T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAZI YAPI MALZEMELERİNİN RADYASYON GEÇİRGENLİĞİ AÇISINDAN MONTE CARLO YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Ömer Faruk ÇİÇEK

FİZİK ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA

2020

Dr. Öğr. Üyesi Selami PALAZ danışmanlığında, Ömer Faruk ÇİÇEK'in hazırladığı **"Bazı Yapı Malzemelerinin Radyasyon Geçirgenliği Açısından Monte Carlo Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi"** konulu bu çalışma 08/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Selami PALAZ .....

Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı SARPÜN .....

Üye : Doç. Dr. Mustafa DURGUN .....

Bu Tezin Fizik Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET…… i
ABSTRACT …… ii
TEŞEKKÜR …… iii
ŞEKİLLER DİZİNİ …… iv
ÇİZELGELER DİZİNİ …… vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ …… vii
1. GİRİŞ …… 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR …… 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM …… 10
3.1. Radyasyon Nedir? 10
3.1.1. Alfa bozunumu …… 11
3.1.2. Beta bozunumu …… 11
3.1.3. Gama ışını …… 14
3.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi ..…… 14
3.2.1. Fotoelektrik olay …… 15
3.2.2. Compton saçılması …… 16
3.2.3. Çift oluşumu …… 17
3.3. Elektromanyetik Radyasyonun Soğrulması …… 18
3.3.1. Lineer zayıflama katsayısı …… 19
3.3.2. Kütlesel zayıflama katsayısı …… 20
3.3.3. Ortalama serbest yol …… 21
3.3.4. Yarı değer kalınlığı …… 21
3.4. Radyasyon Kaynakları …… 22
3.4.1. Doğal radyasyon kaynakları …… 23
3.4.2. Yapay radyasyon kaynakları …… 24
3.5. Radyasyonun Biyolojik Etkileri …… 24
3.5.1. Moleküler düzeyde etkiler …… 25
3.5.2. Hücresel düzeyde etkiler …… 25
3.6. Radyasyondan Korunma …… 25
3.6.1. Dozimetreler …… 26
3.6.2. Radyasyondan korunmaya yönelik zırh …… 29
3.7. Monte Carlo Yöntemi …… 32
3.8. MCNP …… 34
3.9. XCOM Programı …… 39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA …… 42
4.1. Giriş …… 42
4.2. Hesaplama Yöntemi …… 44
4.3. Lineer Zayıflama Katsayıları …… 45
4.4. Kütlesel Zayıflama Katsayıları …… 60
4.5. Ortalama Serbest Yol Değerleri …… 63
4.6. Yarı Değer Kalınlık Değerleri …… 64
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER …… 65
5.1. Sonuçlar …… 65
5.2. Öneriler …… 68
KAYNAKLAR …… 70
ÖZGEÇMİŞ …… 74

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BAZI YAPI MALZEMELERİNİN RADYASYON GEÇİRGENLİĞİ AÇISINDAN MONTE CARLO YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Ömer Faruk ÇİÇEK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selami PALAZ
Yıl: 2020, Sayfa: 74

Günümüzde radyasyon; güvenlik, sağlık, madde tanımlama ve enerji gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Radyasyonun verimli bir şekilde kullanılmasının yanı sıra radyasyondan korunma da önem arz etmektedir. Bu bağlamda üç temel unsur vardır. Radyasyondan belirli mesafede durmak, radyasyona maruz kalma süresini minimum tutmak ve zırhlama yapmak. Zırhlamada kullanılan materyallerin içerikleri ve yoğunlukları radyasyonu geçirme özelliklerini etkileyen bir faktördür.

Bu çalışmada sodyum fosfat içerikli, karışım yüzdeleri farklı olan altı örnek cam malzeme incelenmiştir. Özellikle radyasyon işçileri için gözlük ve cam paravanlarda zırh olarak kullanılabilme durumunu araştırmak için lineer zayıflama katsayıları, kütlesel zayıflama katsayıları, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıkları tespit edilmiştir. Bu işlem her örnek cam üzerinden, beş farklı enerjide (53.16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV) Monte Carlo Yöntemi tabanlı MCNP programı kullanılarak 10 farklı kalınlık için gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların sonuçları XCOM programından alınan veriler ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Lineer ve kütlesel zayıflama katsayısı değerleri %1'in altında fark ile hesaplanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Zırhlama, lineer ve kütlesel zayıflama katsayısı, MCNP, XCOM

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF RADIATION PERMEABILITY OF SOME BUILDING MATERIALS USING MONTE CARLO METHOD

Ömer Faruk ÇİÇEK

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selami PALAZ
Year: 2020, Page: 74

Today, radiation; It is used in many areas such as safety, health, substance identification and energy. In addition to the efficient use of radiation, radiation protection is also important. In this context, there are three basic elements. Standing at a certain distance from radiation, keeping radiation exposure to a minimum and shielding. The contents and densities of the materials used in shielding are a factor affecting the radiation transmission properties.

In this study, six sample glass materials with sodium phosphate content and different mixing percentages were examined. Linear attenuation coefficients, mass attenuation coefficients, mean free path and half-value layers were determined to investigate the use of shield in glasses and glass screens, especially for radiation workers. This process was performed on each sample glass for five different energies (53.16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV and 661.6 keV) using the Monte Carlo Method based MCNP program for 10 different thicknesses. The results of the simulations were evaluated by comparing them with the data from the XCOM program. Linear and mass attenuation coefficient values were calculated with a difference below 1%.

KEY WORDS: Shielding, Linear and mass attenuation coefficient, MCNP, XCOM

TEŞEKKÜRLER

Tezin konusunun seçiminde, uygulamasında ve çalışmamda yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Selami PALAZ'a, tez çalışmamda bana yardımcı olan sayın Öğr. Gör. Mehmet Murat YAŞAR ve Dr. Nuri YORULMAZ'a teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Radyasyon Çeşitleri 10
Şekil 3.2. Alfa Bozunumu 11
Şekil 3.3. β^- Bozunumu 12
Şekil 3.4. β^+ Bozunumu 13
Şekil 3.5. Elektron Yakalama Olayına Bir Örnek (7Be) 13
Şekil 3.6. Gama Bozunumu 14
Şekil 3.7. Soğurucu Ortamın Atom Numarasına Göre Foton Etkileşimlerinin Gerçekleşme Olasılıkları 15
Şekil 3.8: Fotoelektrik olay; etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonra 16
Şekil 3.9. Compton Olayı 17
Şekil 3.10. Çift Oluşumu 18
Şekil 3.11. Fotonların soğrulması 19
Şekil 3.12. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarının Küresel Radyasyon Dozuna Oransal Katkıları 23
Şekil 3.13. Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Küresel Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri 23
Şekil 3.14. Dünya Genelinde Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozları ve Oransal Değerleri 24
Şekil 3.15. Film Dozimetre 27
Şekil 3.16. Termolüminesans Dozimetreler 27
Şekil 3.17. Kalem Dozimetre 28
Şekil 3.18. İyonizasyon odasının genel yapısı 28
Şekil 3.19. Radyasyon Çeşitlerine Göre Zırh Malzemesi 29
Şekil 3.20. Kurşunlu Önlükler 30
Şekil 3.21. Tiroid Koruyucu 30
Şekil 3.22. Zırhlı Paravanlar 31
Şekil 3.23. Zırhlı Gözlükler 31
Şekil 3.24. Monte Carlo yönteminin işleyiş algoritması 33
Şekil 3.25. Örnek bir MCNP input dosyası 35
Şekil 3.26. Örnek MCNP input dosyasının görsel hali 36
Şekil 3.27. XCOM anasayfa 40
Şekil 3.28. XCOM materyal veri giriş sayfası 40
Şekil 3.29. XCOM sonuç ekranı 41
Şekil 4.1 Na_2O içeriği ile sodyum fosfat camlarının yoğunluk ve molar hacminin değişimi ... 43
Şekil 4.2. Kalınlığa bağlı lineer zayıflama katsayısındaki değişim 44
Şekil 4.3. Eğri uydurma (Fitting) sonrası lineer zayıflama katsayısının kalınlığa bağlı değişimi 45
Şekil 4.4. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S1 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 52
Şekil 4.5. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S2 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 53
Şekil 4.6. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S3 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 54
Şekil 4.7. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S4 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 55
Şekil 4.8. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S5 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 56
Şekil 4.9. 53,16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV' lik foton enerjileri için S6 malzemesinin simülasyon sonuçlarının grafiği 57
Şekil 4.10. Lineer zayıflama katsayısı için S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin MCNP ile XCOM grafiklerinin karşılaştırılması 59

Şekil 4.11. Kütlesel zayıflama katsayısı için S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin MCNP ile XCOM grafiklerinin karşılaştırılması …… 62
Şekil. 4.12. Bütün cam örnekleri için ortalama serbest yol değerlerinin kıyaslanması …….. 63
Şekil 4.13. Bütün cam örnekleri için yarı değer kalınlık değerlerinin kıyaslanması …….. 64
Şekil 4.14. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin lineer zayıflama katsayılarının karşılaştırılması …….. 66
Şekil 4.15. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin kütlesel zayıflama katsayılarının karşılaştırılması …….. 67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. MCNP' de geometrileri oluşturmak için kullanılan bazı yüzey kartları …… 38
Çizelge 3.2. MCNP' de çalışılabilecek parçacık türleri …… 38
Çizelge 3.3. MCNP' de kullanılan tally kartları …… 39
Çizelge 4.1 Sodyum fosfat camlarının ($xNa_2O \cdot (100\text{-}x)\ P_2O_5$) kimyasal bileşimi (mol%), yoğunluk değerleri ve molar hacimleri ……..……..... 43
Çizelge 4.2. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S1 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 46
Çizelge 4.3. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S2 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 47
Çizelge 4.4. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S3 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 48
Çizelge 4.5. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S4 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 49
Çizelge 4.6. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S5 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 50
Çizelge 4.7. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S6 malzemesinin I/I_0 değerleri ……... 51
Çizelge 4.8. Lineer zayıflama katsayısı için malzemelerin MCNP ile XCOM karşılaştırılması 58
Çizelge 4.9. Kütlesel zayıflama katsayısı için malzemelerin MCNP ile XCOM karşılaştırılması …….. 61
Çizelge 4.10. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemeleri için MFP değerleri (cm) ……... 63
Çizelge 4.11. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemeleri için HVL değerleri (cm) ……... 64
Çizelge 4.12. S6 cam örneğinin kütlesel zayıflama katsayısının (cm^2/g) literatür ile kıyaslanması ……... 69

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission – Kanada Nükleer Güvenlik Komisyonu
DNA	Deoksiribo Nükleik Asit
GEANT4	Monte Carlo Yöntemlerini Kullanarak "Parçacıkların Maddeden Geçişinin Simülasyonu" İçin Bir Platform
HMO	Heavy Metal Oxides – Ağır Metal Oksit
HVL	Half Value Layer – Yarı Değer Kalınlığı
ICRP	Uluslararası Radyasyon Güvenliği Komitesi
ICRU44	Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi
MCA	Multi Channel Analyser – Çok Kanallı Analizör
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MCNPX	Monte Carlo N-Particle Transport Code
MCNP4-C	Monte Carlo N-Particle 4C Version
MCNP-5	Monte Carlo N-Particle 5 Version
MFP	Mean Free Path – Ortalama Serbest Yol
NaI(TI)	Sodyum İyodür Talyum Sintilasyon Dedektörü
NIST	Ulusal Standartlar ve Teknolojileri Enstitüsü
RNA	Ribo Nükleik asit
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu
UAEA	Uluslararası Atom Enerji Ajansı
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation-Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
WinXCOM	Radyasyon Işınlarının Zayıflama Katsayılarını Hesaplamak İçin Kullanılan Program
XCOM	NIST Tarafından Oluşturulan Foton Tesir Kesiti Kütüphanesi Programı
A	Atom numarası
Z	Proton sayısı
N	Nötron sayısı
m	Kütle
c	Işık hızı
n	Nötron
p	Proton
e^-	Elektron
e^+	Pozitron
γ	Gama Işını
E	Enerji
h	Planck sabiti
ν	Frekans
$h\nu$	Foton enerjisi
P	Momentum
m_0	Elektronun durgun kütlesi
λ	Dalga boyu
keV	Kilo elektron volt
MeV	Mega elektron volt
GeV	Giga elektron volt
Sv	Sievert
μ	Lineer zayıflama katsayısı
μ_m	Kütlesel zayıflama katsayısı

1. GİRİŞ

Radyasyon, atomların iç dönüşüm geçirmeleri sonucunda ortaya çıkan bir enerji olup, kontrol altında tutulması zor ve dikkatli kullanılmadığında canlı hayatı açısından yaratacağı tehlikeler bakımından önem teşkil etmektedir. Radyasyonun özellikle sağlıkta; tanı ve tedavi aşamasında kullanılmasında hem hasta sağlığı hem de radyasyon ile direk etkileşimde olan radyasyon çalışanlarının aldıkları radyasyon dozlarını bilmek ve buna göre önlemler almak hayati önem taşır (Anonim, 2010). Bu bağlamda radyasyon güvenliği açısından en önemli detay, doğrudan kontrol altına alınamayan bu enerji türüne karşılık zırhlamanın doğru yapılması ilk akla gelen unsurdur (Resmî Gazete, 24.03.2000).

Radyasyon madde içerisinde hareket ederken, maddeyi oluşturan atomlar ile birçok etkileşim geçirirler ve bu etkileşimler sonucunda enerjilerinin bir kısmını maddeye aktarırlar (CNSC, 2012). Eğer doğru bir zırhlama yapılmaz ise radyasyon madde içerisinden geçerken enerjisinin tümünü aktaramaz ve zırh malzemesini geçebilir (Shultis ve Faw, 2010). Zırhı geçen radyasyon sahip olduğu kalan enerjisine göre canlı dokusu ile etkileşerek sağlık açısından ciddi hasarlara yol açabilir.

Radyasyona maruz kalma, biyolojik dokular üzerinde tehlikeler barındırır. Geçmişten bugüne kadar bu alanda yapılan birçok çalışma mevcut olup farklı materyaller incelenerek en uygun zırh malzemesi bulunmaya çalışılmaktadır. Uygun zırh malzemesi seçilirken dikkat edilecek en önemli unsur, malzemenin kolay elde edilebilir olmasının yanı sıra radyasyonu en iyi şekilde zırhlayabilmektir. Ayrıca zırhlama malzemesinin hazırlanması, taşınması, duruma göre inşası ile ekonomik olması, seçilen zırhlama malzemesi açısından seçim tercihleri arasında bulunmaktadır.

Sonuç olarak seçilen zırhlama malzemesi üzerinde özellikle canlıların doğrudan etkileşim içinde olduğu, özellikle hastalıkların tanı ve tedavisinde, deneysel olarak ölçümler almak etik açıdan doğru olmayacağı gibi aynı zamanda tehlikelidir.

Bu gibi durumlarda günümüz teknolojisi ile bilgisayarlar kullanılarak en ideal ortamlar hazırlanma suretiyle olayların simülasyonu şeklinde hesaplamalar yapılır.

Radyasyon, doğası gereği bir rastgelelik barındırır. Önceden kesin olarak tahmin edilemez bir hareket ve etkileşim söz konusudur. Yani radyasyon istatistiksel bir mantık içerisinde hareket eder. Monte Carlo, istatistiksel teknikler kullanılarak fiziksel bir olayın ya da matematiksel bir problemin sayısal modeller yardımıyla temsil edilmesi yöntemidir. Bir probleme Monte Carlo Yöntemi uygulandığında, rastgele sayılar kullanılarak, bu problemdeki değişkenler belli olasılık dağılım fonksiyonları ile ifade edilir ve hesaplanmak istenen parametre, kabul edilebilir hata sınırları içinde olmak şartıyla simülasyonlar sonucunda elde edilir.

Bu amaçla bu çalışmada temeli rastgelelik üzerine kurulu bir istatistik yöntemi olan ve dünya çapında onaylanmış bir yöntem olan Monte Carlo yöntemine dayalı, radyasyonun tüm etkileşim ve hareket ihtimallerini fiziksel denklemler ile içinde barındıran bir radyasyon taşıma programı olan MCNP (Monte Carlo N-Particle) kullanılacaktır.

MCNP ile gerçekte olması muhtemel radyasyon hareketleri, bilgisayar ortamında uygun alan yaratılarak belli bir istatistiksel sayıda simülasyonu gerçekleştirir. Yapılan simülasyonlar sonucunda MCNP, Monte Carlo yöntemi ile hesapladığı sonuçları yine bir istatistiksel hata dahilinde kullanıcıya aktarır (Yorulmaz, 2006).

Bu bağlamda yapılacak olan çalışma, özellikle radyasyon çalışanlarının kullanımına uygun olup olmadığını tespit etmek için bazı cam malzemelerinin deneysel ortamdan ziyade simülasyon yöntemiyle en doğru sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir. Bu uygunluğun tespiti için farklı moleküler ağırlıklardan ve yoğunluklardan meydana gelen altı farklı *sodyum fosfat* cam ($xNa_2O\cdot(100\text{-}x)\ P_2O_5$) örneği incelenmiştir. Ayrıca bu inceleme beş farklı gama enerjisi için ayrı ayrı tekrarlanmış olup, her bir örnek 10 farklı kalınlıkta simüle edilmiştir. Toplamda 300 simülasyon gerçekleştirilmiş olup, her bir simülasyon $1x10^6$ foton öyküsü için

hesaplanmıştır. Bu tezde örnekler Monte Carlo Yöntemini kullanan MCNP (Monte Carlo N-Particle) programı ile çalışılmıştır.

Sonuç olarak; her bir malzeme için, 5 farklı gama enerjisinde lineer zayıflama katsayısı, kütlesel zayıflama katsayısı, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen veriler XCOM programından alınan sonuçlarla kıyaslanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde radyasyonun zırhlanması ve zırh malzemesinin özelliklerini ortaya koymaya çalışan birçok çalışma mevcuttur. Bu bölümde literatürde mevcut, özellikle lineer ve kütlesel zayıflama katsayıları ile ilgili bazı çalışmaların içeriğinden bahsedilecektir.

Bashter, 1997 yılında yayınladığı bir makalede; çeşitli beton içerikleri için 10 keV'den 1 GeV enerjili fotonlar için lineer ve kütlesel zayıflama katsayılarını teorik olarak hesaplamıştır. Hesapladığı bu değerler ile 1.5- 6 MeV aralığındaki gama ışınları için deneysel olarak elde edilen sonuçlarla kıyaslamış ve bir uyum gözlemiştir. Ayrıca bu beton içeriklerini kullanarak hızlı nötronlar için etkili makroskobik tesir kesitlerini (removal cross-section) hesaplamıştır.

Alam ve arkadaşları 2001 yılında; Bangladeş'in Chittagong ve Cox's Bazar bölgesinden topladıkları farklı toprak, kum, yapı malzemeleri ve ağır plaj mineral örnekleri için lineer ve kütlesel zayıflama katsayılarını, yüksek çözünürlüklü bir HPGe dedektörü ile ölçmüşlerdir. Bu çalışma için monoenerjik gama enerjileri ile ^{133}Ba, ^{137}Cs ve ^{60}Co nokta kaynaklarından yararlanılmıştır. Ayrıca ölçülen kütlesel zayıflama katsayı değerleri benzer ülkelerde benzer malzemeler için yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Akkurt ve arkadaşları 2004 yılında, barit, mermer ve limra için lineer ve toplam kütlesel zayıflama katsayılarını XCOM (Ulusal Standartlar ve Teknolojileri Enstitüsü (NIST) tarafından oluşturulan foton tesir kesiti kütüphanesi programı) programı kullanarak hesaplamışlardır. Bu çalışmayı 1 keV-300 MeV enerji aralığındaki fotonlar için gerçekleştirmişlerdir. Hesaplanan sonuçlar, ölçülen toplam lineer zayıflama katsayılarına dayalı tahmin katsayıları ile karşılaştırılmıştır.

Akkurt ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları diğer bir çalışmada ise, farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15, %20, %25) mermer karışımlarına sahip betonlar için

lineer zayıflama katsayılarını bilgisayara bağlı bir NaI (TI) dedektörü ve çok kanallı analizör (Multi-Channel-Analyser (MCA)) içeren bir gama spektrometresi kullanılarak hesaplamışlardır. Burada ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynaklarından sırasıyla 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili gama ışınları kullanarak yaptıkları deneysel ölçüm sonuçlarını, XCOM' da 1 keV ve 1 GeV aralığındaki enerjileri kullanarak hesaplamış oldukları sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Literatürde sadece zırhlama malzemeleri ile ilgili çalışmalar haricinde canlı dokular için yapılan makaleler de mevcuttur. Bu bağlamda; Tomal ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları bir çalışmada lineer zayıflama katsayılarını normal ve neoplastik göğüs dokusu (meme dokusu) için deneysel olarak ölçmüşlerdir. Bu çalışmada 8-30 keV enerji aralığındaki monoenerjik fotonlar kullanılmıştır. Deney düzeneği dar demet ince hedef geometrisi kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar ise literatürdeki teorik verilerle kıyaslanarak uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Canlı dokular üzerinde yapılan çalışmalara bir örnekte Phelps ve arkadaşları 1975 yılında yağ, pankreas, kas, karaciğer, beyin dokusu, omurilik sıvısı ve kan gibi birçok canlı dokusu için lineer zayıflama katsayılarını hesaplamışlardır. Deneysel düzenekte ^{241}Am, ^{125}l, ^{153}Gd, ^{170}Tm ve ^{57}Co olmak üzere farklı radyoaktif kaynaklar ile çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile literatür kıyaslandığında 18–60 keV ve 60-136 keV enerji aralıklarında sırasıyla %0.1-0.3 ve %0.2-0.4 gibi bir hata payına sahip olduklarını göstermişlerdir.

Thinh ve Leroux 1979 yılında, kütlesel zayıflatma katsayısı ile X ışını enerjisi veya dalga boyu arasında basit bir ilişki türetmek için yeni bir yaklaşım türü ortaya çıkaran bir makale yayınlamışlardır. Atom numaraları 1-94 aralığında bulunan elementler için yaptıkları çalışmada, 1-40 keV enerjili fotonlar için kütlesel zayıflama katsayı hesabını amprik bir metot ile yapmışlardır. Çalışmanın sonuçları literatür ile %5 gibi iyi bir uyuma sahiptir.

Özellikle bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesi ile, deneysel olarak yapılan çalışmaların yanında riski minimize etmek için simülasyon ortamları

oluşturulabilmektedir. Bazı bilgisayar simülasyon programları kullanarak malzemelerinin zayıflama katsayıları hesaplanabilmektedir. Literatürde bu bağlamda birçok simülasyon programı ile yapılan birçok çalışma mevcuttur.

Al-Buriahi ve arkadaşları 2019 yılında ICRU44 (Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi) ve ICRP (Uluslararası Radyasyon Güvenliği Komitesi) gibi kuruluşların raporlarında içerikleri ve önem dereceleri belirtilen kas, yağ ve kan dokuları için kütlesel zayıflama katsayılarını GEANT4 simülasyon programı yardımıyla hesaplamışlardır. Yapılan çalışma 1 keV-100 GeV enerji aralığında XCOM verileri ile iyi bir uyum gösterdiği ortaya konmuştur. Ayrıca, incelenen dokuların su denkliğini değerlendirmek için tüm enerji bölgesinde su için kütlesel zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. 8 keV ‘de su ile bahsedilen yumuşak doku arasında maksimum %8.8'lik bir fark gözlenerek; yumuşak dokunun kan ve kas dokusu için iyi bir doku eşdeğeri olduğu gösterilmiştir.

