0,031 ± 0,001
Dy ₂ O ₃	0,165± < 0,001	0,041 ± 0,004
CuBr	0,299± < 0,001	0,027 ± 0,001
ZnF ₂	0,174 ± 0,003	0,028± < 0,001
Nb ₂ O ₅	0,142 ± 0,003	0,032± < 0,001
Tl ₂ O ₃	0,561 ± 0,002	0,035 ± 0,001

4.2.2. Karışımlar

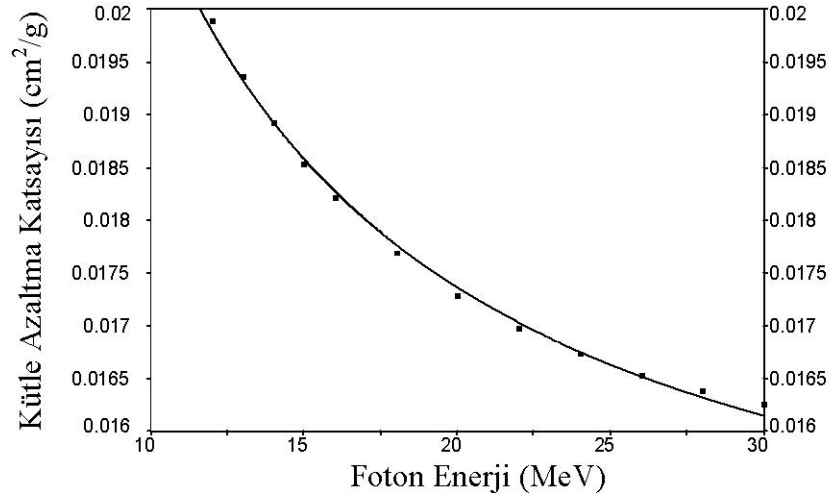
Bazı karışımlar için geniş foton enerji aralığında kütle azaltma katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca deneysel veriler ile interpolate edilen değerler karşılaştırılıp ampirik denklemlere ulaşılmıştır. İlgili veriler çizelgelerde ve şekillerde gösterilmiştir. Bu bölümde çizelgelerde gösterilen değerler virgülden sonra dört haneli verilmesinin sebebi ölçüm hassasiyetinin ortaya konulması değil, ölçümdeki metodik değerlerle arasındaki bağıl farkların ortaya konulmasıdır.

Çizelge 4.4. Çalışmada kullanılan plastik suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları

Plastik Su		Foton Enerji(MeV)	Kütle azaltma katsayısı(cm ² /g)
		12	0,0198
Bileşim Kütle Kesri(%)		13	0,0193
H	7,4	14	0,0189
B	2.26	15	0,0185
C	46,7	16	0,0182
N	1,56	18	0,0176
O	33.52	20	0,0172
Mg	6,88	22	0,0169
Al	1,4	24	0,0167
Cl	0.24	26	0,0165
		28	0,0163
		30	0,0162



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan plastik suya ait 12 MeV-30 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi



Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan plastik suya ait interpolate edilmiş 12 MeV-30 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi

Yukarıda şekil 4.2’de görülen interpolate edilmiş veri grafiğinden uygun fit etme programları kullanılarak plastik su ile ilgili kullanılabilir ve pratik 12 MeV-30 MeV foton enerji aralığında ampirik bir denkleme ulaşılmıştır. İlgili denklem ve fit değerleri aşağıda verilmiştir. Buradan;

$$\ln y = a + (b/x) \quad 4.1$$

$$\ln \mu_m = -4.26 + (4,08/E) \quad 4.2$$

şeklinde üstel olarak değişim gösteren veri ve ilgili grafiklerden ampirik bir dekleme ulaşılmıştır. Denklemdaki a ve b sabit katsayılar olup standart hatanın düşük olması için fit programının çıkardığı sabit değerlerdir.