Bazı karbon çeliği ve paslanmaz çelik alaşımlarının kütlesel zayıflama katsayılarını hesaplamak için Geant4 ve MCNP simülasyon programlarını kullanan Singh ve arkadaşları, 279.1 keV, 661.6 keV, 662 keV, 1115.5 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili gama ışınları kullanmışlardır. Geant4 ve MCNP simülasyon sonuçlarını, mevcut deneysel sonuçlar ve teorik WinXcom ile karşılaştırmış ve iyi bir uyum gözlemlemişlerdir. Bulunan sonuçların deneysel sonuçlar ile örtüştüğünden, bu tür çalışmalar radyasyon dozimetrisi, tıbbi ve radyasyon zırhı gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabileceğini önermişlerdir.

Obaid ve arkadaşları 2018’ de bazı kaya türlerinin (volkanik kaya, pembe granit, kumtaşı, kompakt bazalt, yeşil bazalt, alümina-silkinat taşları) lineer zayıflama katsayılarını 122 keV, 356 keV, 511 keV, 662 keV, 1170 keV, 1275 keV ve 1330 keV enerjili fotonlar için MCNPX ve Geant4’te hesaplayıp, simülasyonda elde ettikleri kütlesel zayıflama katsayıları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında makul bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Zırhlama denince çoğu zaman akla, beton duvarlar veya kurşun-çelik zırhlar gelmektedir. Ama özellikle radyoformasotik ilaç üretimi ve radyolojide film çeken radyasyon çalışanları için zırh olarak kullanılabilecek gözlük camları veya cam paravanlara da ihtiyaç vardır. Bu anlamda literatürde birçok çalışma mevcuttur.

$xBi_2O_3(1-x)B_2O_3$ (x= 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.55) formülüne bağlı olarak belirli oranlarda ve kalınlıklarda oluşturulan cam numunelerinin kütlesel zayıflama katsayıları Singh ve arkadaşları tarafından 2002 yılında 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar için dar ışın demeti yöntemini kullanarak belirlenmiştir. Camların kimyasal bileşimindeki değişiklikler nedeniyle kütlesel zayıflama katsayılarında önemli farklılıklar gözlemleyen Singh ve arkadaşları, bu kütlesel zayıflama katsayılarını daha sonra bizmut konsantrasyonu ve enerjisi bilinen cam örneklerinin etkin atom numaralarını belirlemek için kullanmışlardır.

Khanna ve arkadaşları 1996 yılında PbO, CdO, Bi_2O_3 ve B_2O_3 molekülleri ile farklı oranlarda oluşturdukları 15 cam numunesinin [(0.25) PbO + (0.75) B_2O_2, (0.30) PbO + (0.70) B_2O_2, (0.36) PbO + (0.64) B_2O_2, (0.45) PbO + (0.55) B_2O_2, (0.50) PbO + (0.50) B_2O_2, (0.57) PbO + (0.43) B_2O_2, (0.25) PbO + (0.10) CdO + (0.65) B_2O_2, (0.25) PbO + (0.20) CdO + (0.55) B_2O_2, (0.25) PbO + (0.30) CdO + (0.45) B_2O_2, (0.25) PbO + (0.35) CdO + (0.40) B_2O_2, (0.25) PbO + (0.40) CdO + (0.35) B_2O_2, (0.20) Bi_2O_3 + (0.80) B_2O_3, (0.30) Bi_2O_3 + (0.70) B_2O_3, (0.40) Bi_2O_3 + (0.60) B_2O_3, (0.50) Bi_2O_3 + (0.50) B_2O_3] lineer zayıflama katsayılarını ve kütlesel zayıflama katsayılarını 662 keV'lik foton enerjisi kullanarak hesaplamışlardır. Bu camları koruyucu özelliklerini, kurşun, kurşunlu cam ve beton gibi standart koruyucu malzemelerle karşılaştırmış ve bu camların şeffaf radyasyon kalkanı olarak potansiyel bir uygulamaya sahip olduğunu irdelemişlerdir.

ZnO, PbO ve B_2O_3 moleküllerinin farklı oranlarda kullanılarak [(%10.00 ZnO + %20.00 PbO + %70.00 B_2O_3), (%13.33 ZnO + %26.67 PbO + %60.00 B_2O_3), (%20.00 ZnO + %40.00 PbO + %40.00 B_2O_3), (%20.83 ZnO + %41.67 PbO + %37.50 B_2O_3), (%21.50 ZnO + %43.00 PbO + %35.50 B_2O_3), (%23.00 ZnO + %46.00 PbO + %31.00 B_2O_3), (%24.50 ZnO + %49.00 PbO + %26.50 B_2O_3), (%26.00 ZnO + %52.00

PbO + %22.00 B_2O_3) oluşturulan camların kütlesel zayıflama katsayılarını, ortalama serbest yolu (MFP), etkin atom numaralarını ve elektron yoğunluklarını, enerjileri 511 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV'lik fotonlar kullanarak deneysel sonuçlar ile elde eden Singh ve arkadaşları (2003), bu sonuçları teorik verilerle karşılaştırmışlardır. Bu deneyde, camların özgül hacimlerini yoğunluk ölçümlerinden türetmiş ve bileşimin bir fonksiyonu olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak bu camların radyasyon kalkanı konusunda potansiyel uygulamalara sahip olduklarına dikkat çekmişlerdir.

Kumar 2017' de yaptığı deneysel çalışmada, 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV'lik enerjiye sahip fotonlar kullanarak, hazırladığı altı farklı cam numunenin ($Pb_3B_4O_9$, $Pb_{11}B_{16}Li_2O_{36}$, $Pb_5B_8Li_2O_{18}$, $Pb_9B_{16}Li_6O_{36}$, $Pb_2B_4Li_2O_9$, $Pb_7B_{16}Li_{10}O_{36}$) kütlesel zayıflama katsılarını hesaplamıştır. Bulunan bu deneysel kütlesel zayıflama katsayı sonuçlarını ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu değerlerini hesaplamak için kullanmış ve bu sonuçlar ışığında camların radyasyondan korunma verimliliği noktasında birbirleri ile karşılaştırmıştır. Daha sonra hazırladığı ve deneysel olarak incelediği bu cam numunelerini standart betonlar ve standart koruyucu camlarla kıyaslamış $Pb_3B_4O_9$'un en etkili zırh olduğunu belirtmiştir.

2014 yılında El-Khayatt ve arkadaşlarının, altı farklı ağır metal oksitli (heavy metal oxides, HMO) cam örnekleri için farklı enerjilerdeki gama ışınlarına karşı koruyuculuğunu tespit etmek için MCNP-4C simülasyon programını kullanarak kütlesel zayıflama katsayısını, toplam tesir kesiti ve ortalama serbest yol gibi verileri hesaplamışlardır. Bu verileri daha önce belirli enerji aralıklarında yapılan deneysel sonuçlarla ve XCOM verileri ile karşılaştırmıştır. Bu sonuçlar ışığında deneysel olarak yapılamayacak araştırmaların Monte Carlo Yöntemi kullanılarak yapılabileceğini göstermiştir.

Dong ve arkadaşları 2017' deki çalışmalarında lityum, çinko, bizmut ve bor gibi elementlerden oluşturulmuş cam sistemlerinin çeşitli radyasyon zırhlamalarında kullanılabileceğini incelemiş ve bu amaçla kütlesel zayıflama katsayılarını 0.015 MeV ile 10 MeV aralığındaki foton enerjilerini kullanarak XCOM ve MCNP5 simülasyon programı ile elde etmişlerdir. XCOM ve MCNP5 verilerinin birbirine uyumlu olduğu

görülmüş ve bu veriler ile etkin atom numarasını (Z_{eff}), yarı değer kalınlığını (HVL) ve ortalama serbest yolu (MFP) hesaplamışlardır. Bu çalışmada ayrıca; hesaplamada kullanılan cam sistemlerinin farklı camlar ve betonlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.

2018' de MCNP5 ve Geant4 simülasyon programlarını kullanan Elbashir ve arkadaşları, Bi_2O_3-ZnO-B_2O_3 ve TeO_2-ZnO-CdO-Li_2O-V_2O_5 gibi cam sistemleri için 0.356 MeV, 0.662 MeV, 1.173 MeV ve 1.330 MeV enerjilerinde kütlesel zayıflama katsayılarını hesaplamışlardır ve buldukları sonuçları XCOM verileri ile karşılaştırmışlardır. MCNP5 ve Geant4 ile elde ettikleri sonuçlar XCOM verileri ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Buldukları kütlesel zayıflama katsayılarını kullanarak ortalama serbest yolu, etkin atom numarasını ve yarı değer kalınlığını değerlendirmişlerdir. %60 Bi_2O_3 - %40 B_2O_3 cam numunesi (Bi_2O_3-ZnO-B_2O cam sistemi için) ve %64 TeO2 - %15 ZnO - %20 CdO - %1 V2O5 cam numunesinin (TeO_2-ZnO-CdO-Li_2O-V_2O_5 cam sistemi için) zırhlandırılmış gözlükler için en etkili olduğunu göstermişlerdir.

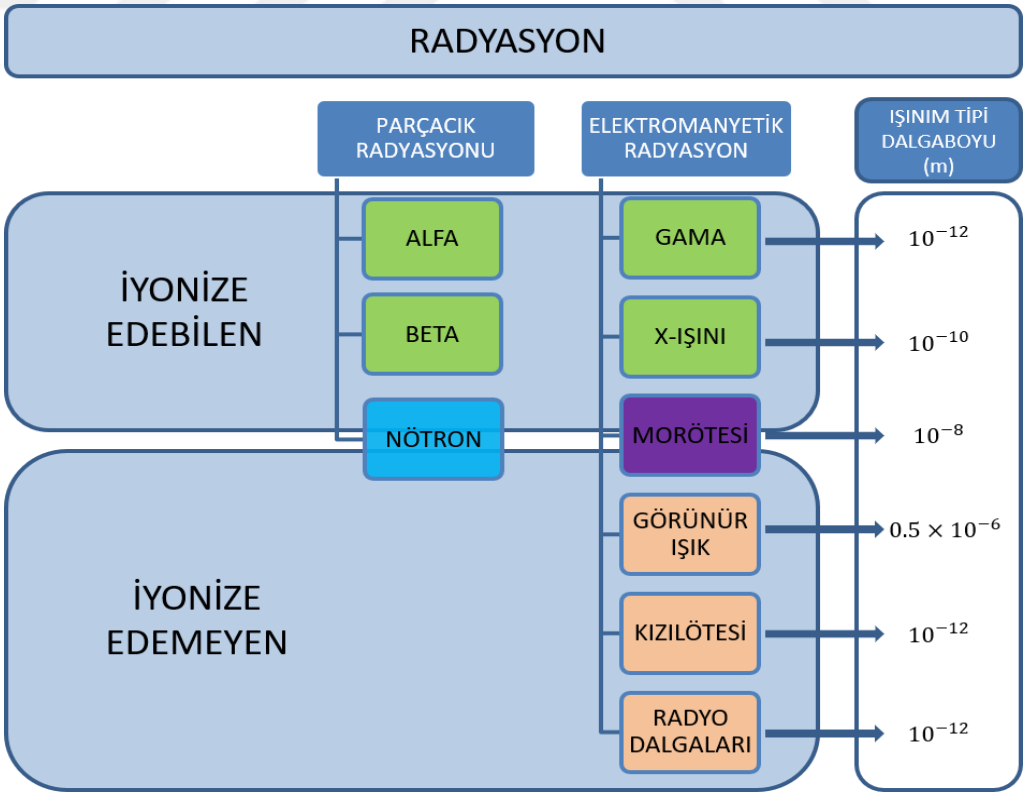
Yapılan güncel çalışmalardan birisi de Lakshminarayana ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yayınladıkları makaledir. Bu çalışmada; TeO_2–B_2O_3–ZnO–La_2O_3 cam numunelerinde, gama ışınları için (0.015 ile 15 MeV enerji aralığında) lineer ve kütlesel zayıflama karakteristikleri, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlıkları, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunlukları incelenmiştir. Ayrıca; hızlı ve termal nötronlar için de (10^{-4} ile 10^{-8} MeV enerji aralığında) makroskobik etkin tesir kesiti, kohorent ve inkohorent saçılma tesir kesitleri, zayıflama tesir kesitleri ve toplam tesir kesitleri incelenmiştir. Bu incelemeyi WinXCOM programı, MCNP5, Geant4 ve Penelope simülasyon kodu ile ayrı ayrı gerçekleştirerek sonuçları kıyaslamışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Radyasyon Nedir?

Atomların doğası gereği sürekli kararlı halde bulunma istekleri vardır. Bu kararlı hale geçişi sağlamak için farklı bozunumlar ve ışınımlar yapabilmektedirler. Bu bozunumlar bazen çekirdekten dışarı parçacık atılımı olarak ortaya çıkarken bazen de çekirdek içindeki dönüşümlerle gerçekleşmektedir.

Radyasyon, doğal veya yapay bir radyoaktif çekirdeğin kararlı hale gelmek için dışarı saldığı parçacık veya elektromanyetik dalgalardır. Parçacık radyasyonuna alfa parçacığı, beta parçacığı ve nötron parçacığı örnek verilebilirken, elektromanyetik radyasyona ise gama ışını, x-ışını, morötesi ışık, görünür ışık, kızılötesi ışık ve radyo dalgaları örnek olarak verilmektedir. Bu radyasyon türleri de iyonize eden ve iyonize etmeyen olarak iki bölüme ayrılmaktadır. (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Radyasyon Çeşitleri

3.1.1 Alfa bozunumu

Doğada birçok atom kararsız halde bulunabilmektedir. Kararsız halde bulunan atomlar farklı bozunumlarla kararlı hale geçerler. Bunlardan biri olan alfa bozunumu; kararsız bir atomdan iki protonun ve iki nötronun çekirdekten atılmasıyla gerçekleşmektedir (Boyes, 2003). Şekil 3.2' de alfa bozunumunun temsili bozunumu örneklendirilmiştir (Davutoğlu, 2008). Atomdan fırlatılan bu alfa parçaları aslında He^{+2} çekirdeğidir (Denklem 3.1). Alfa bozunumu tamamlandıktan sonra toplam kütle numarası, toplam proton sayısı ve toplam enerji korunmaktadır (Denklem 3.2).

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + {}^{4}_{2}He \tag{3.1} $$

$$ Q = \Delta mc^2 = [m(X) - m(X') - m({}^{4}_{2}He)] \cdot c^2 \tag{3.2} $$



Şekil 3.2. Alfa Bozunumu

3.1.2. Beta bozunumu

Kararsız atomlar kararlı hale geçmek için alfa bozunumu yapabildikleri gibi çekirdek içinde nötron-proton veya proton-nötron dönüşümleri de yapabilmektedirler. Bu dönüşümlere Beta bozunumu denir ve üç farklı türü mevcuttur. Bunlar;

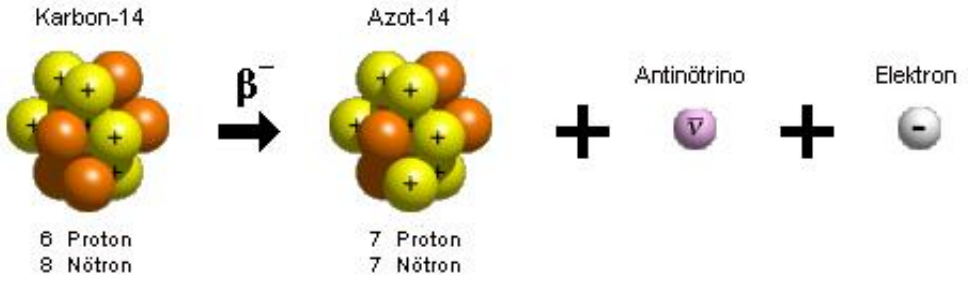
- β^- bozunumu (negatron),
- β^+ bozunumu (pozitron)
- Elektron yakalama

şeklindedir (Hine ve Brownell, 1956).

β^- *bozunumu*; bir atomun çekirdeğinde bulunun nötron sayısının fazlalığı çekirdeğin kararsız olmasına neden olabilmektedir. Bu durumdaki kararsız atomlar, çekirdekteki bir nötronun; bir proton ve bir elektrona dönüşmesi ile daha kararlı hale gelmektedir. Aynı zamanda enerji ve momentumun korunumundan dolayı bir de antinötrino parçacığı ortaya çıkmaktadır (Denklem 3.3). Şekil 3.3' te β^- bozunumu modellenmiştir (Davutoğlu, 2008). Bu dönüşüm sonunda elementin atom numarası değişmez, proton sayısı bir artar ve nötron sayısı bir azalır (Denklem 3.4).

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \tag{3.3}$$

$${}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}_{Z+1}{}^{A}X'_{N-1} + e^- + \bar{\nu} \tag{3.4}$$

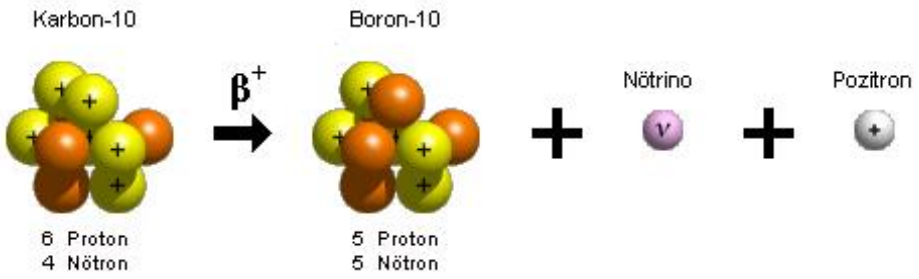


Şekil 3.3. β^- Bozunumu

β^+ bozunumu; bir atomun çekirdeğinde bulunun nötron sayısının azlığı veya proton sayısının fazlalığı çekirdeğin kararsız olmasına neden olabilmektedir. Bu durumdaki kararsız atomların çekirdeğindeki bir proton; bir nötron ve bir pozitrona dönüşerek daha kararlı bir hale gelmektedir. Aynı zamanda enerji ve momentumun korunumundan dolayı bir de nötrino parçacığı ortaya çıkmaktadır (Denklem 3.5). Şekil 3.4' te bu bozunma türü görselleştirilmiştir (Davutoğlu, 2008). Bu dönüşüm sonunda elementin atom numarası değişmez, proton sayısı bir artar ve nötron sayısı bir azalır (Denklem 3.6).

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \tag{3.5}$$

$$ {}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}X'_{N+1} + e^+ + \nu \tag{3.6} $$

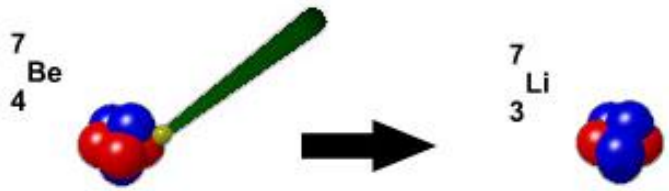


Şekil 3.4. β^+ Bozunumu

Elektron Yakalama Olayı; çekirdeğin karasız durumda olması protonların fazla olmasından kaynaklı ise; atomun yörüngesindeki bir elektron çekirdekteki bir porton ile birleşerek bir nötrona dönüşmektedir. Aynı zamanda enerji ve momentumun korunumundan dolayı bir de nötrino parçacığı ortaya çıkmaktadır (Denklem 3.7). Şekil 3.5' te bu bozunma olayının görseli mevcuttur (Davutoğlu, 2008). Bu dönüşüm ile proton sayısı bir azalırken nötron sayısı bir artmaktadır (Denklem 3.8).

$$ p + e^- \rightarrow n + \nu \tag{3.7} $$

$$ {}^{A}_{Z}X_N + e^- \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}X'_{N+1} + \nu \tag{3.8} $$

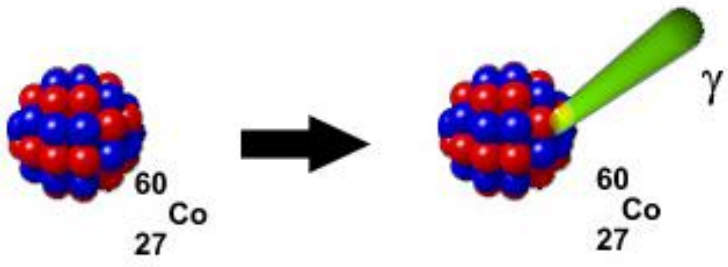


Şekil 3.5. Elektron Yakalama Olayına Bir Örnek (7Be)

3.1.3. Gama ışını

Atom çekirdekleri her zaman kararlı halde bulunmamaktadırlar ve sürekli daha karalı olma eğilimindedirler. Kararlı hale geçerken uğradıkları bozunumlar (alfa bozunumu veya beta bozunumu) veya nükleer reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan enerjiler, çekirdeğin daha kararlı hale gelmesi için atomdan dışarı salınır. Atomdan dışarı salınan bu yüksek frekanstaki elektromanyetik radyasyona gama ışını denir (Miladjenovic, 1973). Şekil 3.6' da temsili bir gama bozunumu gösterilmektedir (Aral, 2019). Gama ışımasında, atomun kütle numarası, proton sayısı ve nötron sayısında herhangi bir değişiklik olmaz (Denklem 3.9).

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \tag{3.9} $$



Şekil 3.6. Gama Bozunumu

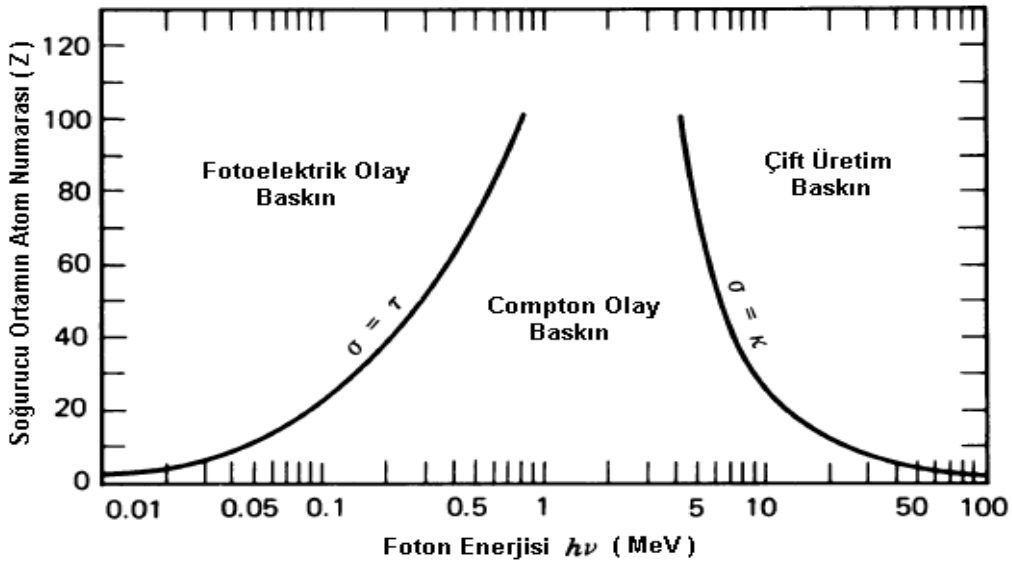
3.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyon türü ve enerjisinin tanımlanabilmesi için madde ile etkileşime girmesi gerekmektedir. Radyasyonun madde ile etkileşimi, parçacık veya elektromanyetik dalga etkileşimleri şeklinde olabilmektedir. Radyasyon ister parçacık ister elektromanyetik dalgalar şeklinde olsun madde ile etkileşimi enerjisinin azalmasına yani soğrulmasına veya saçılmasına neden olmaktadır. Parçacıkların madde ile etkileşimi daha yüksek iken, elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşimi daha düşüktür. Bunun nedeni ise elektromanyetik radyasyonun yüksüz ve kütlesiz olmasıdır. Bu elektromanyetik radyasyonlar dalga paketleri halindedir ve

birim elemanlarına foton denmektedir. Bu fotonların enerjileri ise Denklem 3.10'daki gibi ifade edilmektedir (Mozumder, 1999).

$$E = h\nu \tag{3.10}$$

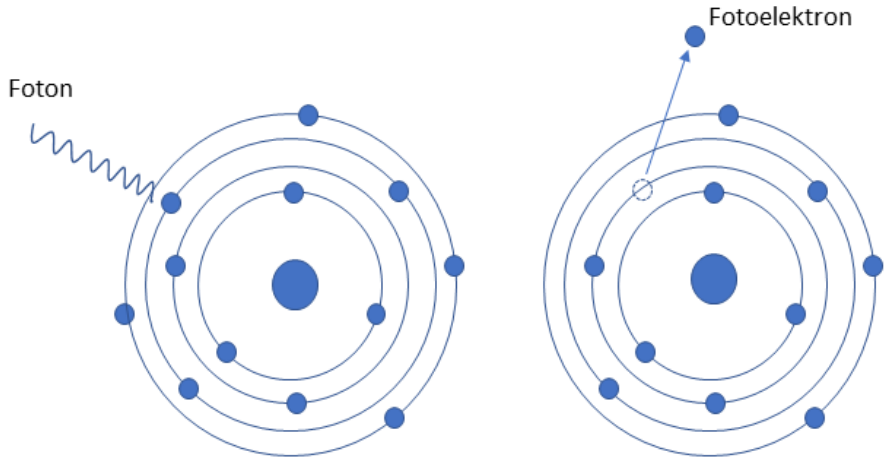
Fotonlar madde ile farklı türde etkileşimlerde bulunabilirler. Bu etkileşim türlerinin başında Fotoelektrik Olay, Compton Saçılımı ve Çift Oluşumu gelmektedir. Bu etkileşimler soğurucu ortamın farklı atom numarası ve farklı enerji düzeylerinde birbirlerine göre daha baskın olarak ortaya çıkabilmektedirler (Şekil 3.7; Krane,2001).