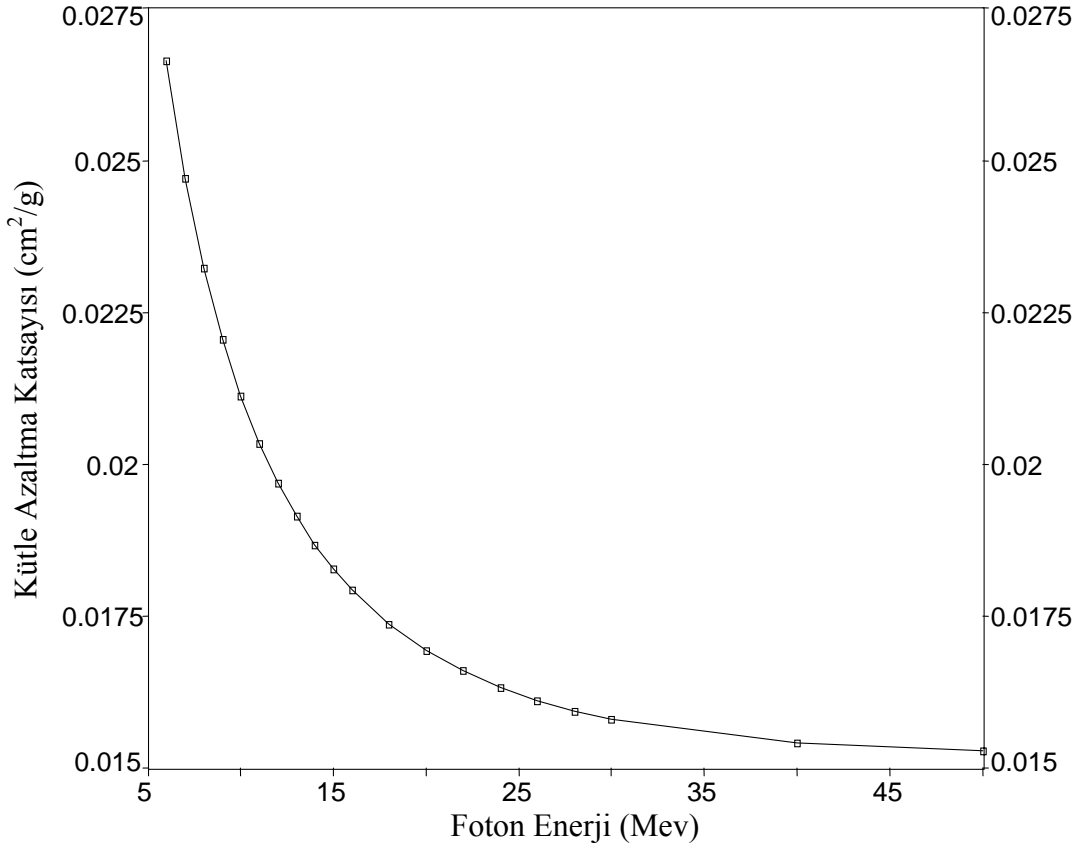
μ_m kütle azaltma katsayısı olup atom başına toplam etkileşim tesir kesiti ile orantılı bir niceliktir. Ayrıca yoğunluktan bağımsızdır. E ise foton enerji olmak üzere kütle azaltma katsayısını etkileyen bir nicelik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 4.5. Çalışmada kullanılan plastik suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları fit değerleri

Plastik Su		Kütle Azaltma Katsayısı(cm^2/g)		
		Foton Enerji(MeV)	μ_{exp}	μ_{fit}
		12	0,0198	0,0197
Bileşim Kütle Kesri(%)		13	0,0193	0,0193
H	7,4	14	0,0189	0,0189
B	2.26	15	0,0185	0,0185
C	46,7	16	0,0182	0,0182
N	1,56	18	0,0176	0,0177
O	33.52	20	0,0172	0,0173
Mg	6,88	22	0,0169	0,0170
Al	1,4	24	0,0167	0,0167
Cl	0.24	26	0,0165	0,0165
		28	0,0163	0,0163
		30	0,0162	0,0161

Çizelge 4.6. Çalışmada kullanılan katı suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları

Katı Su		Foton Enerji(MeV)	Kütle Azaltma Katsayısı(cm ² /g)
		6	0,0266
Bileşim Kütle Kesri(%)		8	0,0232
H	8,1	10	0,0211
C	67,2	12	0,0197
Ca	2,3	14	0,0186
N	2,4	16	0,0179
O	19,9	18	0,0173
Cl	0,1	20	0,0169
		22	0,0166
		24	0,0163
		26	0,0161
		28	0,0159
		30	0,0158
		40	0,0154
		50	0,0152



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan katı suya ait 6 MeV-50 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi

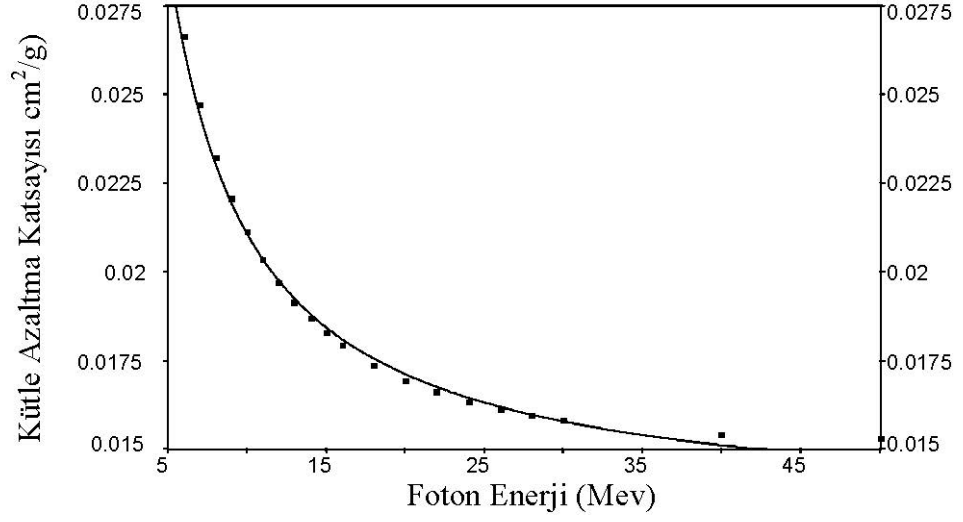
Aşağıda görülen interpolate edilmiş veri grafiğinden uygun fit etme programları kullanılarak katı su ile ilgili kullanılabilir ve pratik 6 MeV - 50 MeV foton enerji aralığında ampirik bir denkleme ulaşılmıştır. İlgili denklem ve fit değerleri aşağıda verilmiştir. Buradan;

$$y=a+(b/x) \quad 4.3$$

$$\mu_m=0,01+(0,08/E) \quad 4.4$$

şeklinde üstel olarak değişim gösteren veri ve ilgili grafiklerden ampirik bir dekleme ulaşılmıştır. Denklemdaki a ve b sabit katsayılar olup standart hatanın düşük olması için fit programının çıkardığı sabit değerlerdir.

μ_m kütle azaltma katsayısı olup atom başına toplam etkileşim tesir kesiti ile orantılı bir kavramdır. Ayrıca yoğunluktan bağımsızdır. E ise foton enerji olmak üzere kütle azaltma katsayısını etkileyen bir niceliktir.



Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan katı suya ait interpolate edilmiş 6 MeV-50 MeV enerji aralığında kütle azaltma katsayısı ile foton enerji değişimi

Çizelge 4.7. Çalışmada kullanılan katı suya ait farklı foton enerjilerinde kütle azaltma katsayıları fit değerleri

Katı Su		Foton Enerji (MeV)	Kütle Azaltma Katsayısı(cm^2/g)	
			μ_{den}	μ_{fit}
Bileşim Kütle Kesri(%)		6	0,0266	0,0264
H 8,1		8	0,0232	0,0231
C 67,2		10	0,0211	0,0211
Ca 2,3		12	0,0197	0,0197
N 2,4		14	0,0186	0,0188
O 19,9		16	0,0179	0,0181
Cl 0,1		18	0,0173	0,0175
		20	0,0169	0,0171
		22	0,0166	0,0167
		24	0,0163	0,0164
		26	0,0161	0,0161
		28	0,0159	0,0159
		30	0,0158	0,0157
		40	0,0154	0,0151
		50	0,0152	0,0147

4.2.3. Elementler

Bazı elementler için çoklu foton enerji aralığında kütle azaltma katsayısı değerleri hesaplanmıştır. İlgili veriler çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan elementlerin 6 MV-18 MV enerjilerinde kütle azaltma katsayıları

Element	Kütle Azaltma Katsayısı	
	6 MV	18 MV
Dy	0,085 ± < 0,001	0,039 ± 0,001
Gd	0,199 ± 0,003	0,042 ± 0,002
Sb	0,181 ± 0,002	0,034 ± 0,001
Ho	0,240 ± 0,004	0,039 ± < 0,001
Se	0,175 ± 0,003	0,029 ± < 0,001
Cd	0,118 ± 0,002	0,037 ± < 0,001
Sn	0,131 ± 0,003	0,035 ± 0,002
Er	0,227 ± 0,004	0,037 ± < 0,001
Bi	0,183 ± 0,007	0,041 ± < 0,001
Lu	0,169 ± 0,003	0,038 ± < 0,001

4.3. Toplam Moleküler Tesir Kesiti

Bu çalışmada bazı bileşiklerin toplam moleküler tesir kesitleri belirlenmiştir.

4.3.1. Bileşikler

Çizelge 4.9. Çalışmada kullanılan bileşikler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam moleküler tesir kesitleri

Bileşik	Toplam Moleküler Tesir Kesiti	
	6 MV	18 MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	31,93 ± 0,15	20,24 ± 0,15
HgCl ₂	19,88 ± < 0,01	18,24 ± 0,25
Dy ₂ (SO ₄) ₃	243,29 ± 8,51	33,30 ± 3,49
Cl ₃ La	67 ± 2,02	12,73 ± 0,56
Dy ₂ O ₃	102,61 ± < 0,01	27,39 ± 3,26
CuBr	7 1,24 ± 0,16	6,53 ± 0,30
ZnF ₂	30,02 ± 0,53	4,95 ± 0,04
Nb ₂ O ₅	62,97 ± 1,22	14,43 ± 0,07
Tl ₂ O ₃	424,31 ± 0,70	26,92 ± 1,19

4.4. Toplam Atomik Tesir Kesiti

Bu çalışmada bazı element ve bileşiklerin toplam atomik tesir kesitleri belirlenmiştir.

4.4.1. Bileşikler

Çizelge 4.10. Çalışmada kullanılan bileşikler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam atomik tesir kesitleri

Bileşik	Toplam Atomik Tesir Kesiti	
	6 MV	18 MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	1,27 ± < 0,01	0,80 ± < 0,01
HgCl ₂	6,62 ± < 0,01	6,08 ± 0,08
Dy ₂ (SO ₄) ₃	14,31 ± 0,50	1,95 ± 0,20
Cl ₃ La	16,75 ± 0,50	3,18 ± 0,14
Dy ₂ O ₃	20,52 ± < 0,01	5,17 ± 0,55
CuBr	35,62 ± 0,08	3,26 ± 0,15
ZnF ₂	10 ± 0,17	1,65 ± 0,01
Nb ₂ O ₅	8,99 ± 0,17	2,06 ± 0,01
Tl ₂ O ₃	84,86 ± < 0,01	5,38 ± 0,23