Şekil 3.7. Soğurucu Ortamın Atom Numarasına Göre Foton Etkileşimlerinin Gerçekleşme Olasılıkları

3.2.1. Fotoelektrik olay

Fotonların madde ile etkileşimleri sonucunda gerçekleşen olaylardan biri fotoelektrik olaydır. Fotoelektrik olay, fotonun; hedef maddeyi oluşturan atomlarına bağlı olarak bulunan bir elektronu yörüngesinden koparmasıyla gerçekleşir (Şekil 3.8). Foton bütün enerjisini yörüngede bulunan elektrona aktarır ve bu elektron soğurduğu foton enerjisi sayesinde yörüngeden koparak kinetik enerji ile yüklenir (Denklem 3.11). Yörüngesinden kopan ve kinetik enerji ile yüklenen bu elektronlar, fotoelektron olarak adlandırılırlar (Attix ve ark., 1968).



Şekil 3.8: Fotoelektrik olay; etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonra

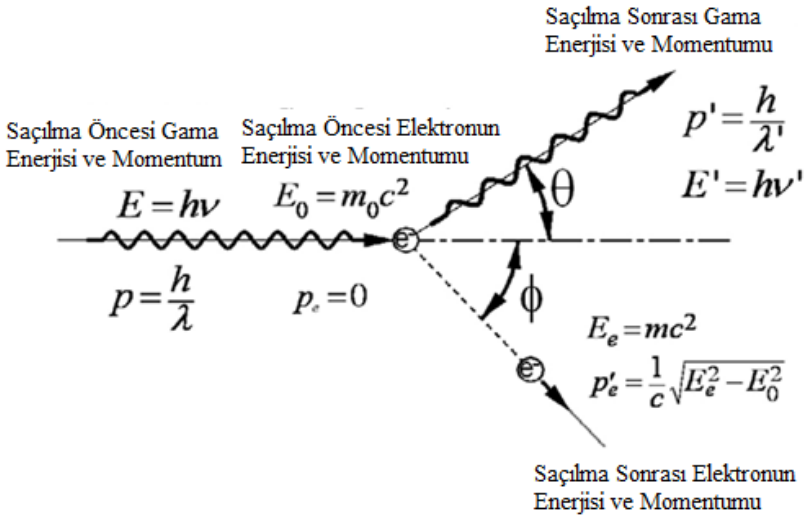
$$K_e = h\nu - E_b \tag{3.11}$$

K_e elektronun kinetik enerjisi, $h\nu$ foton enerjisi, E_b ise elektronun bağlanma enerjisidir. Gelen fotonun enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden yüksek olması halinde elektronu yörüngesinden koparabilmektedir. Atom numarası daha düşük olan elementlerin bağlanma enerjileri daha düşük olduğundan, Fotoelektrik Olay bu atomlarda daha fazla görünmektedir.

3.2.2. Compton saçılması

Atomun yörüngesinde bulunan elektronun, fotonun enerjisinin bir bölümünü soğurarak kinetik enerji kazanmasına ve gelen fotonla ayrı yönlere saçılmasına Compton Saçılması denir (Taylor ve Zafiratos, 2004). Fotoelektrik olaydaki gibi fotonun tüm enerjisi soğrulmaz. Compton olayı gerçekleştiren ve saçılan bu foton başka bir elektrona tüm enerjisini aktararak Fotoelektrik olayda gerçekleştirebilir.

Compton olayı sonucunda enerji ve momentum korunur (Denklem 3.12). Fakat fotonun enerjisi ve doğrultusu değişir. Aynı zamanda kinetik enerji kazanan elektronda farklı bir doğrultuda saçılır (Şekil 3.9; Parks, 2015).



Şekil 3.9. Compton Olayı

$$E' = \frac{E}{1+\frac{E}{m_0c^2}(1-cos\theta)} \tag{3.12}$$

Denklem 3.12' de, E gelen, E' saçılan foton enerjisi, ϕ fotonun ilk doğrultusundan saçılma açısı, m_0 elektronun durgun kütlesi, θ elektronun saçılma açısı, c ışık hızı, h ise Planck sabiti, $\frac{h}{m_0c}$ büyüklüğüne elektronun Compton dalga boyu denir. Gelen fotonlar ile saçılan fotonların dalga boyları (λ) arasında bir fark oluşur. Bu fark (Denklem 3.13);

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - cos\theta) \tag{3.13}$$

gibi ifade edilir ve bu denklem Compton olayının temelidir.

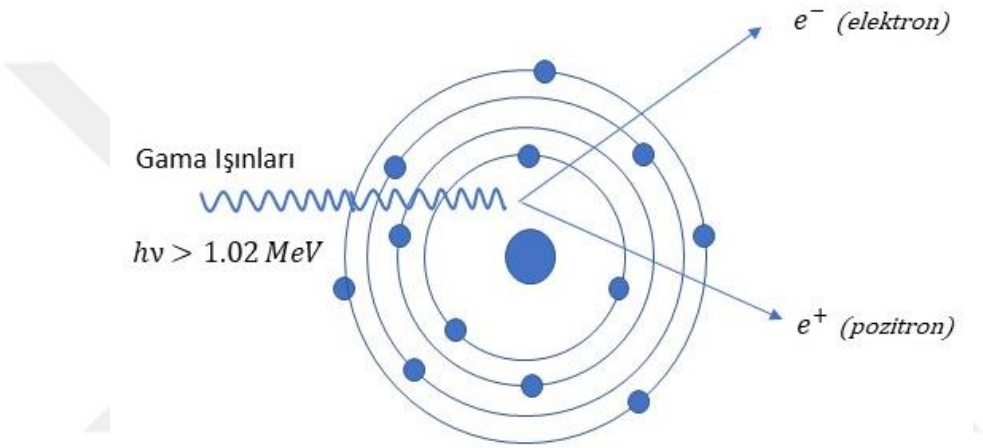
3.2.3. Çift oluşumu

Çift oluşumu; temelde elektromanyetik bir dalganın parçacığa dönüşmesi olayıdır. Bu olayda ortaya bir elektron ve bir pozitron çıkmaktadır. 1.022 MeV ve daha fazla enerjiye sahip bir fotonun atom çekirdeğinin yanından geçerken Coulomb Alanı

etkisiyle bir elektrona ve bir pozitrona dönüşmesi olayı Çift Oluşumu olarak adlandırılır (Şekil 3.10).

Elektron ve pozitronun durgun kütle enerjileri 0.511 MeV' dir. Çift oluşumunun gerçekleşebilmesi için gelen fotonun enerjisinin en az 1.022 MeV olması gerekmektedir (Siegbahn, 1965).

$$h\nu = m_{e^-} + m_{e^+} + T_{e^+} + T_{e^-} \tag{3.14}$$



Şekil 3.10. Çift Oluşumu

3.3. Elektromanyetik Radyasyonun Soğrulması

Fotoelektrik Olay, Compton Saçılımı ve Çift Oluşumu, fotonların maddeler ile etkileşimleri sonucu ortaya çıkmaktadırlar. Bu olaylarda genellikle madde ile etkileşime giren fotonlar enerji kaybetmekte veya tamamen yok olmaktadırlar. Enerji kaybı; maddenin atom numarasından, kalınlığından, yoğunluğundan ve buna benzer birçok özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Yüksek enerjili fotonların ortaya çıkardığı bu olayların enerjilerindeki değişimler farklı şekillerde incelenebilmektedir. Bunlar;

- Lineer zayıflama katsayısı
- Kütlesel zayıflama katsayısı
- Ortalama serbest yol
- Yarı değer kalınlığı

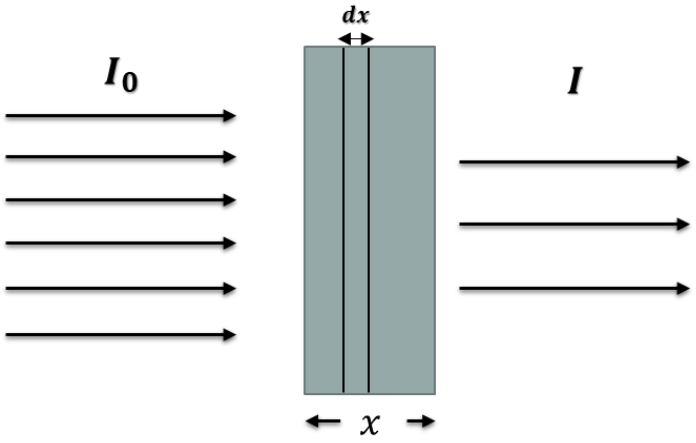
olarak tanımlanabilir. Maddenin bu özelliklerinin bilinmesi, bir maddenin radyasyona karşı direncini ve tutuculuğunun kimliği şeklinde özetlenebilir.

3.3.1. Lineer zayıflama katsayısı

Lineer zayıflama katsayısı, fotonun madde içerisinden geçerken kalınlığına bağlı olarak şiddetinde meydana gelen değişimleri gösteren bir olgudur. Şiddeti I_0 olan bir foton, kalınlığı dx olan bir materyalden geçerken, kalınlığı ile orantılı olarak şiddetinde dI kadar bir azalma meydana gelir (Şekil 3.11). Bu azalma μ gibi sabit bir katsayı ile orantılı bir şekilde oluşur. Bu enerji değişimini aşağıdaki denklemlerle ifade edebiliriz.

$$dI = -\mu I dx \tag{3.15}$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \tag{3.16}$$



Şekil 3.11. Fotonların soğrulması

Denklem 3.16' da görüldüğü gibi μ (cm^{-}) lineer zayıflama katsayısıdır ve maddeyi oluşturan elementin atom numarası ile gelen fotonun enerjisine bağlıdır (McGervey, 1983). Denklem 3.16 çözümlerinse;

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -\int_{0}^{x} \mu dx \tag{3.17}$$

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \tag{3.18}$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{3.19}$$

Beer-Lambert Kanunu (Denklem 3.19) bulunur. Bu denklem kullanılarak lineer zayıflama katsayısı μ elde edilir ve birimi cm^{-1}' dir (Denklem 3.20);

$$\mu = x^{-1} \ln(\frac{I_0}{I}) \tag{3.20}$$

3.3.2. Kütlesel zayıflama katsayısı

Maddenin atom numarası ve kalınlığına bağlı olarak enerjisindeki değişimler lineer zayıflama katsayısı olarak tanımlanması ile Beer-Lambert denklemi elde edilmektedir. Bu denklem ile lineer zayıflama katsayısı μ'nün bağlı olduğu değişkenler tanımlanmaktadır. Lineer zayıflama katsayısı çizgisel bir değeri ifade etmektedir, bu değeri tüm malzemeye genelleştirmek için kütlesel zayıflama katsayısı tespit edilir. Lineer zayıflama katsayısının maddenin yoğunluğu ile oranı kütlesel zayıflama katsayısını vermektedir. Beer-Lambert denklemi ele alınarak Denklem 3.21 bulunabilir.

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \tag{3.21}$$

$d = \rho x$ soğurucunun yüzey yoğunluğu olarak alınır ve Denklem 3.21'de yerine yazılıp düzenlenir ise Denklem 3.22 meydana gelir.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{d}\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{3.22}$$

Kütlesel zayıflama katsayısı $\frac{\mu}{\rho}$ olarak tanımlanır. İki veya daha fazla maddenin bir araya gelerek oluşturduğu malzemeler için kütlesel zayıflama katsayısı Denklem 3.23'teki gibi verilebilir (Jackson ve Hawkes, 1981).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum_i W_i \left(\mu/\rho\right)_i \tag{3.23}$$

W_i i. elementin ağırlıkça birleşim kesri (atomik yapının ağırlığı) ve $\left(\mu/\rho\right)_i$ ise foton enerjisi için kütlesel zayıflama katsayısıdır ve birimi cm^2/g' dır.

3.3.2. Ortalama serbest yol

Fotonların madde ile etkileşimleri, fotonların maddenin içerisine girdikleri anda başlamaya bilir ve belli bir mesafeye kadar etkileşimde bulunmadan ilerleyebilmektedirler. Fotonun madde içerisine girmesi ve ilk etkileşimi gerçekleştirmesine kadar aldığı yola ortalama serbest yol denilmektedir. Ortalama serbest yol (Mean Free Path, *MFP*) Denklem 3.24' teki gibi ifade edilir ve birimi *cm*' dir.

$$MFP = \lambda = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \tag{3.24}$$

3.3.2. Yarı-değer kalınlığı

Fotonlar madde içerisinde ilerlerken birçok etkileşimde bulunabilmektedir. Bu etkileşimler sonucu fotonun enerjisinde kayıplar olmaktadır. Madde ile etkileşime giren bir fotonun ilk enerjisinin yarısına düşmesini sağlayan madde kalınlığına yarı-değer kalınlığı denir. Yani; yarı değer kalınlığı (Half Value Layer, *HVL*) gelen I_0

enerjili fotonun değerini yarıya indirmek için ($I = \frac{I_0}{2}$) gerekli olan madde kalınlığıdır. Yarı değer kalınlığı aşağıdaki denklem ile ifade edilir ve birimi *cm*'dir (3.26);

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu X_{1/2}} \tag{3.25}$$

bu denklem çözümü yapılarak;

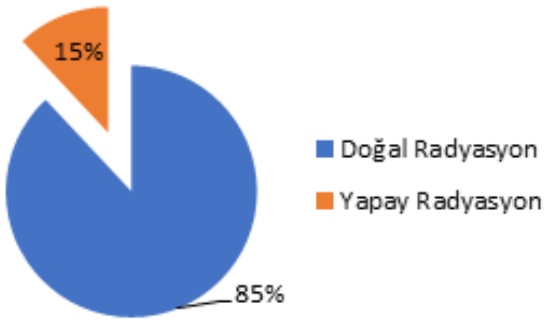
$$X_{1/2} = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \tag{3.26}$$

eşitliği ile bulunur.

3.4. Radyasyon Kaynakları

Radyasyon evrenin varoluşundan bu yana kozmik ışınlarda, yıldızlardaki patlamalarda, güneşten yayılan ışınlarda, radyoaktif elementlerde doğal olarak bulunabilmektedir. 1895 yılında W. Röntgenin X-Işınlarının keşfi, 1896 yılında H. Becquerel radyoaktiviteyi keşfi ile radyasyon yapay olarak kullanılabilmektedir. İnsanlar dünyada her an doğal olarak bulunan radyasyona maruz kalmaktadır. İnsanlar; 1930'dan bu yana nükleer santrallerin varlığı, radyoaktif elementlerin sağlık, gıda, tarım, elektronik vb. birçok alanda kullanımı ile yapay radyasyon kaynaklarına da maruz kalmaktadır.

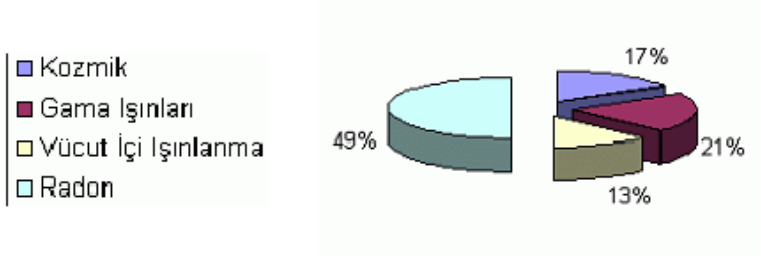
Maruz kalınan doğal ve yapay radyasyon dozu bir insan için yılda 2.4 mSv/yıl'dır (UNSCEAR, 2000). 2017 TAEK verilerine göre ise 2.8 mSv/yıl'dır. Dünyadaki doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının küresel radyasyon dozuna oransal katkıları Şekil 3.12'de verilmiştir (TAEK, 2017). Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarını ayrı ayrı ele alabiliriz.



Şekil 3.12. Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarının Küresel Radyasyon Dozuna Oransal Katkıları

3.4.1. Doğal radyasyon kaynakları

Evrenin oluşmasıyla beraber doğal radyasyonlar ortaya çıkmış ve günümüzde hala var olmaktadır. Bu radyasyonlar belli düzeylere ulaşmış ve insanlar bu doğal kaynaklı radyasyonlara sürekli maruz kalmaktadırlar. Dünyadaki doğal radyasyon kaynakları kozmik ışınlar, fosil yakıtlar, vücuttaki radyoaktif elementler, yiyecek, içecek, hava ve yer kabuğundan oluşmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarının insanlara etki dozları farklı oranlarda olmaktadır (Şekil 3.13) (TAEK, 2017).

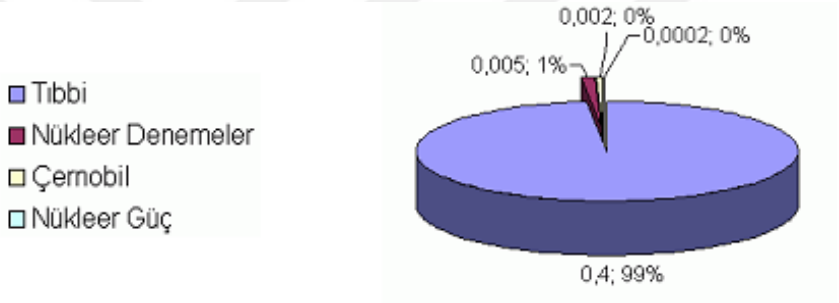


Şekil 3.13. Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Küresel Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri

Dünyada maruz kalınan doğal radyasyonların ortalama dozunun 0.39 (mSv/yıl) kozmik ışınlardan, 0.46 (mSv/yıl) fosil yakıtlardan, 0.23 (mSv/yıl) vücutta bulunan potasyum-40'tan, 0.25 (mSv/yıl) yiyeceklerden-içeceklerden-havadan ve 1.3 (mSv/yıl) ise yer kabuğundaki radyoaktif element radon gazından kaynaklanmaktadır. (TAEK, 2017).

3.4.2. Yapay radyasyon kaynakları

1895'te X-ışınlarının ve 1896 yılında da radyoaktivitenin keşfi ile hayatımıza giren yapay radyasyon, günümüzde birçok alanda insanoğlunun yararına kullanılmaktadır. Sağlık alanında, teknolojide, gıdalarda, tarımda vb. birçok alanda kullanılan yapay radyasyon türleri bulunmaktadır. Fakat doğal radyasyon kaynakları kadar olmasa da insanlar yapay radyasyon kaynaklarına da maruz kalmaktadır. Doğal radyasyon kaynakları kontrol edilemezken yapay radyasyon kaynakları kontrol edilebilmektedir. Bundan dolayı maruz kalınan radyasyon miktarı daha az olmaktadır. Şekil 3.14'te yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan küresel radyasyon dozlarının oransal değerleri gösterilmektedir (TAEK, 2017).



Şekil 3.14. Dünya Genelinde Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozları ve Oransal Değerleri

3.5. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Özellikle iyonize radyasyon türleri (alfa parçacığı, beta parçacığı, nötronlar, gama ışınları, X-ışınları) canlılar üzerinde farklı etkiler gösterebilmektedir. Bu etkiler radyasyon türüne, radyasyonun maruz kalınan miktarına ve süresine göre değişiklik göstermektedir. Ortaya çıkardığı etkiler bazen onarılabilirken bazen de kalıcı olabilmektedir. İyonize radyasyonların etkileri moleküler düzeydeki ve hücresel düzeydeki etkileri olarak iki ana başlıkta inceleyebiliriz.

3.5.1. Moleküler düzeyde etkiler

Radyasyonun moleküller üzerindeki etkileri incelendiğinde bu etkilerin doğrudan veya dolaylı olarak ortaya çıktığı gözlenmektedir. Doğrudan etki, iyonize radyasyonun molekülün yapısını bozmasıyla ortaya çıkmakta iken dolaylı etki ise ortamdaki bazı ara ürünlerin kimyasal reaksiyonları sonucu ortaya çıkan ve molekülün yapısının bozulması ile sonuçlanan etkilerdir.

Radyasyon özellikle hücre içindeki DNA, RNA, karbonhidrat, lipit, protein ve enzimler gibi yapıları etkilemektedir. Hücre içindeki bu yapıların bozulması hücrenin işlevini yerine getirememesi hatta hücrenin ölümüne de sebep olabilmektedir.

3.5.2. Hücresel düzeyde etkiler

Hiçbir hücre radyasyona tamamıyla dirençli değildir. Hücre çekirdeği ve kromozomlar radyasyona duyarlılıkları diğer hücre birimlerine göre daha fazla olmaktadır. Hücreler yaşamlarını devam ettirmek için bölünmelere uğramaktadır. Bu bölünmeler sırasında radyasyona maruz kalan hücrelerin bölünmesi yarıda kalabilmekte ve bölünemeyen hücreler fazla büyüyerek ölebilmektedirler.

Aynı zamanda hücrelerin mitoz veya mayoz bölünmeleri sırasında gerçekleştirdikleri DNA veya RNA sentezleri radyasyona maruz kalabilmektedir. DNA ve RNA'lar radyasyona maruz kaldıklarında zincir yapılarında değişimler olmakta ve tam anlamıyla bir sentez gerçekleştirememektedirler. Bu yüzden zincirlerdeki dizilimler tam olmamakta ve mutasyosnlar oluşmaktadır.

3.6. Radyasyondan Korunma

Radyasyon ve radyoaktivitenin keşfedilmesi insanlar için devrimsel bazı olayları tetiklemiştir. Radyasyon özellikle; nükleer enerjide, sağlıkta, teknolojide, gıdada, tarımda vb. birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Radyasyonun kullanım alanları arttıkça insanların radyasyona maruz kalma süreleri de artmıştır. Buda insanlar

açısından, fazla radyasyonun etkilerine karşı tehlikeli durumların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Günümüzde birçok alanda kullanılan radyasyon aynı zamanda belli düzeylerde tehlikeler de ortaya çıkarmaktadır. Radyasyonun ortaya çıkardığı bu tehlikelerden korunmak için bir dizi korunma yöntemleri geliştirilmiştir. Dünyada radyasyonun kullanımı, kaynakları ve etkilerini incelemek ve korunma yöntemleri geliştirmek, politikalar belirlemek ve mevzuatlar geliştirmek için bazı kurumlar kurulmuştur, bu kurumlar Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) ve Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) gibi gösterile bilinir.

Radyasyondan korunmak için farklı yöntemler bulunmaktadır. Korunma yöntemlerinin başında dozimetreler gelmektedir ve çok sayıda çeşidi mevcuttur. Aynı zamanda zırhlanmış materyaller de radyasyondan korunmak için kullanılmaktadır. Bunları iki başlık altında inceleyebiliriz.

3.6.1. Dozimetreler

Radyasyonun keşfi ve kullanımı ile radyasyona maruz kalma süreleri artmıştır. Radyasyona maruz kalma süreleri arttıkça da insan sağlığına zarar verebilmektedir. Maruz kalma miktarlarını ölçmek ve korunmak için çeşitli cihazlar geliştirilmiştir. İnsanların maruz kaldıkları radyasyonun miktarını ölçen cihazlara dozimetre denilmektedir.

Özellikle radyasyonla çalışan insanların, çalıştıkları alana ve radyasyon risklerine karşı en uygun dozimetreleri kullanmaları gerekmektedir. Bu yüzden farklı türlerde dozimetreler üretilmiştir. Bunlardan bazıları;

Film Dozimetreler: Özellikle gama ışını, X-ışını, beta ve nötron parçacıklarının ölçülmesinde kullanılmaktadır (Şekil 3.15; Yaman, 2017). Radyasyonu ölçmek için ince bir film tabaka kullanılmaktadır. Bu film tabaka farklı kalınlıkta farklı elementlerden oluşabilmektedir. Radyasyonun ölçümü, film içerisinden geçen

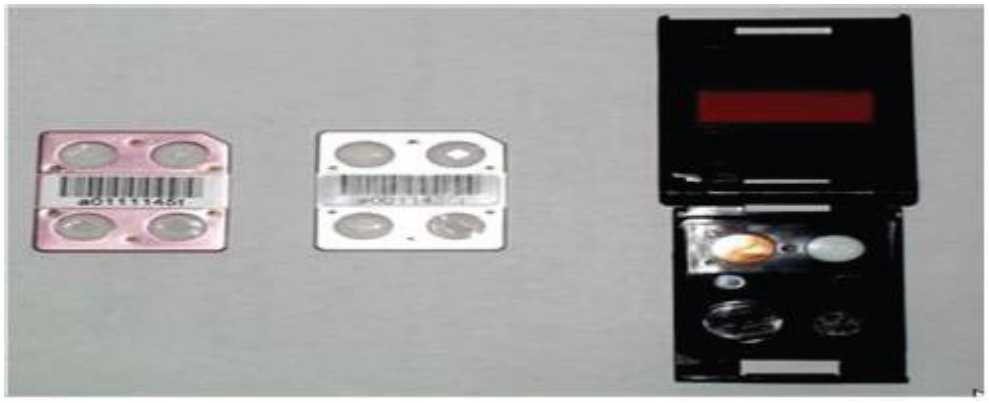
radyasyon miktarı ile oluşan karartının belli ölçüm teknikleri kullanılarak alınan dozu tespitine dayanır.



Şekil 3.15. Film Dozimetre

Termolüminesans Dozimetreler: Bu dozimetreler katı haldeki kristallerin radyasyonla etkileşimlerinden sonra ısıtılarak görünür ışık yayması sağlanmaktadır, bu olaya termolüminesans denmektedir. Ortaya çıkan görünür ışık miktarı ölçülür ve maruz kalınan radyasyon miktarı belirli teknikler kullanılarak saptana bilinir.

Film dozimetrelerine göre hem daha fazla kullanım ömrüne sahip hem de tekrar kullanılabilmektedirler. Farklı tipte termolüminesans cihazları vardır (Şekil 3.16; Karataşlı ve Özer, 2018).



Şekil 3.16. Termolüminesans Dozimetreler

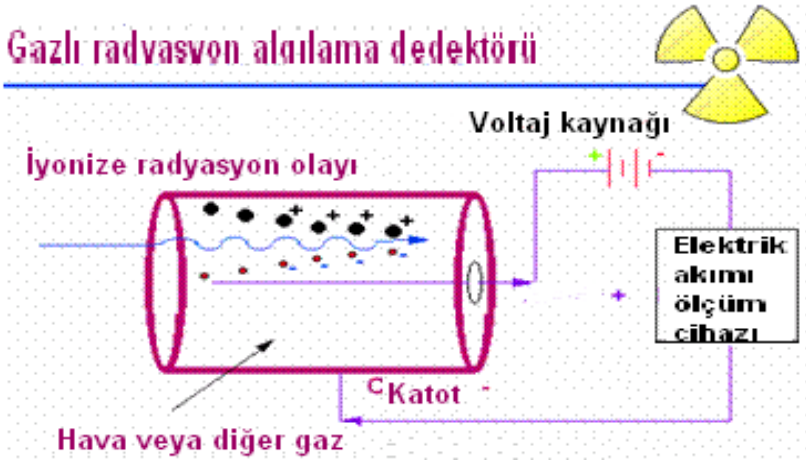
Kalem Dozimetreler: Bu dozimetrelerde küçük bir boşluğa hapsedilmiş havanın içine yerleştirilmiş elektrotlar vardır. Radyasyonun etkisiyle hava iyonize olur.

İyonizasyona bağlı olarak elektrotlar arasındaki gerilim farklılığı sonucunda elektrotlarda yer değiştirmeler meydana gelir. Aldığı radyasyonla orantılı olarak yer değiştiren elektrot bir skala üzerinde hareket eder. Dozimetrenin bir ucundan ışık verilerek diğer tarafından bakıldığında, elektrotun skala üzerindeki seviyesi görülür. Burada okunan değer, alınan toplam dozu verir (Şekil 3.17; Anonim, 2011).



Şekil 3.17. Kalem Dozimetre

İyon Odaları: Bu yöntem, gaz atomlarından serbestleşen elektronların elektrik sinyaline dönüştürülerek ölçüldüğü yöntemdir. Serbestleşen elektronların, cihazın elektroduyla teması sonucu bir elektrik sinyali oluşur. Silindir şeklindeki havanın ortasında bulunan santral elektrotta ölçülen voltaj farkı yükseltilerek gösterilir. İyonizasyon odaları içinde dedektör olarak en sık kullanılanlar "cutie pie" tipi cihazlardır (Anonim, 2011). Bu cihazlarla bir ile birkaç bin mR/saat'lik radyasyon miktarı ölçülebilmektedir (Şekil 3.18).

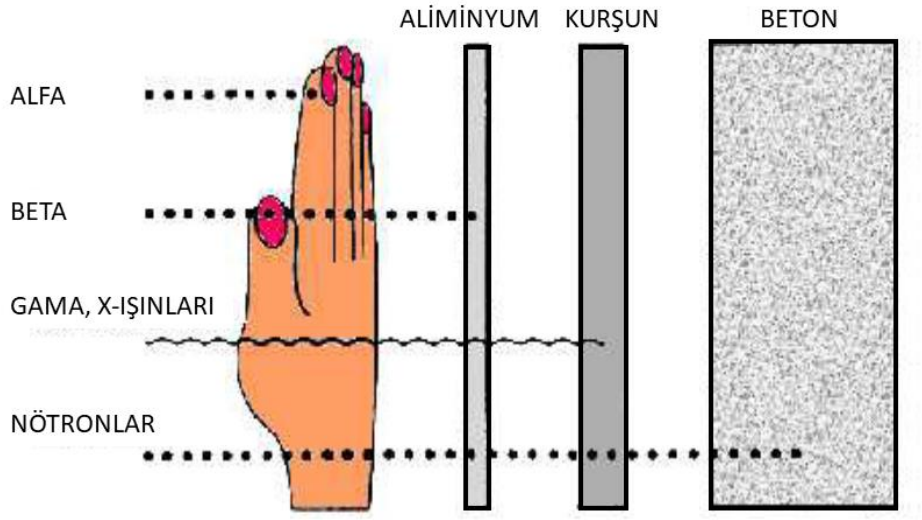


Şekil 3.18. İyonizasyon odasının genel yapısı

3.6.2. Radyasyondan korunmaya yönelik zırh

Radyasyondan korunmanın en önemli yöntemi olan zırhlama, radyasyon kaynağından yayınlanan ve biyolojik yapı için zararlı olan bu ışınların kişilere ulaşmasını engellemek veya kabul edilebilir düzeye indirmek için yapılan işlemlerdir. Zırhlama birçok şekilde yapılabilir. Kullanım alanına ve radyasyon türüne bağlı olarak farklı zırhlanma malzemeleri bulunmaktadır.

Radyasyonların madde içerisine nüfuz edebilme kabiliyetleri karşılaştırıldığında en çok tehlikeli olan radyasyon türlerinin gama ve nötronlar olduğu bilinmektedir. Çünkü nötronlar yüksüz, gama ışınları ise hem yüksüz hem de kütlesiz olmasından dolayı daha tehlikelidir. Şekil 3.19'da farklı türdeki radyasyonların farklı türdeki materyallerde giricilikleri gösterilmiştir (Emikönel, S., 2015).



Şekil 3.19. Radyasyon Çeşitlerine Göre Zırh Malzemesi

Zırh Önlükler: Radyasyon ile çalışan kişilerin, yansıyan radyasyona karşı korunmalarını sağlamak amacı ile üzerlerine giyebildikleri zırhlı malzemelerdir. Kullanım kolaylığı sağlamak amacı ile hafif olmaları gerekir. Üretilen bu önlükler radyasyon kaynağının gücüne göre kalınlıklara sahiptirler (Şekil 3.20; Anonim, 2011).



Şekil 3.20. Kurşunlu Önlükler

Zırh Boyunluk: Yüksek radyasyon olan bölgelerde tiroid bezini korumak için boyun etrafına sarılan zırhlanmış malzemelerdir (Şekil 3.21; Anonim, 2011).



Şekil 3.21. Tiroid Koruyucu

Zırh Paravanlar: Radyoloji departmanında, kumanda masası dışarıda değil ise kumanda masası önünde en az 2 m eninde ve 2.25 yüksekliğinde zırhlı paravan bulundurulur. Kumanda masası ile inceleme masası arasında en az 1.5 m mesafe

olmalıdır. Işınlama sürecinde radyasyon kaynağından uzak durmaya önem gösterilmelidir (Şekil 3.22; Anonim, 2011).



Şekil 3.22. Zırhlı Paravanlar

Zırh Gözlükler: Radyasyon görevlilerinin gözlerini, radyasyondan koruma amaçlı camları zırhlanmış gözlükler kullanılır. TV donanımlı olmayan floroskopi cihazlarıyla yapılan incelemelerde bu gözlükler kullanılır. İncelemeye başlamadan en az 10 dk önce takılır (Şekil 3.23; Anonim, 2011).



Şekil 3.23. Zırhlı Gözlükler

3.7. Monte Carlo Yöntemi

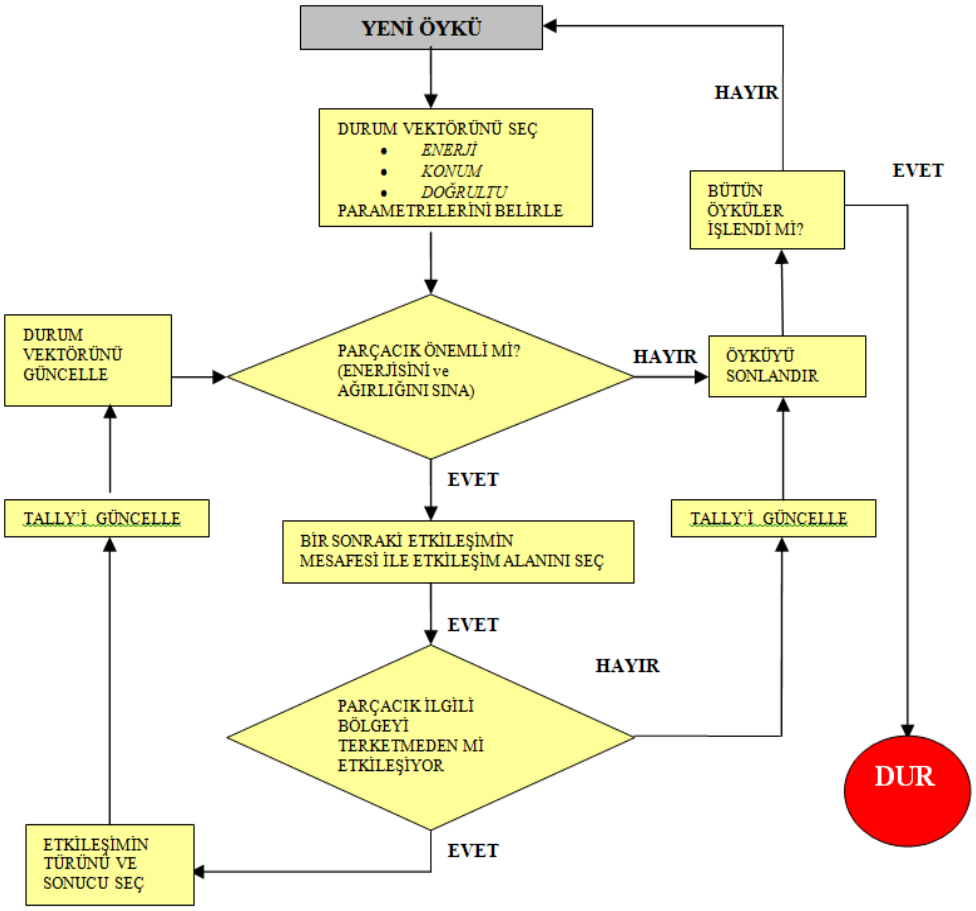
İstatistiksel temeller üzerine kurulan Monte Carlo Yöntemi günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle fen bilimlerinde, mühendislikte, iktisatta vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem 1940 yılında Stanislaw Ulam tarafından geliştirilmiştir. Çözümü mümkün ya da pratik olmayan problemlerin rastgele sayılar yardımıyla çözülmesi temeline dayanan bir hesaplama tekniğidir. Yöntemin uygulanabilmesi için problemin olasılık dağılım fonksiyonu ile temsiliyeti yeterli olacaktır. Fakat bu temsiliyetin, kabul edebileceğimiz hata sınırları içerisinde olması şarttır. Bu olasılık dağılım fonksiyonu sayesinde, rastgele sayılar oluşturarak yapılan simülasyonların ortalaması beklenen problem çözümünün sonucunu verecektir (Kolos and Whitlock, 2008).

Monte Carlo Yönteminin Bir Foton Problemine Uyarlanması: Fotonların madde ile etkileşimleri sırasında Fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve Çift oluşumu gibi fiziksel olaylar ortaya çıkmaktadır. Fotonların madde ile etkileşimi başlığının altında baktığımız bu olaylar Monte Carlo Yönteminin kullanılmasıyla hesaplanabilmektedir. Özellikle bir foton için, Monte Carlo Yönteminin kullanılması için önerilmiş bir algoritmadan yararlanarak etkileşimler sonucu ortaya çıkacak olayları simüle edebilmekteyiz. Bu simülasyon sonuçlarının ortalaması bize deneysel olarak ortaya çıkacak sonuçları çok küçük hata payları ile verecektir. Burada deneysel olarak gerçekleştirilemeyen çalışmalar, Monte Carlo Yöntemi ile daha hızlı sonuçlar elde edilebilmek için simüle edilebilmektedir. Şekil 3.24'teki algoritma kullanılarak foton ile madde etkileşimlerinden ortaya çıkan istatistiksel veriler incelenebilmektedir. Bu verilerin nasıl elde edildiğini bir foton için incelersek;

1. Enerjisi, konumu ve doğrultusu belli bir foton oluşturulur.
2. Foton enerjisi ve ağırlığı kontrol edilir. Bu değerler istenilen aralıklarda ise işlem devam eder. Değil ise işlem sonlandırılır.
3. Fotonun sonraki etkileşim mesafesi ve alanı belirlenir.
4. Foton ilgili bölge dışında etkileşiyor ise Tally güncellenir ve işlem sonlandırılır. Belirlenen bölge içinde etkileşim gerçekleşirse etkileşimin

türü ve sonucu belirlenerek Tally güncellenir ve tekrar durum vektörü belirlenir, işlemlere 2. maddeden tekrar devam edilir.

5. Bütün öyküler işlendi ise program durdurulur ve Tally'lerin elde ettiği sonuçların ortalaması hesaplanır. Öyküler bitmemiş ise yeni öykü için bütün işlemler tekrar edilir.



Şekil 3.24. Monte Carlo yönteminin işleyiş algoritması

Burada yapılan işlemlerin tamamı öykü olarak adlandırılmaktadır ve tek bir foton için gösterilmiştir. Öykü sayısı arttıkça Tally sayısı da artacaktır. Aynı zamanda Tally'i açıklamak gerekirse; sisteme herhangi bir etkisi olmayan, sistemden etkilenmeyen ve fotonu takip eden bir kamera (dedektör) olarak adlandıra biliriz. Fotonun yaptığı her etkileşimi ve foton ile ilgili tüm verileri kaydeder. Tally'lerin bulduğu sonuçların ortalaması alındığında Monte Carlo Yönteminin sonucu elde

edilmektedir. Öykü sayısı arttıkça elde edilen veriler daha az hata payı ile sonuçlanmaktadır.

3.8. MCNP

Monte Carlo yöntemi, ilk olarak Los Alamos Ulusal Laboratuvar'ında nükleer çalışmalar gerçekleştirmek amacıyla bilim insanları tarafından oluşturulmuş ve kullanılmış matematiksel bir yöntemdir. Monte Carlo yönteminde incelenen her bir olay istatistiksel olarak ele alınır. Bu yöntemde radyasyon taşıma olayı rastgelelik içeren bir doğaya sahiptir. Çünkü bir kaynaktan yayılan radyasyon, sahip olduğu enerji ile maddesel ortamda ilerlerken yol boyunca ihtimal dahilinde farklı etkileşimlerde bulunabilmekte ve etkileşim sonrasında farklı doğrultularda yoluna devam edebilmektedir. Radyasyonun standart bir davranışı bulunmamaktadır. Her bir foton ya da parçacık atomik düzeyde karşılaştığı ortama göre etkileşir. Radyasyon, sahip olduğu enerjiyi ilerlediği ortama farklı fiziksel olaylarla aktarır. Bu bağlamda Monte Carlo Yöntemi kullanılarak radyasyonun olası durumları istatistiksel olarak incelenebilmektedir.

Radyasyon olgusunun deneysel olarak incelenmesinin yanı sıra bazı simülasyon programları yardımıyla ele alınması hem zaman hem de maliyet açısından daha kullanışlıdır. Monte Carlo Yöntemini kullanan programlardan birisi de MCNP (Monte Carlo N-Particle) radyasyon taşıma programıdır. MCNP'nin yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır: Radyasyon çalışanları için; radyasyondan korunma ve dozimetri hesaplamaları, nükleer reaktörler veya halk sağlığını korumak için; radyasyon zırhlama, sağlık sektöründe radyografik görüntü analizleri, medikal fizik alanında radyoterapi, nükleer tıp alanında hem görüntüleme hem de tedavi, farklı detektör tasarımları gibi birçok olay incelenebilmektedir.

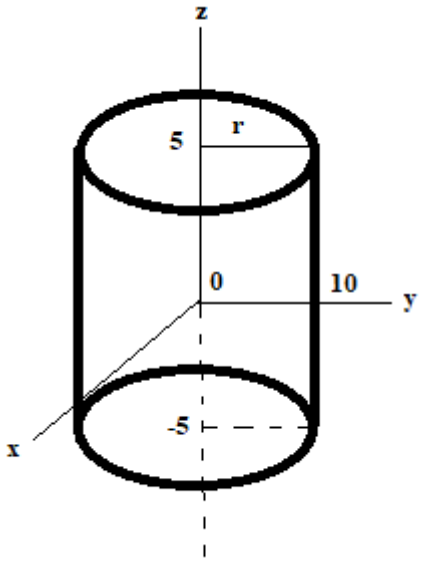
MCNP algoritmaları kullanılarak düşünülen olay ya da problemler rahatlıkla simüle edilebilmektedir. MCNP'de bir girdi (input) dosyası hazırlanmak istendiğinde; simüle edilecek problemin tanımlandığı ilk satırdan hemen sonra probleme ait üç kısım oluşturulmalıdır. Temel olarak bu üç kısım sırasıyla; hücre kartları, yüzey kartları ve

veri kartları olarak adlandırılırlar ve input dosyasında birbirlerinden bir boşluk ile ayrılırlar. Şekil 3.25'te örnek bir MCNP input dosyası gösterilmiştir. Bu örnek dosyaya göre; merkezi (0 0 0), yarı çapı 10 cm, yüksekliği 10 cm olan ve z eksenince uzanan bir silindir simüle edilmek istenmektedir (Şekil 3.26). Şimdi bu örnek dosya üzerinden hücre kartları, yüzey kartları ve veri kartları bölümünü bir MCNP input dosyası üzerinden nasıl hazırlandığını görelim:

Hücre Kartları Bölümü: MCNP input dosyasında tanımlama satırından sonra başlayan bu bölümde; simüle edilmesi düşünülen ortamlara ait hücreler ile ilgili tanımlamalar yapılır. Hücre kartında simülasyon ortamını oluşturan her bir hücre için hücre tanımlama sayıları, hücrelerin meydana geldiği materyal numarası, materyalin yoğunluk değeri, her bir hücrenin geometrik yapısını oluşturacak yüzeylerin tanımlanması ve simülasyonu düşünülen problem için oluşturulacak hücrelerin önem derecesi belirtilir.

```
1          Problem Tanımlama satırı
2  c ***** hucre kartlari ************************
3  10   1 -7.86    -1  2 -3             imp:p=1
4  99   0           1 -2  3             imp:p=0
5
6  c ***** yuzey kartlari ************************
7  1 cz  10.0
8  2 pz  -5.0
9  3 pz   5.0
10
11 c ***** veri kartlari ************************
12 mode p
13 sdef   par 2
14        pos 0.0 0.0 0.0
15        erg 1.0
16 m1   26000 -1.0
17 f15:p 0.0 5.0 0.0 0.1
18 nps 1e6
```

Şekil 3.25. Örnek bir MCNP input dosyası



Şekil 3.26. Örnek MCNP input dosyasının görsel hali

Örnek input dosyası incelendiğinde *c* harfi ile başlayan tüm satırların MCNP tarafından algılanmadığı; yorum veya tanımlayıcı satırlar olarak adlandırıldığı bilinmelidir. Şekil 3.25'te gösterilen örnek input dosyasında, problem tanımlama satırından hemen sonra başlayan hücre kartları bölümü, 3. ve 4. satırlarda tanımlanmaktadır. 3. satırda verilen rakamlar sırasıyla incelendiğinde; *10* numaralı hücre (kullanıcıya bağlı olarak rastgele verilir) *1* numaralı materyalden oluşur ve yoğunluğu *7.86* g/cm^3'tür. Bu hücre; 1 numaralı yüzeyin içi, 2 numaralı yüzeyin üst tarafı ve 3 numaralı yüzeyin alt tarafının (*-1 2 -3*) kesiştiği hacmi doldurur. Son olarak bu hücre foton (photon, p) radyasyonu açısından problemimizde %100 önemlidir (*imp:p=1*). 4. satırda ise problem uzayımızın sınırını geçen fotonların (yani; silindir hacminden dışarı çıkan fotonlar) önemsiz olduğunu gösteren boşluk (materyal numarası *0*) tanımlanmış ve önemsiz (*imp:p=0*) olarak atanmıştır. Daha önce de değinildiği gibi, MCNP programı her bir fotonu ayrı birer öykü olarak ele alır. 4. satırdaki tanımlamalar sonucunda; diyelim ki bir foton 3. satırda tanımlanan bölgenin dışına çıktığı anda MCNP o foton için izlediği öyküyü sonlandırmaktadır. 99 numaralı hücre tanımlaması yapılmadığı takdirde silindirden dışarı çıkacak olası bir foton yüzünden simülasyon hiçbir zaman bitmeyecektir.