4.4.2. Elementler

Çizelge 4.11. Çalışmada kullanılan elementler için 6 MV-18 MV enerjilerinde toplam atomik tesir kesitleri

Element	Toplam Atomik Tesir Kesiti	
	6 MV	18 MV
Dy	23,02 ± 0,04	10,56 ± 0,46
Gd	51,89 ± 0,92	11,14 ± 0,58
Sb	36,58 ± 0,37	7,05 ± 0,31
Ho	65,84 ± 1,17	10,86 ± 0,08
Se	23,06 ± 0,41	3,80 ± 0,03
Cd	22,09 ± 0,46	6,94 ± 0,17
Sn	25,72 ± 0,54	6,98 ± 0,41
Er	63,23 ± 1,12	10,43 ± 0,08
Bi	63,75 ± 2,45	14,41 ± 0,07
Lu	49,32 ± 0,96	11,30 ± 0,06

4.5. Etkin Foton Enerjisi

Bu çalışmada 6 MV ve 18 MV enerjili X-ışınları için bazı bileşiklerin etkin foton enerjileri belirlendi.

Çizelge 4.12. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV-18 MV enerjilerinde etkin foton enerjileri

Bileşik	E _{etk} (MeV)	
	6 MV	18 MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	1,49±0,009	5,02±0,18
HgCl ₂	0,56±0,016	2,72±0,19 (E _{Düş}) 8,53±0,86 (E _{Yük})*
Dy ₂ (SO ₄) ₃	0,27±0,006	4,13 (E _{Düş})12,06 (E _{Yük})
Cl ₃ La	0,30±0,007	--
Dy ₂ O ₃	0,38±0,001	2,42±0,85 (E _{Düş})10,18±4,7 (E _{Yük})
CuBr	0,14±0,001	--
ZnF ₂	0,17±0,002	6,27±0,31
Nb ₂ O ₅	0,28±0,003	4,78±0,12 (E _{Düş})13,49±0,5 (E _{Yük})
Tl ₂ O ₃	0,25±0,001	--

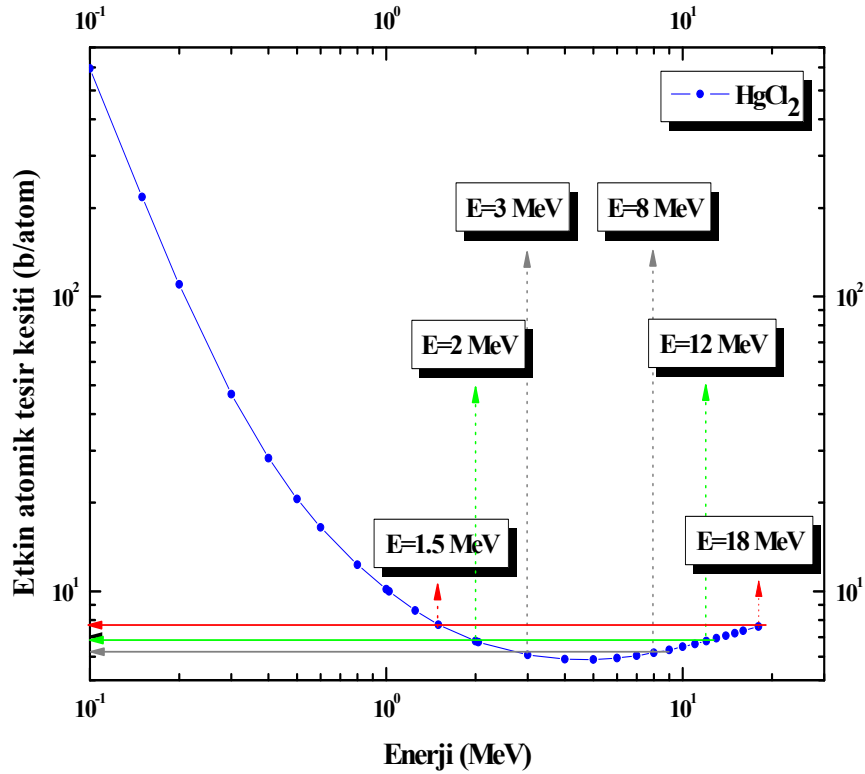
*E_{Yük} ve E_{Düş} aynı tesir kesitine sahip iki enerjiden sırasıyla yüksek ve düşük enerjili olanını temsil etmektedir.