Yüzey Kartları Bölümü: Genel olarak; hücre kartları bölümünde atanmış yüzeylerin geometrik olarak programa tanıtıldığı bölümdür. Yüzey kartları bölümü, örnek input dosyamızda 7, 8 ve 9. satırlarda ifade edilmiştir. Bu satırlarda hücre kartları bölümünde tanımlanmış 1, 2 ve 3 numaralı yüzeylerin geometrik şekilleri tanımlanarak boyutları cm cinsinden verilmiştir. Buna göre; 1 numaralı yüzey (7. satır) merkezi z ekseni olacak şekilde yarıçapı 10 cm olan sonsuz uzunlukta bir silindir olarak ifade edilir. 2 numaralı yüzey (8. satır), z eksenini -5 cm'de ve 3 numaralı yüzey (9. satır) z-eksenini 5 cm'de dik olarak kesen sonsuz uzunlukta yüzeyler olarak tanımlanmıştır. Dikkat edildiğinde bu üç yüzeyin kesiştiği hacim, problemimizi oluşturan silindir geometrisinin boyutlarını ve konumunu vermektedir. Çizelge 3.1'da MCNP programında kullanılabilecek bazı geometrik tanımlamalar ve matematiksel denklemleri verilmiştir.

Veri Kartları Bölümü: Simülasyonu düşünülen radyasyon problemi ile ilgili olarak; radyasyon kaynağı, dedektör bilgileri, materyal içerikleri ve öykü sayısının tanımlandığı bölümdür. Veri kartları bölümü, örnek input dosyamızda 12-18. satırlar arasında verilmiştir. 12. satırda problemimizin foton problemi olduğu tanımlanmıştır (mode p). MCNP' de farklı radyasyon problemleri için kaynak tanımlayıcılar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Örnek input dosyamızın 13, 14 ve 15. satırlarında radyasyon kaynağımız tanımlanmıştır. sdef kartı ile başlayan bu bölümde, orijinden (*pos 0.0 0.0 0.0*) harekete başlayan ve 1 MeV enerjiye sahip (*erg 1.0*) foton parçacıkları (*par 2*) üretimi tanımlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus şudur; kaynak tanımlamasında foton hareketi ile ilgili olarak herhangi bir doğrultu ve açı parametresi girilmemiştir. Bu örnek dosyaya göre orijinde üretilen fotonlar izotropik bir dağılım ile her yöne eşit ihtimal ile yayılacaktır. Daha ayrıntılı ve spesifik kaynak tanımları için MCNP programı ile gelen rehberlere bakıla bilinir (X-5 Monte Carlo Team, 2008).

Çizelge 3.1. MCNP' de geometrileri oluşturmak için kullanılan bazı yüzey kartları

Kısaltmalar	Yüzey Türü	Tanımlama	Denklem
p	Düzlem	Genel	$Ax + By + Cz - D = 0$
px	Düzlem	x-eksenine dik	$x - D = 0$
py	Düzlem	y-eksenine dik	$y - D = 0$
pz	Düzlem	z-eksenine dik	$z - D = 0$
so	Küre	Orjin merkezli	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$
so	Küre	Genel	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$
sx	Küre	x-eksenine merkezli	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$
sy	Küre	y-eksenine merkezli	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$
sz	Küre	z-eksenine merkezli	$x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$
c/x	Silindir	x-eksenine paralel	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2$
c/y	Silindir	y-eksenine paralel	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2$
c/z	Silindir	z-eksenine paralel	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2$
cx	Silindir	merkezi x-ekseninde	$y^2 + z^2 - R^2$
cy	Silindir	merkezi y-ekseninde	$x^2 + z^2 - R^2$
cz	Silindir	merkezi z-ekseninde	$x^2 + y^2 - R^2$

Çizelge 3.2. MCNP' de çalışılabilecek parçacık türleri

Mode	Görev
mode n	Sadece varsayılan nötron transferi
mode n p	Nötron ve etkilenmiş foton transferi
mode p	Sadece foton transferi
mode e	Sadece elektron transferi
mode p e	Foton ve elektron transferi
mode n p e	Nötron, etkilenmiş foton ve elektron transferi

Örnek input dosyamızın 16. satırında hücre kartları bölümünde atadığımız 1 numaralı materyalin (*m1*) içeriği verilmiştir. Bu materyal atom numarası 26 olan demir elementi ile %100 doludur (*26000 -1.0*). 17. satırda ise detektör (*tally*) bilgisi verilmiştir. Bu örneğe göre; x=0, y=5 ve z=0 koordinatlarında 0.1 cm yarıçaplı hayali bir küre oluşturularak, bu hayali küreden geçen foton parçacık akı tally'si tanımlanmıştır (*f15:p 0.0 5.0 0.0 0.1*). *f5* tally'si sonucu parçacık/cm^2 olarak verecektir. MCNP'de kullanılan diğer tally türleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Son

olarak 18. satırda *nps 1e6* komutu ile 10^6 parçacık (öykü) için simülasyonu gerçekleştireceği bilgisi programa aktarılmıştır.

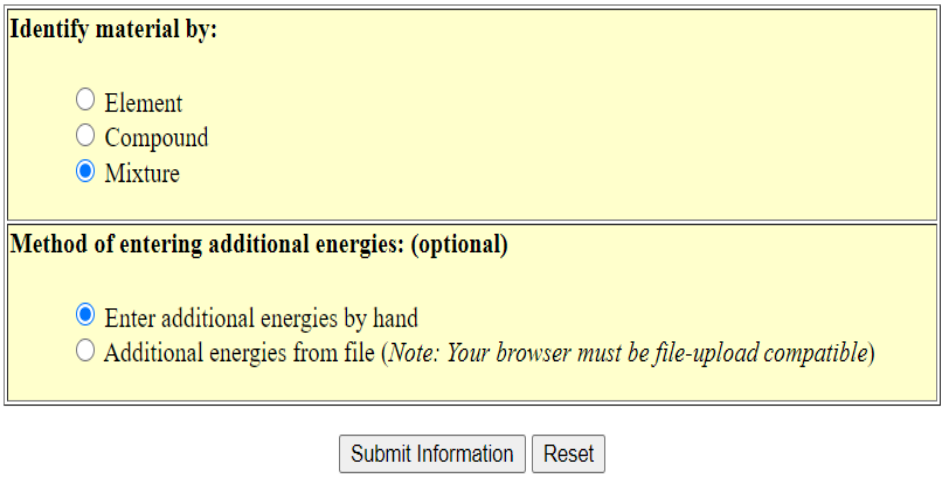
Çizelge 3.3. MCNP' de kullanılan tally kartları

Sembolü	Tally Türü	Birimi
f1	Tüm yüzey üzerinden integre edilen parçacık akımı	parçacık
f2	Yüzey üzerinden ortalama akı	parçacık/cm2
f4	Hücre üzerinden ortalama akı	parçacık/cm2
f5a	Nokta veya halka dedektörün parçacık akısı	parçacık/cm2
f6	Her bir hücrede biriken enerji	MeV/g
f8	Dedektörde üretilen pulsların enerji dağılımı	

3.9. XCOM Programı

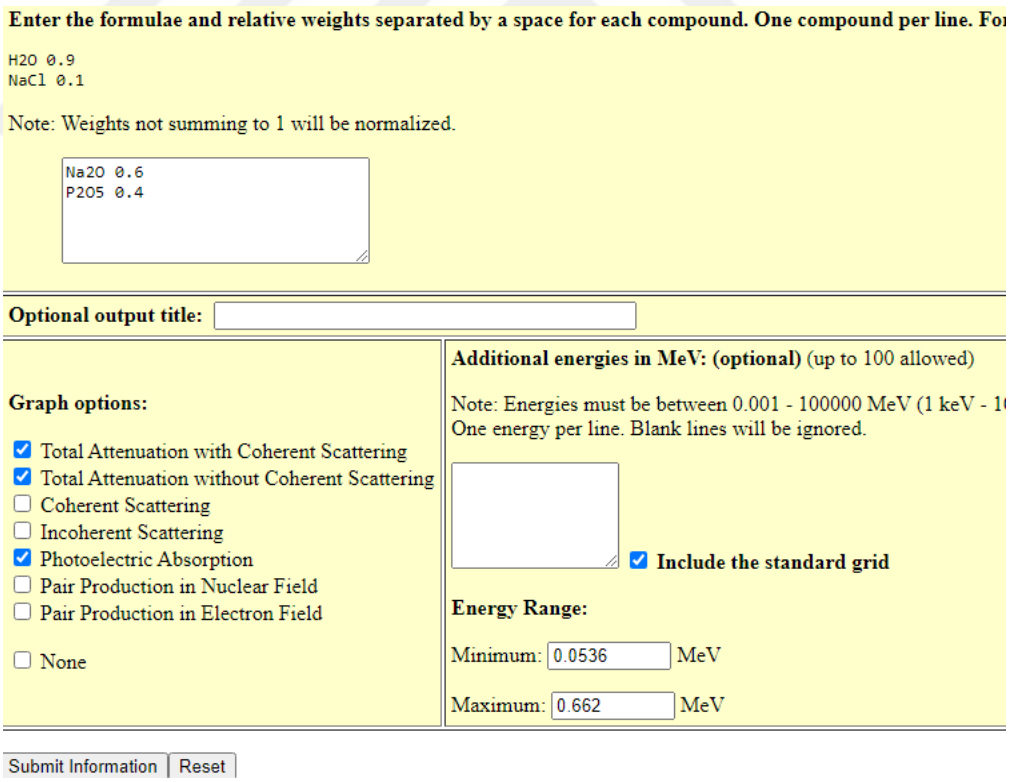
XCOM, herhangi bir element, bileşik veya karışımdan oluşan materyal için (Z ≤ 100) için 1 keV'den 100 GeV'e kadar enerjilerde foton saçılması, fotoelektrik soğurma ve çift üretimi için foton tesir kesitlerini ve toplam zayıflama katsayılarını hesaplamak için kullanılabilen bir web veri tabanı sağlayıcısıdır (Gerward ve ark., 2001, 2004). 1987 yılında Hubbell ve Berger tarafından geliştirilen bu bilgisayar kodu, uluslararası radyasyon camiasında kabul gören ve referans olarak alınan bir veri tabanıdır (https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html) (Hubbell, 1968. 1969).

Bu tez çalışmasında MCNP programı ile elde edilen lineer ve kütlesel zayıflama katsayıları XCOM dan alınan verilerle kıyaslanmıştır. XCOM'dan belli foton enerjileri için istenilen materyalden veri almak için web sitesine girildiğinde Şekil 3.27'de ki ekran görüntüsü bizi karşılamaktadır.



Şekil 3.27. XCOM anasayfa

Bu bölümde ilgili materyalimizin elemen, bileşik veya karışım olup olmadığı bilgisi sorulmaktadır. Gerekli alan seçilip bir sonraki adıma geçildiğinde ise Şekil 3.28'deki ekran görüntüsü karşımıza gelecektir.



Şekil 3.28. XCOM materyal veri giriş sayfası

Bu sayfada ilk olarak materyalimizi oluşturan atom/molekül'lerin simgesel gösterimi ile ağırlıklı yüzde oranları sisteme girilir. Daha sonra sol alt kısımda bulunan grafik seçenekleri bölümünden çizilmesi istenilen grafik türü seçilerek, sağ alttaki bölümde ihtiyaç olan foton enerji aralığı tanımlanır. Son adımda ise tüm sonuçlar grafik ve tablo olarak bize sunulacaktır (Şekil 3.29).

Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g
	6.000E-02	2.487E-02	1.523E-01	5.735E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.345E-01	2.096E-01
	8.000E-02	1.468E-02	1.470E-01	2.264E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.844E-01	1.697E-01
	1.000E-01	9.671E-03	1.415E-01	1.100E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.621E-01	1.524E-01
	1.500E-01	4.454E-03	1.288E-01	2.977E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.362E-01	1.317E-01
	2.000E-01	2.544E-03	1.185E-01	1.193E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.222E-01	1.197E-01
	3.000E-01	1.145E-03	1.034E-01	3.420E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.049E-01	1.038E-01
	4.000E-01	6.468E-04	9.281E-02	1.477E-04	0.000E+00	0.000E+00	9.360E-02	9.296E-02
	5.000E-01	4.149E-04	8.483E-02	8.000E-05	0.000E+00	0.000E+00	8.532E-02	8.491E-02
	6.000E-01	2.885E-04	7.850E-02	4.996E-05	0.000E+00	0.000E+00	7.883E-02	7.855E-02

Şekil 3.29. XCOM sonuç ekranı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Giriş

Radyasyon madde içinden geçerken bıraktığı enerji miktarı doğrultusunda canlı dokusu üzerinde sağlık açısından hasarlar oluşturabilir. Oluşabilecek biyolojik hasarları minimize etmek veya tamamen engellemek için radyasyonla doğrudan temas halinde olan kişilerin, uluslararası radyasyondan korunma komiteleri tarafından raporlanmış ilkeler doğrultusunda korunması önem arz etmektedir. Radyasyondan korunmanın en temel üç yolu; radyasyona maruz kalma süresini minimumda tutmak, radyasyon kaynağı ile mesafeyi güvenli seviyede tutmak ve radyasyona uygun olan zırh seçimi yapmaktır.

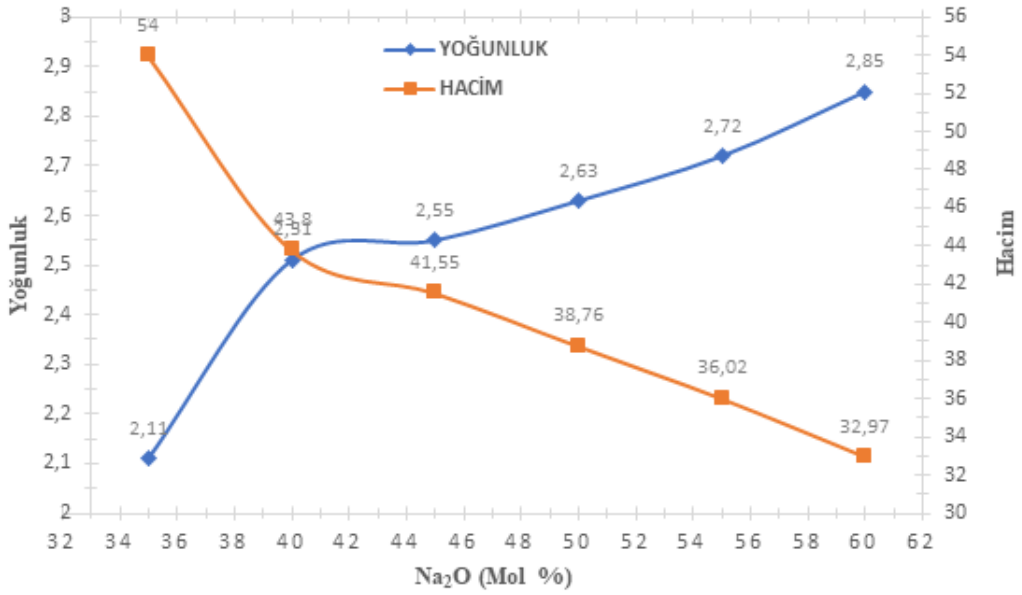
Özellikle sağlık sektöründe gerek teşhis gerekse tedavi alanında uygulamayı gerçekleştirecek olan radyasyon çalışanlarının, radyasyondan korunmak için koruyucu ekipmanlar kullanması gerekmektedir. Bu koruyucu ekipmanların seçimi, çalışanın işine engel olmayacak şekilde ve aynı zamanda çalışanı koruyucu nitelikte olmalıdır. Bundan dolayı işi gerçekleştirirken görme olayının önem arz ettiği durumlarda özellikle cam paravanların ve gözlüklerin uygun zırha sahip olması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında bazı cam malzemelerinin nükleer tıp, radyoterapi ve radyoloji alanında koruyucu ekipman olarak kullanılabilirliği radyasyon geçirgenliği açısından incelenmiştir. Chanshetti ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları bir araştırma temel alınarak; farklı moleküler yüzdelere sahip altı farklı sodyum fosfat cam numunesi için lineer zayıflama katsayıları, kütlesel zayıflama katsayıları, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıkları Monte Carlo Yöntemini kullanan MCNP programı ile hesaplanmıştır. İncelenen cam numunelerinin genel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir (Chanshetti, 2011).

Çizelge 4.1 Sodyum fosfat camlarının ($xNa_2O \cdot (100-x)\ P_2O_5$) kimyasal bileşimi (mol%), yoğunluk değerleri ve molar hacimleri

Cam Numune	Cam Bileşimi (%)		Molar Kütle (g)	Yoğunluk (g/cm^3)	Molar Hacim (cm^3)
	Na_2O	P_2O_5			
S1	35	65	113,96	2,11	54,00
S2	40	60	109,96	2,51	43,80
S3	45	55	105,96	2,55	41,55
S4	50	50	101,96	2,63	38,76
S5	55	45	97,97	2,72	36,02
S6	60	40	93,97	2,85	32,97

Çizelge 4.1.'de görüldüğü üzere incelenen cam numuneler $xNa_2O \cdot (100-x)\ P_2O_5$ formülü uyarınca; Na_2O değerleri %35-60 ve P_2O_5 %65-40 aralıklarında %5'lik değişimlerle hazırlanmıştır. Aynı çizelgede malzemeleri yüzdece oluşturan Na_2O oranı artıp P_2O_5 oranı azaldıkça molar kütle ve molar hacim değerleri azalmış ve buna bağlı olarak yoğunlukları artış göstermiştir. Malzemelerin içeriğini oluşturan Na_2O bileşiğinin molar yüzdesine göre yoğunluk ve hacimlerdeki değişimler Şekil 4.1'de gösterilmiştir (Chanshetti, 2011).



Şekil 4.1 Na_2O içeriği ile sodyum fosfat camlarının yoğunluk ve molar hacminin değişimi

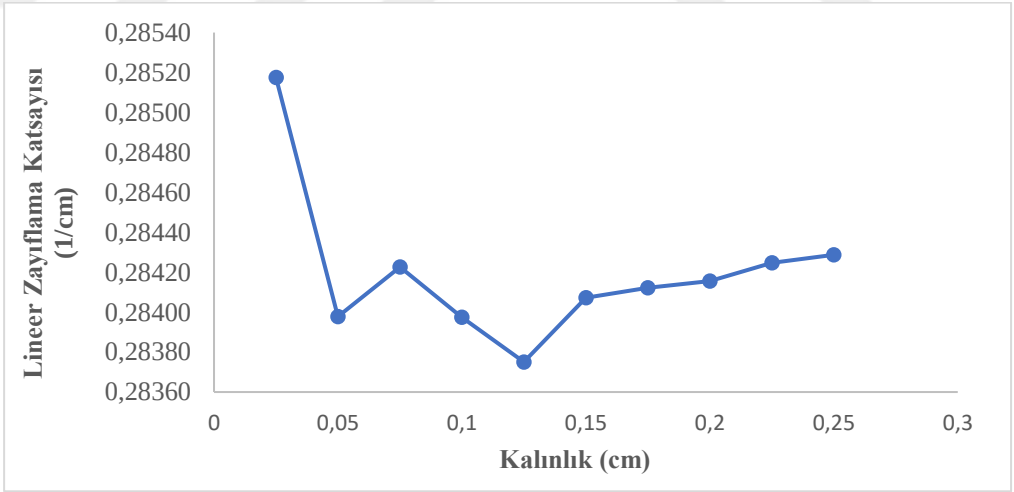
Bu tezde Çizelge 4.1'de verilen her bir malzeme için 10 farklı kalınlık (0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25 cm) ve beş farklı enerji (53.16, 80.99, 160.6, 356, 661.6 keV) için lineer zayıflama katsayıları, kütlesel zayıflama

katsayıları, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıkları Monte Carlo Yöntemini kullanan MCNP programı ile hesaplanmıştır. Kullanılan bu 5 farklı enerji radyoaktif bazı elementlerin karakteristik gama ışınları olduğu için tercih edilmiştir.

4.2 Hesaplama Yöntemi

MCNP'den F4 akı tally'si (parçacık/cm^2) ile ilk olarak malzeme yokken kaynaktan çıkan akı değeri (I_0) hesaplanıp daha sonra 10 farklı kalınlık ve beş farklı enerji değerleri için dedektörün algıladığı akı değerleri (I) simüle edilmiştir. 53.16 keV'lik foton enerjisinin kullanıldığı 10 farklı kalınlık için S1 numunesinden elde edilen veriler Çizelge 4.2' de verilmiştir.

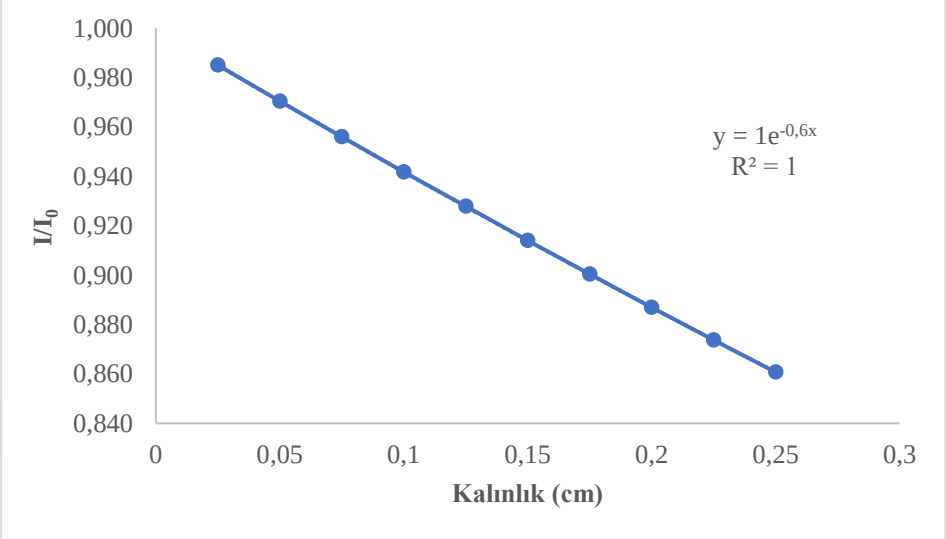
Lineer zayıflama katsayısı, foton enerjisi ve malzemenin içeriğine bağlıdır. Çizelge 4.2'deki veriler kullanılarak Denklem 3.19'daki Beer-Lambert yasası uyarınca her bir kalınlık için lineer zayıflama katsayısı hesaplandığında Şekil 4.2'deki grafik elde edilmektedir.



Şekil 4.2. Kalınlığa bağlı lineer zayıflama katsayısındaki değişim

Grafik incelendiğinde; S1 malzemesi için aynı enerjide farklı kalınlıklarda farklı lineer zayıflama katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Fakat lineer zayıflama katsayısı malzemeye has bir özellik olup, aynı enerjide kalınlık değişse bile tek bir değere sahip olmalıdır. Bu istatistiksel olayı düzenlemek için I/I_0 değerlerinin

kalınlığa göre grafiğine $y = ae^{bx}$ olacak şekilde eğri uydurma (fitting) işlemi yapılmıştır. Verilen bu örnek için eğri uydurma işleminden sonra elde edilen grafik Şekil 4.3'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.3. Eğri uydurma (Fitting) sonrası lineer zayıflama katsayısının kalınlığa bağlı değişimi

Beer-Lambert Yasası'nda Denklem 3.19'da gerekli düzenleme yapılarak Denklem 4.1 elde edilebilir. Bu denklem Şekil 4.3'teki grafiğe uydurduğumuz eğri denklemiyle ($y = ae^{bx}$) kıyaslandığında $y = I/I_0$ ve $b = -\mu$' dür. Bu kıyaslama, $a \approx 1$ olduğunda doğrudur.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \tag{4.1}$$

4.3 Lineer Zayıflama Katsayıları

6 farklı malzeme 5 farklı enerji ve 10 farklı kalınlık için MCNP ile hesaplanan I/I_0 değerleri Çizelge 4.2-4.7 arasında verilmiş olup, Microsoft Excel eğri uydurma yöntemi ile elde edilen denklemleri gösteren grafikler ise Şekil 4.4-4.9 'da verilmiştir.

Çizelge 4.2. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S1 malzemesinin I/I_0 değerleri

x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,25423	0,98507
0,050	53.16	1,27324	1,23566	0,97048
0,075	53.16	1,27324	1,21724	0,95602
0,100	53.16	1,27324	1,19919	0,94184
0,125	53.16	1,27324	1,18143	0,92789
0,150	53.16	1,27324	1,16376	0,91401
0,175	53.16	1,27324	1,14643	0,90040
0,200	53.16	1,27324	1,12936	0,88700
0,225	53.16	1,27324	1,11251	0,87376
0,250	53.16	1,27324	1,09593	0,86074
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,26064	0,99010
0,050	80.99	1,27324	1,24829	0,98040
0,075	80.99	1,27324	1,23604	0,97078
0,100	80.99	1,27324	1,22390	0,96125
0,125	80.99	1,27324	1,21185	0,95178
0,150	80.99	1,27324	1,19993	0,94242
0,175	80.99	1,27324	1,18819	0,93320
0,200	80.99	1,27324	1,17650	0,92402
0,225	80.99	1,27324	1,16483	0,91486
0,250	80.99	1,27324	1,15339	0,90587
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26423	0,99292
0,050	160.6	1,27324	1,25534	0,98594
0,075	160.6	1,27324	1,24656	0,97905
0,100	160.6	1,27324	1,23786	0,97221
0,125	160.6	1,27324	1,22922	0,96543
0,150	160.6	1,27324	1,22052	0,95859
0,175	160.6	1,27324	1,21197	0,95188
0,200	160.6	1,27324	1,20344	0,94518
0,225	160.6	1,27324	1,19500	0,93855
0,250	160.6	1,27324	1,18664	0,93198
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26661	0,99479
0,050	356	1,27324	1,26003	0,98962
0,075	356	1,27324	1,25350	0,98450
0,100	356	1,27324	1,24704	0,97942
0,125	356	1,27324	1,24063	0,97439
0,150	356	1,27324	1,23423	0,96936
0,175	356	1,27324	1,22787	0,96437
0,200	356	1,27324	1,22146	0,95933
0,225	356	1,27324	1,21513	0,95436
0,250	356	1,27324	1,20885	0,94943
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26812	0,99598
0,050	661.6	1,27324	1,26305	0,99200
0,075	661.6	1,27324	1,25802	0,98805
0,100	661.6	1,27324	1,25302	0,98412
0,125	661.6	1,27324	1,24805	0,98022
0,150	661.6	1,27324	1,24306	0,97630
0,175	661.6	1,27324	1,23816	0,97245
0,200	661.6	1,27324	1,23324	0,96858
0,225	661.6	1,27324	1,22837	0,96476
0,250	661.6	1,27324	1,22345	0,96090

Çizelge 4.3. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S2 malzemesinin I/I_0 değerleri

x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,25094	0,98249
0,050	53.16	1,27324	1,22917	0,96539
0,075	53.16	1,27324	1,20760	0,94845
0,100	53.16	1,27324	1,18656	0,93192
0,125	53.16	1,27324	1,16575	0,91558
0,150	53.16	1,27324	1,14535	0,89956
0,175	53.16	1,27324	1,12530	0,88381
0,200	53.16	1,27324	1,10559	0,86833
0,225	53.16	1,27324	1,08618	0,85308
0,250	53.16	1,27324	1,06723	0,83820
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,25836	0,98831
0,050	80.99	1,27324	1,24374	0,97683
0,075	80.99	1,27324	1,22938	0,96555
0,100	80.99	1,27324	1,21501	0,95427
0,125	80.99	1,27324	1,20089	0,94318
0,150	80.99	1,27324	1,18698	0,93225
0,175	80.99	1,27324	1,17317	0,92141
0,200	80.99	1,27324	1,15946	0,91064
0,225	80.99	1,27324	1,14595	0,90003
0,250	80.99	1,27324	1,13264	0,88957
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26256	0,99161
0,050	160.6	1,27324	1,25206	0,98337
0,075	160.6	1,27324	1,24167	0,97520
0,100	160.6	1,27324	1,23135	0,96710
0,125	160.6	1,27324	1,22106	0,95902
0,150	160.6	1,27324	1,21087	0,95101
0,175	160.6	1,27324	1,20080	0,94311
0,200	160.6	1,27324	1,19081	0,93526
0,225	160.6	1,27324	1,18094	0,92751
0,250	160.6	1,27324	1,17102	0,91972
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26534	0,99380
0,050	356	1,27324	1,25758	0,98770
0,075	356	1,27324	1,24987	0,98165
0,100	356	1,27324	1,24218	0,97561
0,125	356	1,27324	1,23460	0,96965
0,150	356	1,27324	1,22704	0,96371
0,175	356	1,27324	1,21943	0,95774
0,200	356	1,27324	1,21197	0,95188
0,225	356	1,27324	1,20449	0,94600
0,250	356	1,27324	1,19711	0,94021
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26717	0,99523
0,050	661.6	1,27324	1,26113	0,99049
0,075	661.6	1,27324	1,25518	0,98582
0,100	661.6	1,27324	1,24929	0,98119
0,125	661.6	1,27324	1,24334	0,97652
0,150	661.6	1,27324	1,23753	0,97195
0,175	661.6	1,27324	1,23169	0,96737
0,200	661.6	1,27324	1,22585	0,96278
0,225	661.6	1,27324	1,22002	0,95820
0,250	661.6	1,27324	1,21425	0,95367

Çizelge 4.4. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S3 malzemesinin I/I_0 değerleri

x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,25082	0,98239
0,050	53.16	1,27324	1,22895	0,96521
0,075	53.16	1,27324	1,20728	0,94820
0,100	53.16	1,27324	1,18614	0,93159
0,125	53.16	1,27324	1,16522	0,91516
0,150	53.16	1,27324	1,14475	0,89908
0,175	53.16	1,27324	1,12458	0,88324
0,200	53.16	1,27324	1,10480	0,86771
0,225	53.16	1,27324	1,08531	0,85240
0,250	53.16	1,27324	1,06627	0,83745
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,25821	0,98820
0,050	80.99	1,27324	1,24342	0,97658
0,075	80.99	1,27324	1,22891	0,96518
0,100	80.99	1,27324	1,21440	0,95379
0,125	80.99	1,27324	1,20014	0,94259
0,150	80.99	1,27324	1,18608	0,93154
0,175	80.99	1,27324	1,17210	0,92056
0,200	80.99	1,27324	1,15828	0,90971
0,225	80.99	1,27324	1,14465	0,89901
0,250	80.99	1,27324	1,13118	0,88843
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26240	0,99149
0,050	160.6	1,27324	1,25178	0,98315
0,075	160.6	1,27324	1,24122	0,97485
0,100	160.6	1,27324	1,23078	0,96665
0,125	160.6	1,27324	1,22033	0,95844
0,150	160.6	1,27324	1,21001	0,95034
0,175	160.6	1,27324	1,19980	0,94232
0,200	160.6	1,27324	1,18969	0,93438
0,225	160.6	1,27324	1,17966	0,92650
0,250	160.6	1,27324	1,16963	0,91862
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26523	0,99371
0,050	356	1,27324	1,25735	0,98752
0,075	356	1,27324	1,24954	0,98139
0,100	356	1,27324	1,24175	0,97527
0,125	356	1,27324	1,23404	0,96921
0,150	356	1,27324	1,22635	0,96317
0,175	356	1,27324	1,21865	0,95713
0,200	356	1,27324	1,21106	0,95116
0,225	356	1,27324	1,20351	0,94523
0,250	356	1,27324	1,19601	0,93934
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26708	0,99516
0,050	661.6	1,27324	1,26095	0,99035
0,075	661.6	1,27324	1,25490	0,98560
0,100	661.6	1,27324	1,24894	0,98091
0,125	661.6	1,27324	1,24291	0,97618
0,150	661.6	1,27324	1,23701	0,97155
0,175	661.6	1,27324	1,23107	0,96688
0,200	661.6	1,27324	1,22516	0,96224
0,225	661.6	1,27324	1,21923	0,95758
0,250	661.6	1,27324	1,21339	0,95299

Çizelge 4.5. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S4 malzemesinin I/I_0 değerleri

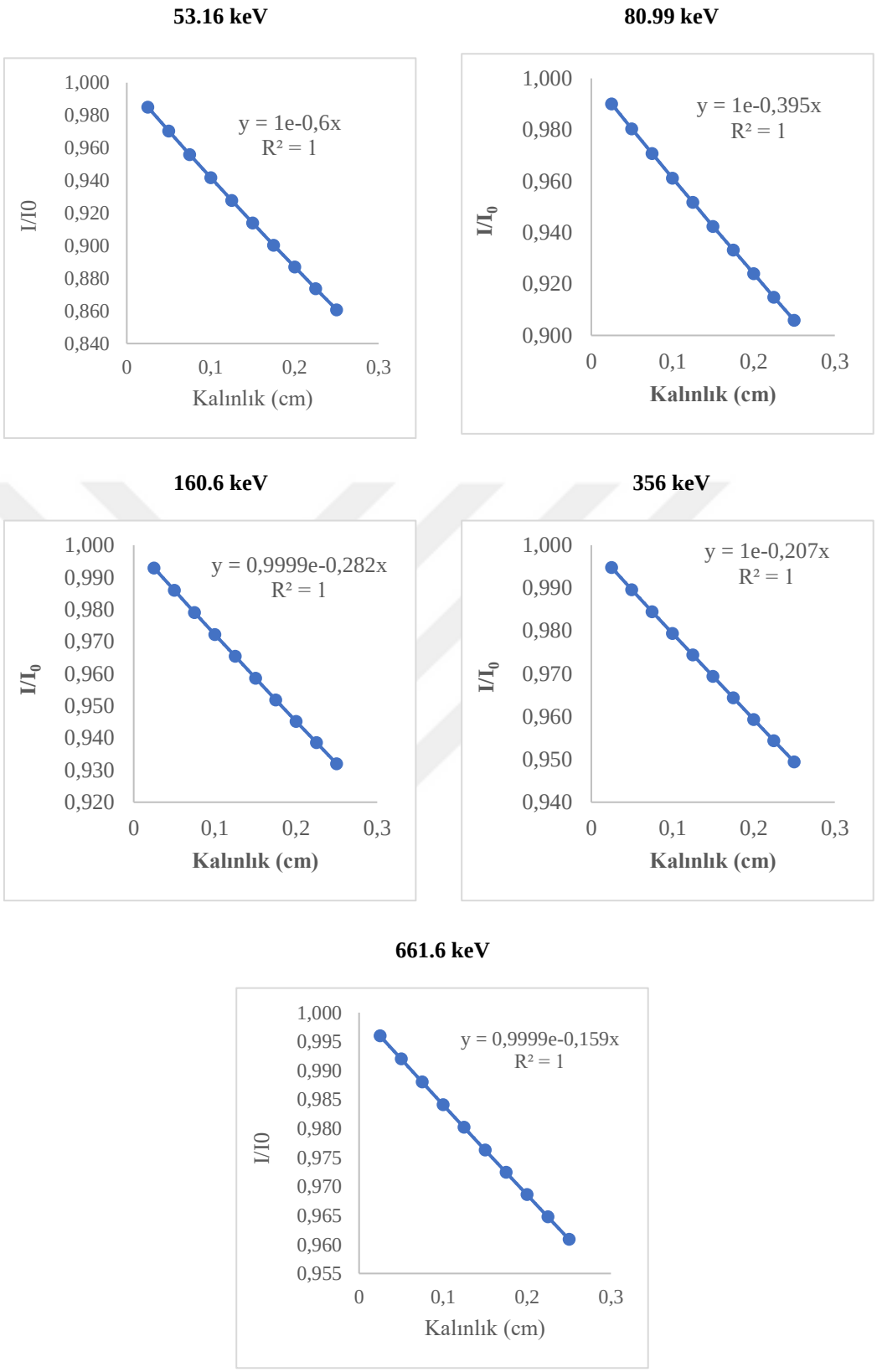
x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,25038	0,98205
0,050	53.16	1,27324	1,22806	0,96452
0,075	53.16	1,27324	1,20598	0,94717
0,100	53.16	1,27324	1,18446	0,93027
0,125	53.16	1,27324	1,16314	0,91353
0,150	53.16	1,27324	1,14229	0,89715
0,175	53.16	1,27324	1,12176	0,88103
0,200	53.16	1,27324	1,10162	0,86521
0,225	53.16	1,27324	1,08181	0,84965
0,250	53.16	1,27324	1,06246	0,83445
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,25782	0,98789
0,050	80.99	1,27324	1,24267	0,97599
0,075	80.99	1,27324	1,22776	0,96428
0,100	80.99	1,27324	1,21291	0,95262
0,125	80.99	1,27324	1,19828	0,94113
0,150	80.99	1,27324	1,18391	0,92984
0,175	80.99	1,27324	1,16954	0,91855
0,200	80.99	1,27324	1,15543	0,90747
0,225	80.99	1,27324	1,14149	0,89652
0,250	80.99	1,27324	1,12767	0,88567
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26208	0,99123
0,050	160.6	1,27324	1,25115	0,98265
0,075	160.6	1,27324	1,24030	0,97413
0,100	160.6	1,27324	1,22955	0,96569
0,125	160.6	1,27324	1,21877	0,95722
0,150	160.6	1,27324	1,20817	0,94889
0,175	160.6	1,27324	1,19769	0,94066
0,200	160.6	1,27324	1,18732	0,93252
0,225	160.6	1,27324	1,17700	0,92441
0,250	160.6	1,27324	1,16669	0,91632
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26499	0,99352
0,050	356	1,27324	1,25687	0,98714
0,075	356	1,27324	1,24884	0,98084
0,100	356	1,27324	1,24081	0,97453
0,125	356	1,27324	1,23288	0,96830
0,150	356	1,27324	1,22495	0,96207
0,175	356	1,27324	1,21703	0,95585
0,200	356	1,27324	1,20922	0,94972
0,225	356	1,27324	1,20146	0,94362
0,250	356	1,27324	1,19376	0,93758
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26689	0,99501
0,050	661.6	1,27324	1,26059	0,99006
0,075	661.6	1,27324	1,25436	0,98517
0,100	661.6	1,27324	1,24820	0,98033
0,125	661.6	1,27324	1,24202	0,97548
0,150	661.6	1,27324	1,23591	0,97068
0,175	661.6	1,27324	1,22984	0,96591
0,200	661.6	1,27324	1,22372	0,96111
0,225	661.6	1,27324	1,21763	0,95632
0,250	661.6	1,27324	1,21162	0,95160

Çizelge 4.6. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S5 malzemesinin I/I_0 değerleri

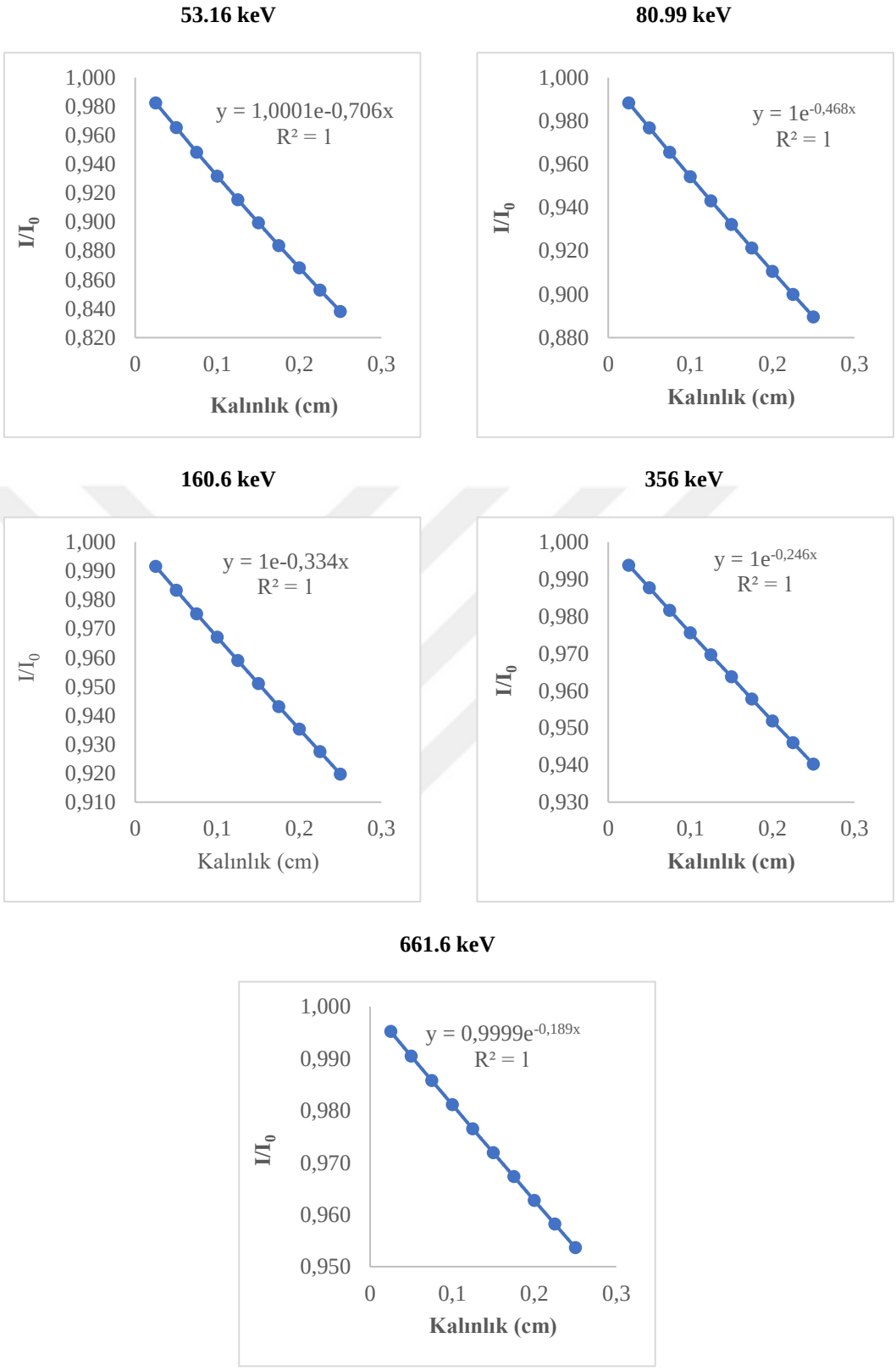
x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,24987	0,98165
0,050	53.16	1,27324	1,22703	0,96371
0,075	53.16	1,27324	1,20448	0,94600
0,100	53.16	1,27324	1,18252	0,92875
0,125	53.16	1,27324	1,16073	0,91163
0,150	53.16	1,27324	1,13947	0,89494
0,175	53.16	1,27324	1,11849	0,87846
0,200	53.16	1,27324	1,09796	0,86234
0,225	53.16	1,27324	1,07777	0,84648
0,250	53.16	1,27324	1,05807	0,83101
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,25738	0,98754
0,050	80.99	1,27324	1,24182	0,97532
0,075	80.99	1,27324	1,22645	0,96325
0,100	80.99	1,27324	1,21119	0,95127
0,125	80.99	1,27324	1,19619	0,93949
0,150	80.99	1,27324	1,18142	0,92788
0,175	80.99	1,27324	1,16667	0,91630
0,200	80.99	1,27324	1,15217	0,90491
0,225	80.99	1,27324	1,13791	0,89371
0,250	80.99	1,27324	1,12368	0,88254
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26171	0,99094
0,050	160.6	1,27324	1,25043	0,98209
0,075	160.6	1,27324	1,23924	0,97330
0,100	160.6	1,27324	1,22816	0,96459
0,125	160.6	1,27324	1,21705	0,95587
0,150	160.6	1,27324	1,20613	0,94729
0,175	160.6	1,27324	1,19532	0,93880
0,200	160.6	1,27324	1,18465	0,93042
0,225	160.6	1,27324	1,17398	0,92204
0,250	160.6	1,27324	1,16338	0,91372
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26472	0,99331
0,050	356	1,27324	1,25633	0,98672
0,075	356	1,27324	1,24802	0,98019
0,100	356	1,27324	1,23977	0,97371
0,125	356	1,27324	1,23156	0,96726
0,150	356	1,27324	1,22339	0,96085
0,175	356	1,27324	1,21522	0,95443
0,200	356	1,27324	1,20716	0,94810
0,225	356	1,27324	1,19917	0,94183
0,250	356	1,27324	1,19122	0,93558
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26669	0,99486
0,050	661.6	1,27324	1,26018	0,98974
0,075	661.6	1,27324	1,25374	0,98468
0,100	661.6	1,27324	1,24737	0,97968
0,125	661.6	1,27324	1,24101	0,97469
0,150	661.6	1,27324	1,23470	0,96973
0,175	661.6	1,27324	1,22843	0,96481
0,200	661.6	1,27324	1,22210	0,95983
0,225	661.6	1,27324	1,21582	0,95490
0,250	661.6	1,27324	1,20962	0,95003

Çizelge 4.7. MCNP' de belli enerjilerdeki fotonlar için S6 malzemesinin I/I_0 değerleri