4.6. Etkin Atom Numarası

Bu çalışmada çoklu foton enerji aralığında bazı bileşiklerin etkin atom numaraları belirlendi. Veriler Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Çalışmada kullanılan bileşiklerin ampirik formül değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Bileşik	Etkin Atom Numarası	
	Mayneord Formülü	Deneysel
CeCl ₃ 7H ₂ O	39,88	7,42
HgCl ₂	71,02	52,04
Cl ₃ La	46,25	35,62
CuBr	32,54	32,75
Dy ₂ O ₃	62,36	46,04
ZnF ₂	25,71	19,73
Nb ₂ O ₅	35,86	22,64
Tl ₂ O ₃	77,28	63,13



Şekil 4.5. HgCl₂ bileşiği için etkin atomik tesir kesiti ile enerjinin değişimi (Kurudirek ve Çelik 2012)

4.7. Etkin Elektron Yoğunluk

Bu çalışmada çoklu foton enerji aralığında bazı bileşiklerin etkin elektronik yoğunlukları belirlendi. Veriler aşağıdaki, çizelge 4.16' da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Çalışmada kullanılan bileşiklerin 6 MV enerjisindeki etkin elektron yoğunlukları

Bileşik	Etkin Elektron Yoğunluk ($\times 10^{22}$)
	6MV
CeCl ₃ 7H ₂ O	1,19
HgCl ₂	11,5
Dy ₂ (SO ₄) ₃	2,98
Cl ₃ La	8,72
Dy ₂ O ₃	7,43
CuBr	13,7
ZnF ₂	11,4
Nb ₂ O ₅	5,12
Tl ₂ O ₃	8,32

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde (maddede bulunan yüksek atom numaralı elementin soğurma kıyısına yakın bölgelerde keskin bir pik yapacak şekilde) yüksek değerler almaktadır. *Compton* saçılmasının baskın olduğu orta düzey enerji bölgesinde minimum yapacak şekilde sabit değerler alıp, çift oluşum olayının baskın olduğu yüksek enerji bölgesinde tekrar bir artış eğilimi göstermektedir. Fotoelektrik soğurma tesir kesiti Z^{4-5} ile orantılı olduğundan, diğer kısmi foton etkileşimlerine göre yüksek atom numaralı elementlere daha büyük bağıl değer katmaktadır. *Compton* saçılma tesir kesiti Z ile lineer değiştiğinden dolayı, diğer foton etkileşimlerine göre yüksek atom numaralı elementlere daha az katkı sağlamaktadır. Çift oluşum tesir kesiti ise Z^2 ile değiştiğinden dolayı, *Compton* saçılmasının baskın olduğu enerji bölgesinden sonra enerji arttıkça foton etkileşim parametreleri artmakta ve daha sonra sabit hale gelmektedir.

Çizelge 4.12’de bazı bileşiklerin etkin foton enerjilerinin (E_{etk}) ortalama değerleri standart sapma değerleri ile birlikte verilmiştir. E_{etk} değerleri 6 MV’luk fotonlar için 0,14 ile 1,49 MeV foton enerjileri arasında değerler almaktadır. Bu enerji aralığı *Compton* saçılmasının baskın olduğu enerji aralığıdır. Maksimum E_{etk} değeri $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ bileşiği için ve minimum E_{etk} değeri ise ZnF_2 bileşiği için ortaya çıkmaktadır. 18 MV’luk fotonlar için ise E_{etk} 2,42 ile 13,49 MeV arasında değerler almaktadır. Bu enerji aralığında ise çift oluşumu baskın olmaktadır. Maksimum E_{etk} Nb_2O_5 bileşiği için, minimum E_{etk} ise Dy_2O_3 bileşiği için elde edilmiştir. Greenhouse *et al.* (1967) farklı maddeler için 60-1000 kV aralığında değişen enerjilere sahip fotonlar için etkin enerji değerlerini yarı kalınlık (HVL) değerlerini kullanarak elde etmişlerdir.

Valais *et al.* (2008) yaptıkları çalışmada bazı tek kristal *sintilatörlerin lüminesans* emisyon özelliklerini incelemişler ve 25-140 kV aralığındaki fotonlar için 18,12 den 74,28 keV’e kadar değişen ortalama foton enerji değerlerini kullanmışlardır. Midgley *et*