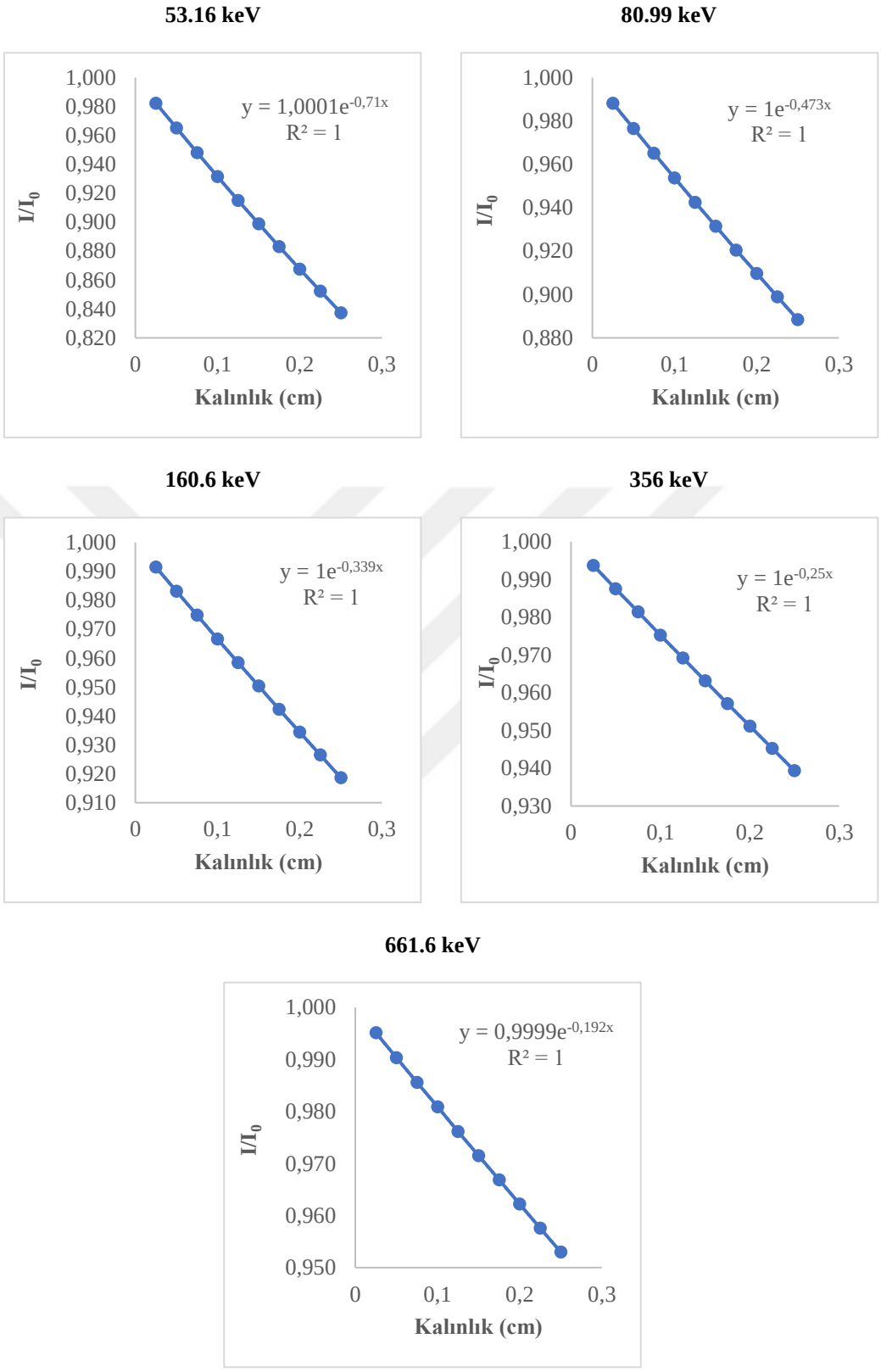
x (cm)	Foton (keV)	I_0	I	I/I_0
0,025	53.16	1,27324	1,24905	0,98100
0,050	53.16	1,27324	1,22537	0,96240
0,075	53.16	1,27324	1,20207	0,94410
0,100	53.16	1,27324	1,17932	0,92624
0,125	53.16	1,27324	1,15686	0,90860
0,150	53.16	1,27324	1,13488	0,89133
0,175	53.16	1,27324	1,11325	0,87434
0,200	53.16	1,27324	1,09203	0,85768
0,225	53.16	1,27324	1,07129	0,84139
0,250	53.16	1,27324	1,05097	0,82543
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	80.99	1,27324	1,25672	0,98703
0,050	80.99	1,27324	1,24052	0,97430
0,075	80.99	1,27324	1,22448	0,96170
0,100	80.99	1,27324	1,20862	0,94925
0,125	80.99	1,27324	1,19302	0,93700
0,150	80.99	1,27324	1,17765	0,92492
0,175	80.99	1,27324	1,16233	0,91289
0,200	80.99	1,27324	1,14728	0,90107
0,225	80.99	1,27324	1,13245	0,88942
0,250	80.99	1,27324	1,11774	0,87787
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	160.6	1,27324	1,26119	0,99054
0,050	160.6	1,27324	1,24941	0,98128
0,075	160.6	1,27324	1,23771	0,97209
0,100	160.6	1,27324	1,22609	0,96297
0,125	160.6	1,27324	1,21454	0,95390
0,150	160.6	1,27324	1,20313	0,94494
0,175	160.6	1,27324	1,19185	0,93608
0,200	160.6	1,27324	1,18071	0,92733
0,225	160.6	1,27324	1,16955	0,91856
0,250	160.6	1,27324	1,15854	0,90991
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	356	1,27324	1,26433	0,99300
0,050	356	1,27324	1,25554	0,98610
0,075	356	1,27324	1,24685	0,97927
0,100	356	1,27324	1,23822	0,97250
0,125	356	1,27324	1,22968	0,96579
0,150	356	1,27324	1,22108	0,95903
0,175	356	1,27324	1,21260	0,95237
0,200	356	1,27324	1,20416	0,94574
0,225	356	1,27324	1,19581	0,93919
0,250	356	1,27324	1,18756	0,93271
x (cm)	**Foton (keV)**	**I_0**	**I**	**I/I_0**
0,025	661.6	1,27324	1,26638	0,99461
0,050	661.6	1,27324	1,25959	0,98928
0,075	661.6	1,27324	1,25287	0,98400
0,100	661.6	1,27324	1,24616	0,97873
0,125	661.6	1,27324	1,23955	0,97354
0,150	661.6	1,27324	1,23294	0,96835
0,175	661.6	1,27324	1,22634	0,96316
0,200	661.6	1,27324	1,21974	0,95798
0,225	661.6	1,27324	1,21323	0,95287
0,250	661.6	1,27324	1,20673	0,94776



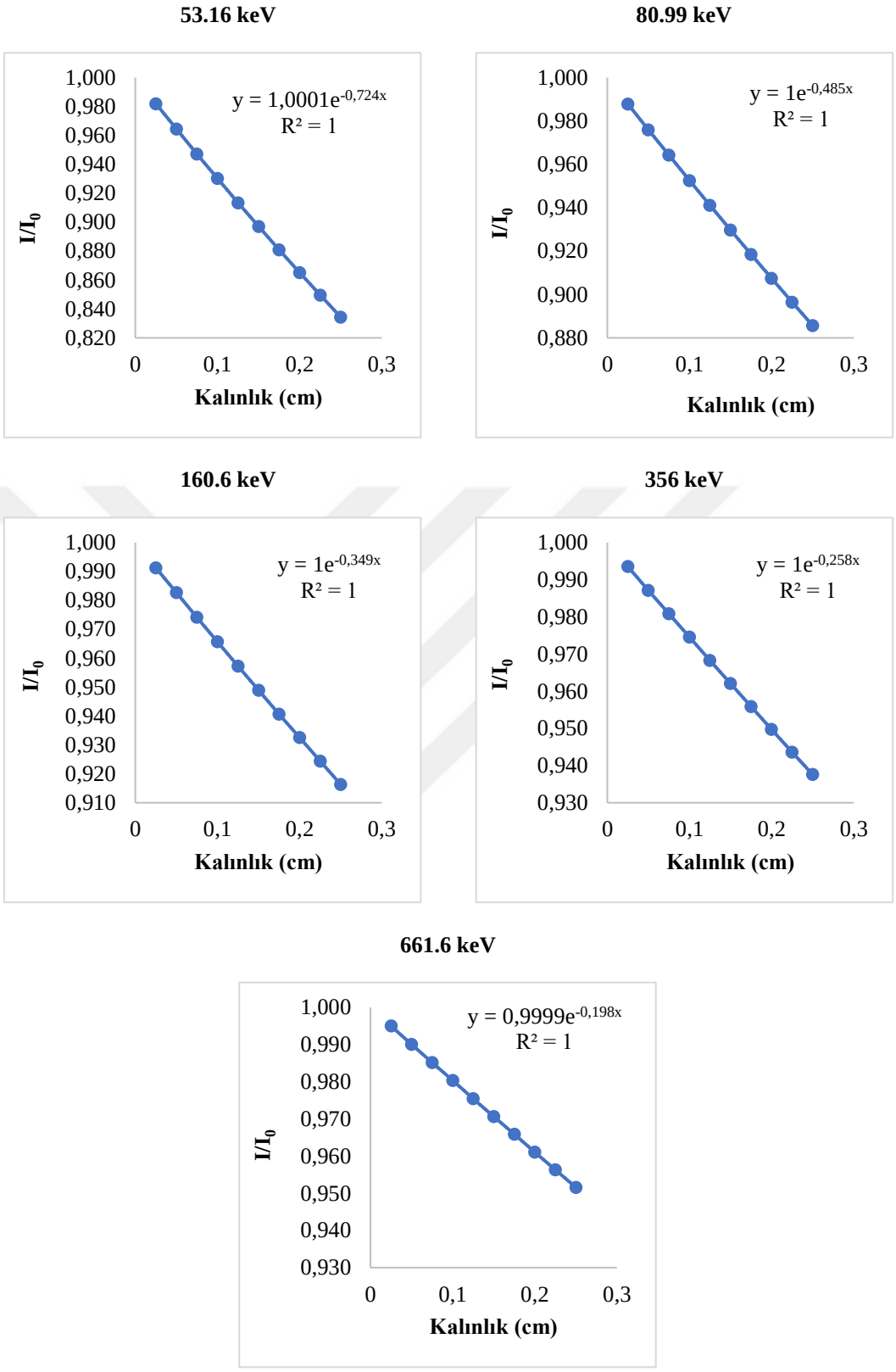
Şekil 4.4. MCNP ile elde edilen S1 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği



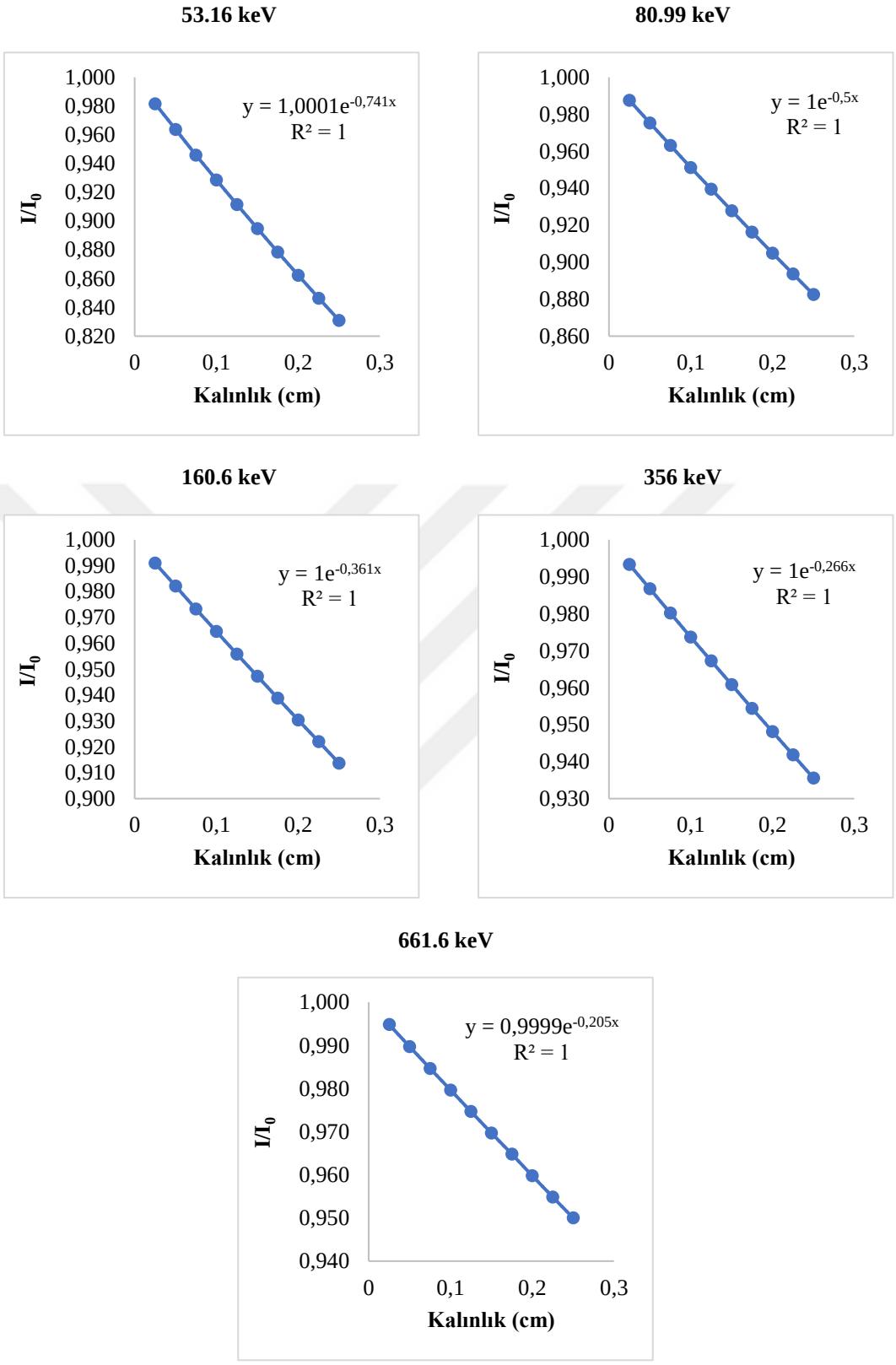
Şekil 4.5. MCNP ile elde edilen S2 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği



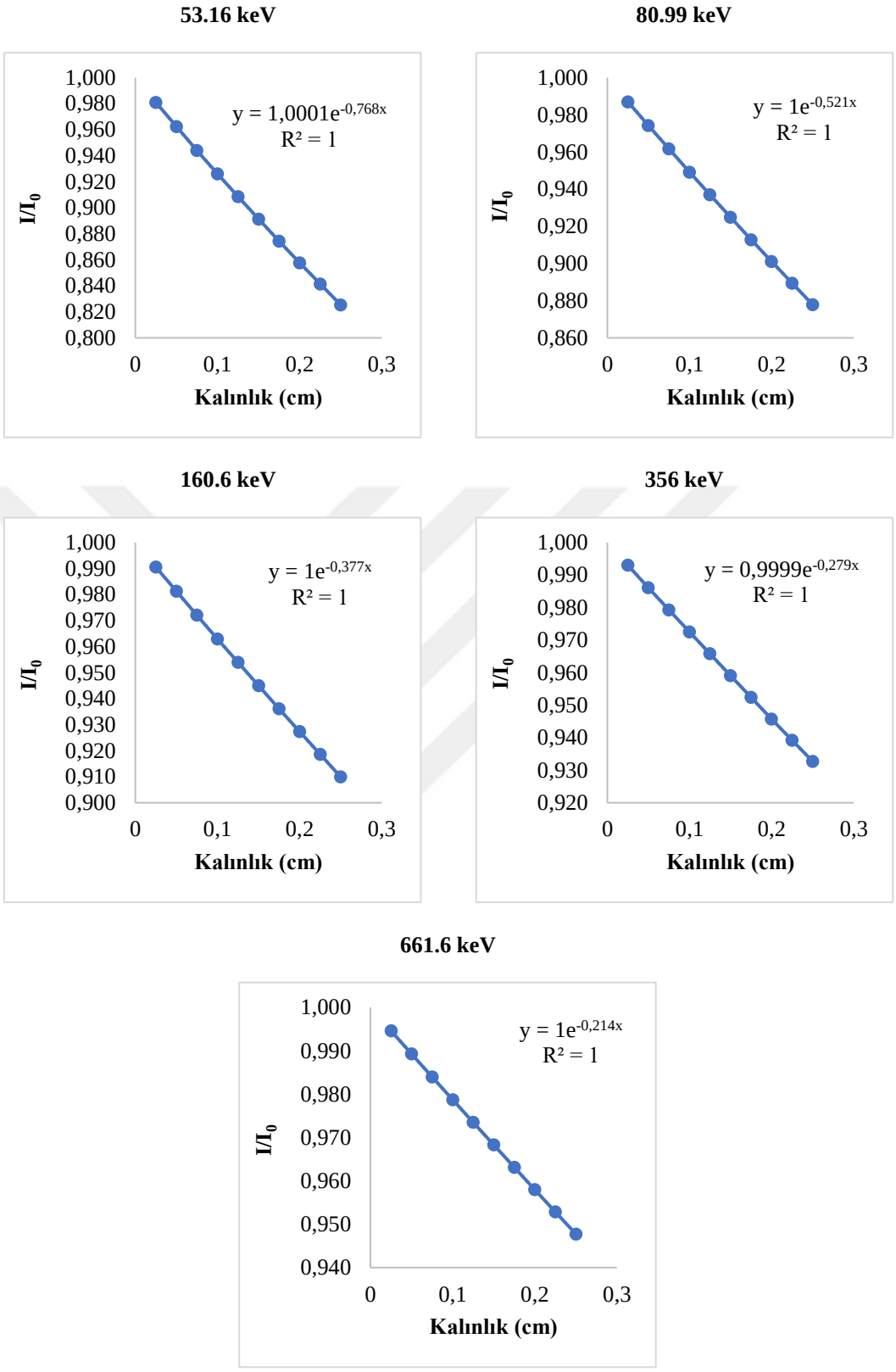
Şekil 4.6. MCNP ile elde edilen S3 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği



Şekil 4.7. MCNP ile elde edilen S4 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği



Şekil 4.8. MCNP ile elde edilen S5 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği

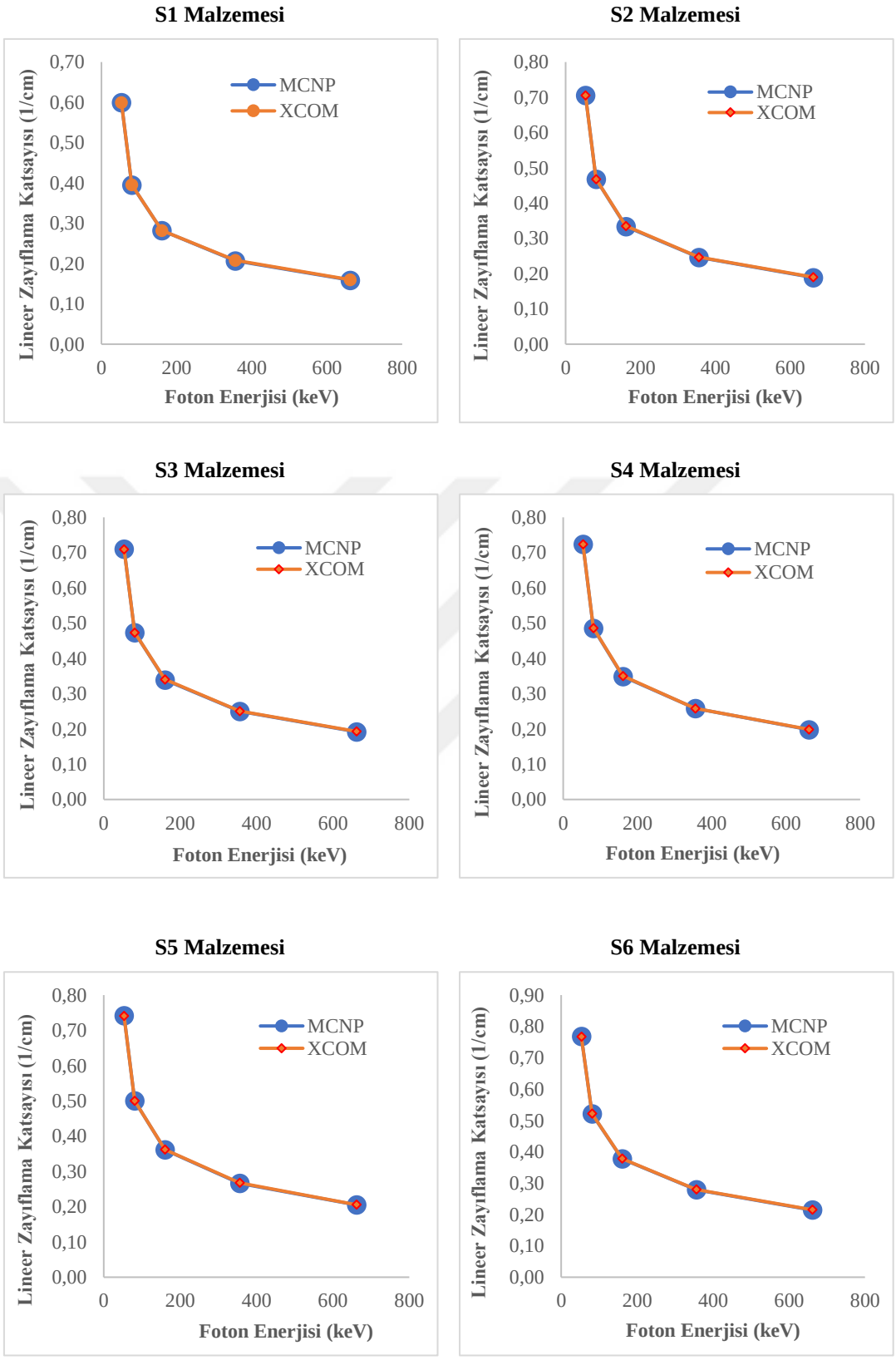


Şekil 4.9. MCNP ile elde edilen S6 malzemesinin simülasyon sonuçları ve eğri uydurma grafiği

Şekil 4.4-4.9 arasındaki grafiklerden elde edilen ve Denklem 4.1'e benzetim şeklinde elde edilen lineer zayıflama katsayılarının oluşturulduğu tablo ve XCOM' dan alınan lineer zayıflama katsayı değerlerinin kıyaslanması Çizelge 4.8' de toplu şekilde gösterilmiştir. Bu verilerin grafiksel olarak gösterimi ise Şekil 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Lineer zayıflama katsayısı için malzemelerin MCNP ile XCOM karşılaştırılması

S1 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53.16	0.60000	0.59987	0.02%
80.99	0.39500	0.39584	0.21%
160.6	0.28200	0.28232	0.11%
356	0.20700	0.20807	0.51%
661.6	0.15900	0.16002	0.64%
S2 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53,16	0,70600	0,70606	0,01%
80,99	0,46800	0,46837	0,08%
160,6	0,33400	0,33534	0,40%
356	0,24600	0,24726	0,51%
661,6	0,18900	0,19018	0,62%
S3 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53,16	0,71000	0,70967	0,05%
80,99	0,47300	0,47354	0,11%
160,6	0,33900	0,34017	0,34%
356	0,25000	0,25095	0,38%
661,6	0,19200	0,19301	0,52%
S4 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53,16	0,72400	0,72404	0,01%
80,99	0,48500	0,48602	0,21%
160,6	0,34900	0,35005	0,30%
356	0,25800	0,25853	0,20%
661,6	0,19800	0,19888	0,44%
S5 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53,16	0,74100	0,74066	0,05%
80,99	0,50000	0,49994	0,01%
160,6	0,36100	0,36149	0,13%
356	0,26600	0,26710	0,41%
661,6	0,20500	0,20550	0,24%
S6 Malzemesi için μ (1/cm)			
Foton (keV)	**MCNP**	**XCOM**	**Fark**
53,16	0,76800	0,76722	0,10%
80,99	0,52100	0,52127	0,05%
160,6	0,37700	0,37820	0,32%
356	0,27900	0,27959	0,21%
661,6	0,21400	0,21509	0,51%



Şekil 4.10. Lineer zayıflama katsayısı için S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin MCNP ile XCOM grafiklerinin karşılaştırılması

XCOM sitesinden bir materyalin bu tez ile ilgili olarak sadece kütlesel zayıflama katsayılarını elde ederiz. Bu değerleri her bir malzemenin yoğunluğu ile çarpmak suretiyle lineer zayıflama katsayıları elde edilmiştir.

Şekil 4.10 ve Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi MCNP programı ve Microsoft Excel eğri uydurma yöntemiyle hesaplanan lineer zayıflama katsayıları ile aynı malzemenin aynı enerjili fotonlar için XCOM' dan hesaplanan lineer zayıflama katsayı değerleri kıyaslandığında; %1'in altında farkla hesaplanmış oldukları görünmektedir. Bu sonuçlar yöntemin doğruluğunu ispatlar niteliktedir. Şekil 4.10'daki grafikler incelendiğinde; tüm cam numunelerinde artan foton enerjisine karşılık, grafiklerin logaritmik olarak düşüş şeklinde aynı eğilimi sergilediği görülmektedir.