al. (1998) katı su örneğinde 6 MV fotonlar için bremsstrahlung X-ışını demetinin azalmasını ifade etmede Beer-Lambert yasasının geçerliliğini test etmiş ve doğrulamışlardır. Fix *et al.* (2001) 6 MV foton demeti için çok kapsamlı bir Monte Carlo çalışması yapmışlar ve Monte Carlo yöntemiyle hesaplanan enerji *spektrumunu transmisyon* ölçümlerinden elde edilen spektrum ile karşılaştırmışlar ve bu değerler arasında uyum olduğunu gözlemişlerdir. Yukarıda belirtilen çalışmalarda farklı heterojen enerjili foton demetlerinde etkin foton enerjilerinin hedef maddeye olduğu kadar uygulamaya bağlı olarak ta değişmektedir. Etkin foton enerjileri kullanılarak elde edilen etkin atom numaraları Z_{etk} Çizelge 4.13’de verilmektedir. Çizelgede görülen standart sapma değerleri farklı dozlar uygulanarak tekrarlanan ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 6 MV fotonlar için Z_{etk} değerleri 7,42 ile 63,13 arasında değişmektedir ve maksimum Z_{etk} değeri Tl_2O_3 için minimum Z_{etk} değeri ise $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ bileşiği için ortaya çıkmaktadır. 18 MV fotonlar için ise Z_{etk} değerleri 8,67 ile 44,82 arasında değişmektedir. Maksimum Z_{etk} $HgCl_2$ için minimum Z_{etk} ise $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ bileşiği için elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen çizelgelerden görüldüğü üzere sonuçlar 6 MV’luk fotonlar için 18 MV’luk fotonlara göre daha kesindir. Bunun sebebi 6 MV’luk fotonlar için E_{etk} değerlerinde *Compton* saçılması olayının daha baskın olduğu düşünülmektedir. Çünkü bu enerji aralığında Z_{etk} değerlerinin enerji ile değişimi azdır. Öte yandan 18 MV’luk fotonlar için E_{etk} değerlerinde Z_{etk} değerlerinin enerji ile değişiminin fazla olduğu çift oluşumu daha baskındır. Böylece, büyük standart sapma değerlerini soğurma olaylarının güçlü enerji ve atom numarası bağımlılığına atfedebiliriz. Bazı bileşiklerin etkin atomik tesir kesiti değerlerine karşılık 1,5-18 MeV enerji aralığında birden fazla E_{eff} ortaya çıkabilmektedir. Şekil 4.5’ten görüldüğü üzere *Compton* saçılmasının baskınlığının azalıp çift oluşumu olayının daha baskın hale geldiği enerji aralığında aynı etkin atomik tesir kesitine sahip birden fazla foton enerjisi söz konusu olabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada aynı bileşik için 18 MV’ ta düşük ve yüksek E_{etk} değerlerine karşılık gelen farklı Z_{etk} değerleri de hesaplanmıştır. Elde edilen bu Z_{etk} değerleri enerjiden bağımsız bir ampirik formülle elde edilebilen Z_{eff} değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.15’ den görüldüğü üzere 6 MV ve 18 MV fotonlar için elde edilen Z_{etk} değerleri ampirik formülle elde edilen değerlerden oldukça farklıdır. Gorjiara *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada ampirik formülle elde edilen enerjiden bağımsız tek etkin atom numarasının enerjiye bağlı olduğu yöntemle elde edilen değerlerden oldukça

farklı olduğunu ancak, fotoelektrik olayın baskın olduğu düşük enerji bölgesinde iki yöntemin birbiriyle uyduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada 6 MV ve 18 MV foton demetleri kısmen *Compton* saçılmasının ve çift oluşumun baskın olduğu yüksek enerji bölgesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, Çizelge 4.15'deki uyumsuzluğun bu durumdan kaynaklandığı düşünülebilir.

Tıbbi açıdan önemli olan bazı suya eşdeğer fantom maddeleri için farklı enerji aralıklarında WinXCom programı yardımıyla kütle azaltma katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.4). Bu katsayıların enerji ile değişimi dikkate alınarak uygun enerji aralıklarında bu değerler interpolate edilerek kullanılabilir ve pratik yeni fit denklemi oluşturulmuştur. Bulunan bu denklem verileri metodik veriler ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlardan fit denklem verileri ile metodik verilerin uyumlu olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.7).

Sonuç olarak, şimdiye kadar ki çalışmalarda etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu tek enerjili fotonlar ve elektronlar için belirlenmiştir. Bu çalışmada enerji açısından heterojen 6 MV ve 18 MV'luk fotonlar için etkin atom numarası ve elektron yoğunluğunun belirlenebileceği basit bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem genelde *Compton* saçılmasının baskın olduğu enerji aralığına denk gelen etkin atomik tesir kesitine sahip maddeler için daha kesin sonuçlar vermektedir. Bu yöntem yardımıyla çoklu enerjili *bremsstrahlung* X-ışınları için, çok elementli maddelerde etkin foton enerjisine dayalı etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu belirlemek mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

- AAPM American Association of Physicist in Medicine, 1983. A protocol for the determination of absorbed dose from high energy photons electrons. Task Group: 51, *Journal of Medical Physics*, 10 p. 741.
- Berger, M.J., Hubbell, J.H., 1987-1999. XCOM: Photon Cross Sections Database. Web Version 1.2, available at <http://physics.nist.gov/xcom>, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA, August 1999. Originally published as NBSIR 87-3597, XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer (July 1987).
- Bhandal, G. S., Singh, K., 1996. Total and partial mass attenuation coefficients and effective atomic number studies in different solid state nuclear track detectors. *Radiation Physics and Chemistry* 47, 109-116.
- Conner, A. L., Atwater, H. F., Plassmann H. E., McCrary J. H., 1970. Gamma-Ray Attenuation-Coefficient Measurements. *Physical Review A* 1, 539-544.
- Davisson, C.M., Evans R.D., 1951. Measurements of Gamma-Ray attenuation Coefficients. *Physical Review* 81, 404-411.
- Davisson, C.M., Evans R.D., 1952. Gamma-Ray attenuation Coefficients. *Reviews of Modern Physics* 24, 79-107.
- Demir, F., Budak, G., Şahin, R., Karabulut, A., M. Oltulu., M., Şerifoğlu, K., 2010. Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator. *Annals of Nuclear Energy* 37, 339-344.
- El-Kateb, A. H., 2001. Determination of γ -spectrometric parameters for some chloride salt solutions. *Annals of Nuclear Energy* 28, 113-124.
- El-Kateb, A. H., Rizk, R. A. M., Abdul-Kader, A. M., 2000. Determination of atomic cross-sections and effective atomic numbers for some alloys. *Annals of Nuclear Energy* 27, 1333-1343.
- Fix, M.K. , Stampanoni, M., Manser, P., E.J. Born, E.J. , Mini R., Rügsegger, P. R .A multiple source model for 6 MV photon beam dose calculations using Monte Carlo. *Physics in Medicine and Biology* 46, 1407-1427
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring H., 2001. X-ray attenuation in matter. *Reengineering XCOM Radiation Physics and Chemistry* 60, 23-24.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, H., 2004. WinXCom- a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry* 71, 653-654.
- Gorjiara, T., Hill, R., Kuncic, Z., Bosi, S., 2011. Radiological characterization and water equivalency of genipin gel for x-ray and electron beam dosimetry. *Physics in Medicine and Biology* 56, 4685–4699.
- Goswami, B., Chaudhuri, N., Measurement of Gamma-Ray Attenuation Coefficients. 1973. *Physical Review A* 7, 1912-1916.
- Gowda, S., Krishnaveni, S., Yashoda, T., Umesh, T. K., 2004. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some hermoluminescent dosimetric compounds. *Pramana Journal of Physics* 63, 3, 529-541.

- Greenhouse, N.A., Maillie, H. D., Mermagen, H., 1967. A Thermoluminescent Microdosimetry System for the Measurement of Photon Quality. *Radiation Research* 32,641-650.
- Hine G J 1952 The effective atomic numbers of materials for various gamma ray interactions *Phys. Rev.*85 725
- Hubbell, J. H. 1999. Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context *Physics in Medicine and Biology*, 44, R1-R22.
- Hubbell, J.H., 1982. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 33, 1269.
- Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., 1995. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Energy-attenuation Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD20899, Report NISTIR 5632.
- Jackson DF, Hawkes JD. 1981. X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. *Physics Reports.*;70:169–233.
- Kaewkhao, J., Laopaiboon, J., Chewpraditkul W., 2008. Determination of effective atomic numbers and effective electron densities for Cu/Zn alloy. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 109, 1260-1265.
- Kato, Y., “X-ray laser research: Perspective and Physic Issues”, *Inst. Phys. Conf. Ser. No:186*, 9th Int. Conf. X-ray Lasers, Beijing (China), 24-28, 2004.
- Kaur, G., Singh, K., Lark, B. S., Sahota H. S., 2000. Photon interaction studies in solutions of some alkali metal chlorides-I. *Radiation Physics and Chemistry* 58, 315-323.
- Khan, F., 2003. *The Physics of Radiation Therapy*, Lippincott, Williams and Wilkins, Baltimore, MD.
- Khan, F., 2010 *The Physics of Radiation Therapy* (Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins)
- Knoll, G. F., 1989. *Radiation detection and measurement* John Wiley & Sons, Inc.
- Kumar, T. K., Reddy, K. V., 1997. Effective atomic numbers for materials of dosimetric interest. *Radiation Physics and Chemistry* 50, 6, 545-553.
- Kurudirek, M., 2011. Bazı çoklu yapıdaki maddelerin foton etkileşimi, foton enerji soğurması, foton kuvvetlendirme faktörü ve hızlı nötron azaltma tesir kesitleri açısından incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Kurudirek, M., Aygun, M., Erzeneoğlu, S. Z., 2010. Chemical composition, effective atomic number and electron density study of trommel sieve waste (TSW), Portland cement, lime, pointing and their admixtures with TSW in different proportions. *Applied Radiation and Isotopes* 68, 1006-1011.
- Kurudirek, M., Çelik, A., 2012. A simple method to determine effective atomic numbers of some compounds for multi-energetic photons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 689, 75-78.
- Lide, D.R., 1996. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 76th ed. CRC Press Inc., New York.
- Lin, S.Y., Chu, T.C., LİN, J.P., 2001. Monte Carlo Simulation of a Clinical Linear Accelerator. *Applied Radiation and Isotopes* 55, 759-765.
- Lingam, S. C., Babu, K. S., Reddy, D. V. K., 1984. Total gamma ray cross sections and effective atomic numbers in compounds in the energy region 32 to 662 keV.

- Indian J. Phys. 58A, 285-287.
- Manjunathaguru, V., Umesh, T. K., 2006. Effective atomic numbers and electron densities of some biologically important compounds containing H, C, N and O in the energy range 145-1330 keV. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 39, 3969-3981.
- Manjunathaguru, V., Umesh, T. K., 2007. Total interaction cross sections and effective atomic numbers of some biologically important compounds containing H, C, N and O in the energy range 6.4-136 keV. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40, 3707-3718.
- Manjunathaguru, V., Umesh, T. K., 2009. Simple parameterization of photon mass energy attenuation coefficients of H-, C-, N- and O-based samples of biological interest in the energy range 200-1500 keV. *Pramana Journal of Physics* 72, 2, 375-387.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., 2007. Effective atomic numbers for photon energy attenuation of essential amino acids in the energy range 1 keV to 20 MeV. *Nucl. Instr. And Meth. B* 264, 9-14.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Gerward, L., 2008. Studies on effective atomic number, electron density and kerma for some fatty acids and carbohydrates. *Phys. Med. Biol.* 53, 377-386.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Gerward, L., 2009. Photon interaction and energy attenuation in glass: A transparent gamma ray shield. *Journal of Nuclear Materials* 393, 465-472.
- McCrary, J. H., Plassmann, H.A., Puckett, J. M., Conner, A. L., Zimmermann, G.W., 1967. X-Ray Attenuation-Coefficient Measurements. *Physical Review* 153, 307-312.
- Midgley, S., 2006. Angular width of a narrow beam for X-ray linear attenuation coefficient measurements. *Radiation Physics and Chemistry* 75, 945-953.
- Midgley, S., Millarz, R M., Dudsonz, J., 1998. A feasibility study for megavoltage cone beam CT using a commercial EPID. *Physics in Medicine and Biology* 43 , 155-169.
- Özdemir, Y., Kurudirek, M., 2009. A study of total mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for various organic and inorganic compounds at 59.54 keV. *Annals of Nuclear Energy* 36, 1769-1773.
- Perumallu, A., Rao, A. S. N., Rao, G. K., 1984. Photon interaction measurements of certain compounds in the energy range 30-660 keV. *Can. J. Phys.* 62, 454.
- Reddy, A. C., Janardhan, S., Murthy, C. R., Rao, A. S. N., 1999. Estimation of trace elements in water matrix from photon attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry* 56, 521-524.
- Renner, O., Uschmann, I., Förster, E., "Diagnostic potential of advanced X-ray spectroscopy for investigation of hot dense plasmas", *Laser and Particle Beams*, 22,25-28, 2004.
- Shivaramu, V. Ramprasath, 2000. Effective atomic numbers for photon energy attenuation and energy dependence of some thermoluminescent dosimetric compounds. *Nucl. Instrum. Methods B* 168, 294-304.
- Shivaramu, Vijayakumar, R., Rajasekaran, L., Ramamurthy, N., 2001. Effective atomic numbers for photon energy attenuation of some low-Z substances of dosimetric interest. *Rad. Phys. and Chem.* 62, 371-377.

- Sidhu, S. G., Singh, K., Singh, P. J., Mudahar S. G., 1999. Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements. *Radiation Physics and Chemistry* 56, 535-537.
- Singh, K., Kaur, R., Kumar, V., Kumar V., 1996. Study of effective atomic numbers and mass attenuation coefficients in some compounds. *Radiation Physics and Chemistry* 47, 4, 535-541.
- Singh, K., Singh, C., Singh P. S., Mudahar, G. S., 2002. Effect of weight fraction of different constituent elements on the total mass attenuation coefficients of biological materials. *Pramana* 59, 151-154.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuram, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti S. S., Sahota H.S., 2002. Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 194, 1-6.
- Singh, N., Singh, K. J., Singh, K., Singh H., 2006. Gamma-ray attenuation studies of PbO-BaO-B₂O₃ glass system. *Radiation Measurements* 41, 84-88.
- Singh, P.J., Singh, T., Kaur, P., 2008. Variation of energy attenuation buildup factors with incident photon energy and penetration depth for some commonly used solvents. *Annals of Nuclear Energy* 35, 1093-1097.
- Singh, T., Kaur, P., Singh, P. S., 2007. A study of photon interaction parameters in some commonly used solvents. *J. Radiol. Prot.* 27, 79-85.
- Tartari, A., Casnati, E., Baraldi, C., Bonifazzi C., 1998. Z dependence of mass attenuation coefficient at 59.54 keV photon energy: experimental assessment of binding energy effects. *Radiation Physics and Chemistry* 53, 445-448.
- Turgut, Ü., Büyükkasap, E., Şimşek, Ö., Ertuğrul M., 2005. X-ray attenuation coefficients of Fe compounds in the K-edge region at different energies and the validity of the mixture rule. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 92, 143-151.
- Turgut, Ü., Şimşek, Ö., Büyükkasap, E., Ertuğrul M., 2002. X-Ray attenuation coefficients at different energies and the validity of the mixture rule for compounds around the attenuation edge. *Spectrochimica Acta Part B* 57, 261-266.
- Valais, I., Michail, C., David, S., Konstantinidis, A., Cavouras, D., Kandarakis, I., Panayiotakis, G.S., 2008. Luminescence emission properties of (Lu,Y)₂SiO₅:Ce (LYSO:Ce) and (Lu,Y)AlO₃:Ce (LuYAP:Ce) single crystal scintillators under medical imaging conditions. *IEEE Transactions on Nuclear Science* . 55, 785-789

ÖZGEÇMİŞ

15 Ocak 1978 yılında Erzurum Pasinler doğumlu Alpdoğan ÇELİK Pasinler İbrahim Hakkı İlkokulundan mezun olduktan sonra ortaokul ve lise öğrenimine Erzurum Anadolu Lisesinde devam etmiştir. 1997 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünü kazanmış, 2001 yılında lisans diploması almaya hak kazanmıştır. Aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığında öğretmenlik mesleğine başlamış olup 2009 yılında Pasinler Anadolu Lisesinde müdür yardımcılığı yönetici kadrosuna atanmıştır. Halen bu görevde olup, bu görevinin yanı sıra akademik çalışmalara da devam etmektedir.