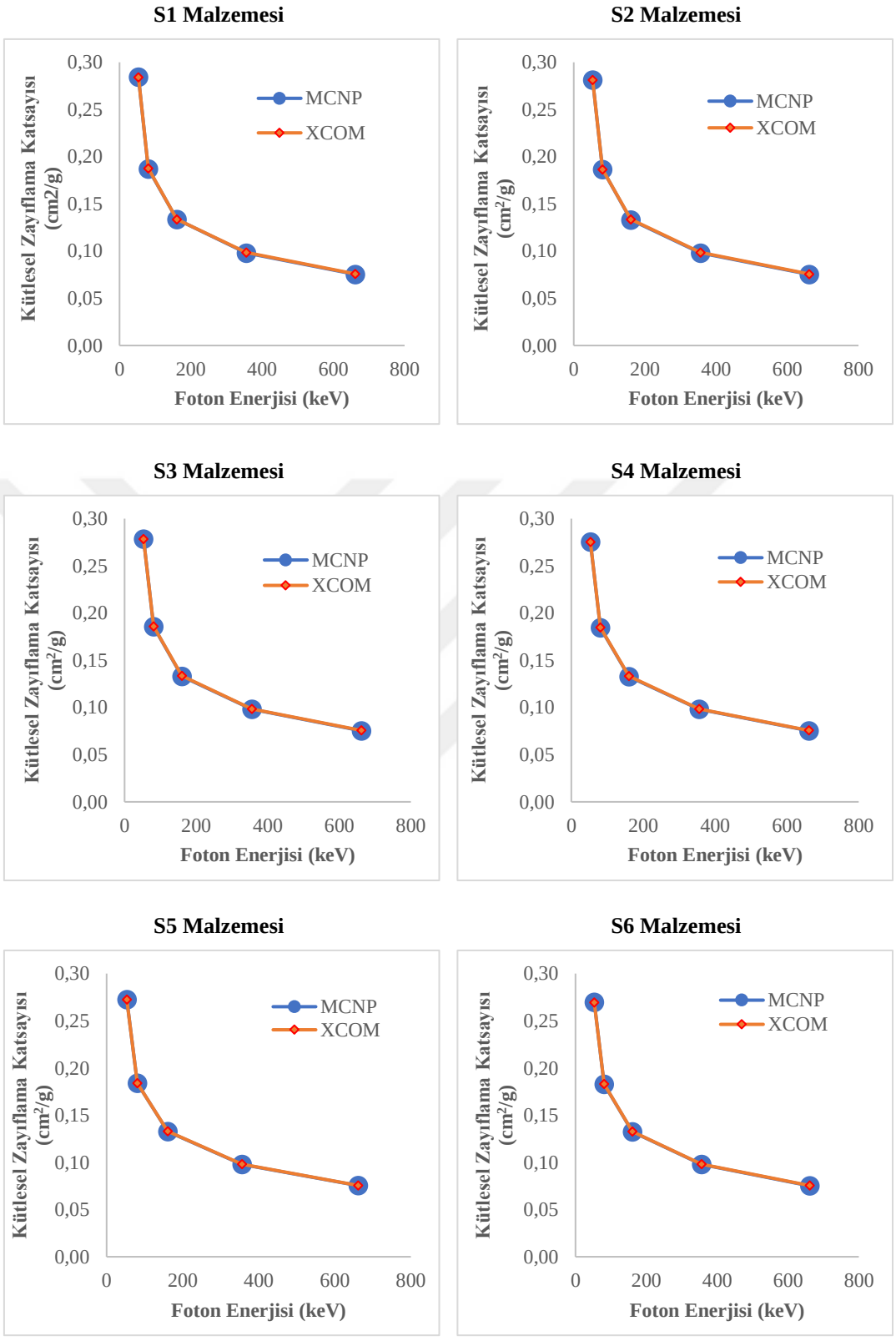
4.4. Kütlesel Zayıflama Katsayıları

S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin 53.16 keV, 80.99 keV, 160.6 keV, 356 keV ve 661.6 keV enerjili fotonlar kullanılarak MCNP ile hesaplanan kütlesel zayıflama katsayı değerleri ve XCOM' dan alınan değerler Çizelge 4.9'da karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda bu değerler kullanılarak tüm malzemeler için oluşturulan enerjiye bağlı kütlesel zayıflama katsayı grafikleri Şekil 4.11'deki gibi çizilmiştir.

Çizelge 4.9'daki verilerde ve Şekil 4.11'deki grafiklerde gösterildiği gibi MCNP ve XCOM'dan elde edilen kütlesel zayıflama katsayılarının karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan farkların %1'den daha küçük olduğu görülmektedir. Şekil 4.11'deki grafiklere bakıldığında ise aynı cam numunesi için gelen foton enerjisi arttıkça kütlesel zayıflama katsayısında logaritmik bir azalma söz konusudur.

Çizelge 4.9. Kütlesel zayıflama katsayısı için malzemelerin MCNP ile XCOM karşılaştırılması

S1 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,28436	0,28430	0,02%
80,99	0,18720	0,18760	0,21%
160,6	0,13365	0,13380	0,11%
356	0,09810	0,09861	0,51%
661,6	0,07536	0,07584	0,64%
S2 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,28127	0,28130	0,01%
80,99	0,18645	0,18660	0,08%
160,6	0,13307	0,13360	0,40%
356	0,09801	0,09851	0,51%
661,6	0,07530	0,07577	0,62%
S3 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,27843	0,27830	0,05%
80,99	0,18549	0,18570	0,11%
160,6	0,13294	0,13340	0,34%
356	0,09804	0,09841	0,38%
661,6	0,07529	0,07569	0,52%
S4 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,27529	0,27530	0,01%
80,99	0,18441	0,18480	0,21%
160,6	0,13270	0,13310	0,30%
356	0,09810	0,09830	0,20%
661,6	0,07529	0,07562	0,44%
S5 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,27243	0,27230	0,05%
80,99	0,18382	0,18380	0,01%
160,6	0,13272	0,13290	0,13%
356	0,09779	0,09820	0,41%
661,6	0,07537	0,07555	0,24%
S6 Malzemesi			
Foton (keV)	**MCNP (cm^2/g)**	**XCOM (cm^2/g)**	**Fark**
53,16	0,26947	0,26920	0,10%
80,99	0,18281	0,18290	0,05%
160,6	0,13228	0,13270	0,32%
356	0,09789	0,09810	0,21%
661,6	0,07509	0,07547	0,51%



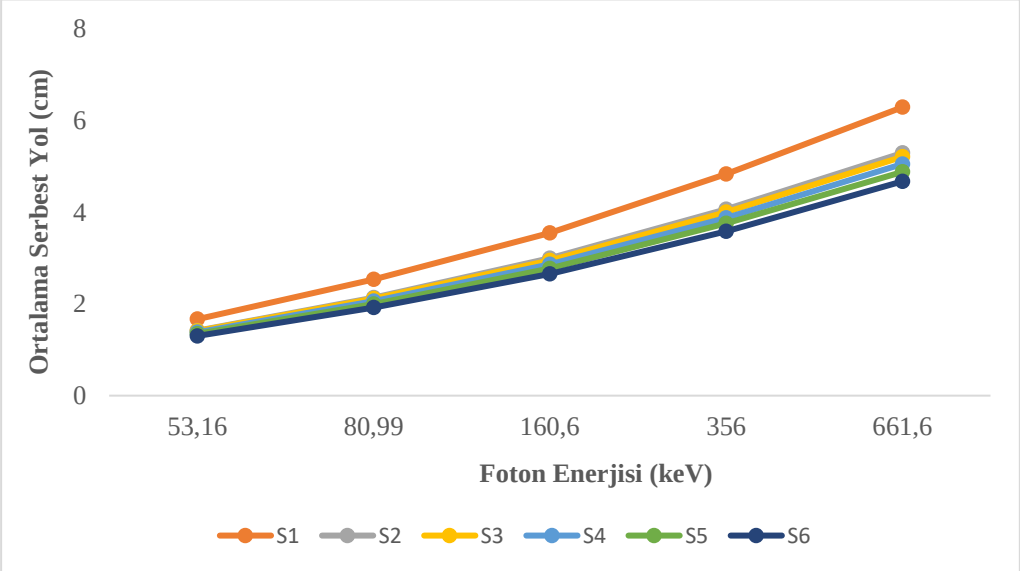
Şekil 4.11. Kütlesel zayıflama katsayısı için S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin MCNP ile XCOM grafiklerinin karşılaştırılması

4.5 Ortalama Serbest Yol Değerleri

Bu tez çalışmasına konu olan S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 kodlu cam örnekleri için MCNP programı ile hesaplanan ortalama serbest yol değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Cam örneklerinin ortalama serbest yol değerleri bakımından, kendi aralarındaki kıyaslamaları enerjiye bağlı olarak Şekil 4.12 grafiğinde verilmiştir.

Çizelge 4.10. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemeleri için MFP değerleri (cm)

Foton Enerjisi (keV)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
53,16	1,66667	1,41643	1,40845	1,38122	1,34953	1,30208
80,99	2,53165	2,13675	2,11416	2,06186	2,00000	1,91939
160,6	3,54610	2,99401	2,94985	2,86533	2,77008	2,65252
356	4,83092	4,06504	4,00000	3,87597	3,75940	3,58423
661,6	6,28931	5,29101	5,20833	5,05051	4,87805	4,67290



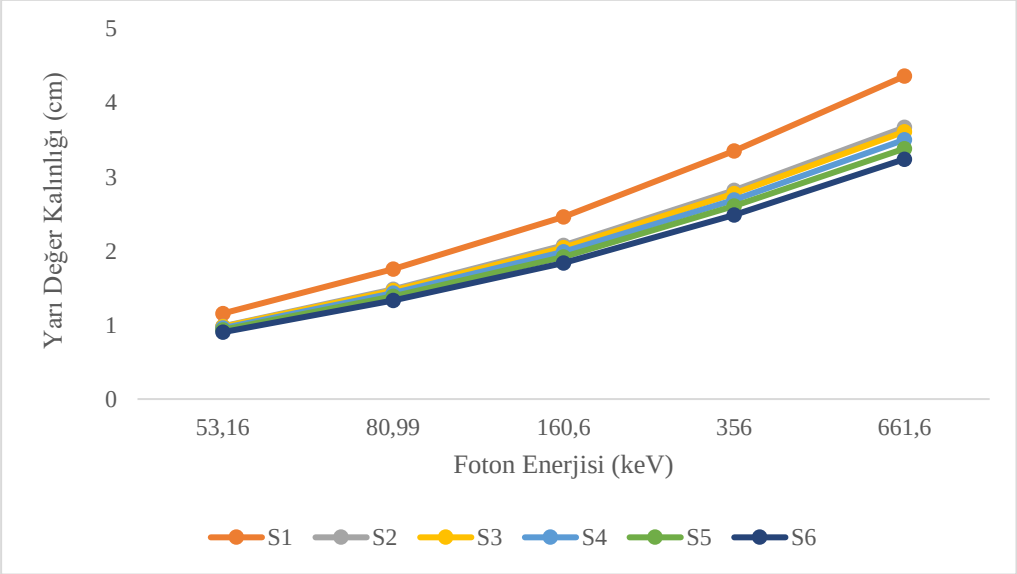
Şekil. 4.12. Bütün cam örnekleri için ortalama serbest yol değerlerinin kıyaslanması

4.6. Yarı Değer Kalınlık Değerleri

Bu tez çalışmasına konu olan S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 kodlu cam örnekler için MCNP programı ile hesaplanan yarı değer kalınlık değerleri Çizelge 4.11'de gösterilmiştir. Cam örneklerinin kendi aralarındaki yarı değer kalınlık değerlerinin kıyaslamaları ise enerjiye bağlı olarak Şekil 4.13 grafiğinde verilmiştir.

Çizelge 4.11. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemeleri için HVL değerleri (cm)

Foton Enerjisi (keV)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
53,16	1,15525	0,98179	0,97626	0,95739	0,93542	0,90254
80,99	1,75480	1,48108	1,46543	1,42917	1,38629	1,33042
160,6	2,45797	2,07529	2,04468	1,98610	1,92008	1,83859
356	3,34854	2,81767	2,77259	2,68662	2,60582	2,48440
661,6	4,35942	3,66745	3,61014	3,50074	3,38121	3,23901



Şekil 4.13. Bütün cam örnekleri için yarı değer kalınlık değerlerinin kıyaslanması

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

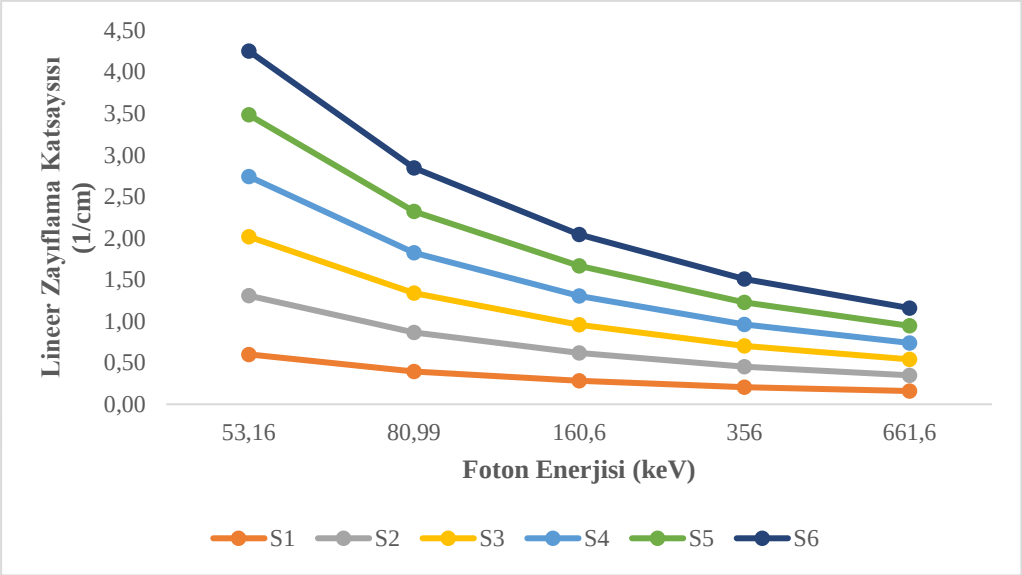
5.1. Sonuçlar

Radyasyonun günümüzde birçok alanda kullanımının artmasıyla beraber, radyasyondan korunma da önemini arttırmaktadır. Radyasyon kullanım alanları arttıkça daha önemli hale gelen korunma yöntemleri üzerine giriş bölümünde ele aldığımız çalışmalarda da görüldüğü gibi farklı malzemeler kullanılarak zırhlanma malzemeleri geliştirilmektedir. Zırhlanma malzemelerinin geliştirilmesi için en önemli parametreler ele alındığında güvenlik, sağlamlık, ucuz maliyet, kolay kullanılabilirlik vb. gibi birçok özellik öne çıkmaktadır.

Zırhlamanın başarılı olabilmesi için göz önüne alınan lineer zayıflama katsayısı, kütlesel zayıflama katsayısı, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıkları birçok çalışmada hesaplamalar sonucu gösterilmiş olup bu tez çalışmasında da kullanılan cam numuneleri için bu parametreler değerlendirilmiştir. Özellikle lineer zayıflama katsayı değerlerinin ve kütlesel zayıflama katsayı değerlerinin yüksek olması, ortalama serbest yol değerlerinin ve yarı değer kalınlık değerlerinin düşük olması bir malzemenin zırhlanma yeteneği derecesinin bir göstergesidir.

Bu çalışmada Çizelge 4.1'de ele alınan S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 cam numuneleri $xNa_2O\cdot(100\text{-}x)\ P_2O_5$ formülü uyarınca; Na_2O oranlarının %35-60 ve P_2O_5 oranlarının %65-40 aralıklarında %5'lik değişimlerle hazırlanmıştır. Hazırlanan bu 6 cam numunesi için 10 farklı kalınlıkta ve 5 farklı enerjide I/I_0 değerleri bulunarak Çizelge 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 oluşturulmuştur. Bulunan bu değerler eğri uydurma yöntemi kullanılarak Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'daki grafikler elde edilmiştir. İlgili çizelge ve grafiklerde görüldüğü üzere aynı foton enerjisinde kalınlık arttıkça I/I_0 değerleri azalmaktadır. Buda kaynaktan çıkan foton enerjisinin malzeme kalınlığının artması ile malzeme içerisinde daha fazla etkileşime girmesi ve dedektör de ölçülen foton şiddetinin azalması anlamına gelmektedir.

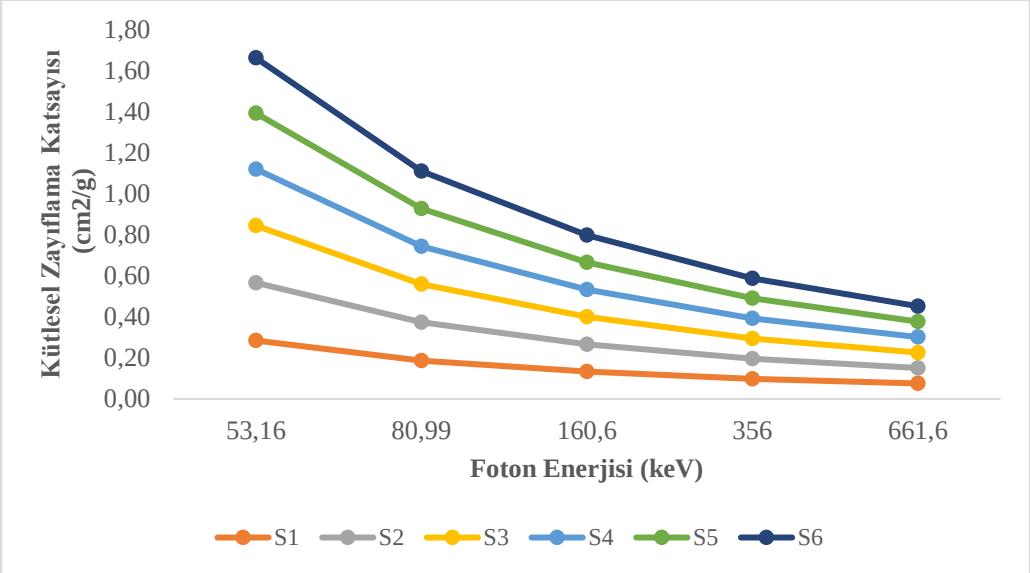
Şekil 4.14'teki grafikte, lineer zayıflama katsayısı tüm cam numuneleri için karşılaştırıldığında enerjiye bağlı olarak logaritmik bir azalış görülmektedir. Aynı enerji değerlerinde en yüksek lineer zayıflama katsayı değeri S6 cam numunesinde iken en düşük değer ise S1 cam numunesine ait olduğu görülmektedir. Malzemelerin zırhlanmasında kullanılan lineer zayıflama katsayısı değerleri özellikle kütle zayıflama katsayısının tespitinde önemli bir yere sahiptir. Çünkü lineer zayıflama katsayısının (μ) malzemenin yoğunluğuna (ρ) bölümü bize kütlesel zayıflama katsayısını vermektedir.



Şekil 4.14. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin lineer zayıflama katsayılarının karşılaştırılması

Bir malzemenin zırh olarak kullanılabilmesinin en önemli parametresi kütlesel zayıflama katsayı değeridir. Şekil 4.15'teki kütlesel zayıflama katsayıları tüm cam numuneleri için karşılaştırıldığında enerjiye bağlı olarak logaritmik bir azalış görülmektedir. Aynı enerji değerlerinde en yüksek kütlesel zayıflama katsayı değeri S6 cam numunesinde iken en düşük değer ise S1 cam numunesine ait olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri arasında cam numuneler arasındaki yoğunluk farkı gösterilebilir. Tüm cam numuneleri arasında en yüksek kütlesel zayıflama katsayı değerlerini veren S6 cam örneğinin aynı zamanda en yüksek yoğunluğa sahip materyal olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Şekil 4.15 grafiğini incelerken göz önünde bulundurulması gereken diğer bir nokta materyali oluşturan Na_2O ve P_2O_5 oranlarındaki farklılıklardır. Kütlesel zayıflama katsayısı bakımından en düşük değerlere sahip olan S1 malzemesinde; tüm cam numuneler içinde en düşük Na_2O ve en yüksek P_2O_5 oranları mevcuttur. Yine; kütlesel zayıflama katsayısı bakımından en yüksek değerlere sahip olan S6 malzemesinde; tüm cam numuneler içinde en yüksek Na_2O ve en düşük P_2O_5 oranlarına sahiptir. Buda bize; bu cam örnekleri özelinde Na_2O oranının artması ve P_2O_5 oranlarının düşmesi ile kütlesel zayıflama katsayısı arasında doğru bir orantı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.15. S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 malzemelerinin kütlesel zayıflama katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 4.12'de ortalama serbest yol ve Şekil 4.13'teki yarı değer kalınlıkları ile ilgili grafikler değerlendirildiğinde, aynı numune için gelen foton enerjilerinin artmasıyla ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlıklarındaki değerlerde artış gözlemlenmiştir. Bu artış ise beklenen bir sonuçtur. Çünkü lineer zayıflama katsayısı ve kütlesel zayıflama katsayısı, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı ile ters orantılıdır.

Gelen foton enerjisinin artışına bağlı olarak her bir cam örneğindeki ortalama serbest yol değerlerindeki artış anlaşılabilir bir durumdur. Bunun nedeni enerjisi artan

fotonun, madde içerisine olan giriciliği de artmıştır. Yani madde içerisine giren foton enerjisinin artışına bağlı olarak etkileşim geçirme ihtimali düşmüş ve dolayısıyla ilk etkileşim geçireceği mesafe de artmıştır.

Ortalama serbest yol açısından Şekil 4.12'deki grafik incelendiğinde tüm cam numunelerin kendi aralarında kıyaslandığı da görülmektedir. Buna bağlı olarak aynı foton enerjileri için; en düşük ortalama serbest yol değeri S6 kodlu örnekte görülürken, en yüksek değer ise S1 kodlu numuneye aittir. Daha önce kütlesel zayıflama katsayısı için yapılan yorumlardan yola çıkarak bunun sebebinin materyal yoğunluğu ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Özellikle radyasyona karşı zırh tasarımında, zırh kalınlığının tespiti için ortalama serbest yol önemli bir parametre olup, diğer bir önemli parametre ise yarı değer kalınlığıdır. Şekil 4.13'teki grafik incelendiğinde her bir numune kendi içerisinde gelen fotonun artan enerjisine bağlı olarak yarı değer kalınlıkları da artmıştır. Aynı zamanda tüm cam numuneleri kıyaslandığında ortalama serbest yol değerlerinde olduğu gibi en düşük yarı değer kalınlığı S6 kodlu camda, en yüksek yarı değer kalınlığı S1 kodlu camda görülmektedir. Yarı değer kalınlık değerinin gelen foton demetinin şiddetinin yarıya indiği kalınlık olarak düşünürsek çıkan sonuçlar yorumlanabilir bir niteliğe sahiptirler. Buna göre; S6 numunesi diğer numunelere göre kıyaslandığında, gelen foton demetinin şiddeti daha kısa bir mesafede yarıya inecektir. Bununla birlikte radyasyonun S6 numunesi tarafından daha tutucu olduğu söylenebilir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada ele alınan $xNa_2O\cdot(100\text{-}x)\ P_2O_5$ formülü uyarınca hazırlanan S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 cam numuneleri değerlendirildiğinde en iyi zırhlanma performansına sahip S6 cam numunesinin olduğu söylenebilir. Özellikle S6 kodlu cam numunesinin radyasyona karşı bir zırh materyali olarak kullanılıp kullanılamayacağına yönelik literatür ile kıyaslaması Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu kıyaslama için; 356 keV ile 662 keV enerjili fotonlar için, (0.30%) Bi_2O_3 · (0.70%) B_2O_3 bileşiminden oluşan cam materyali (Sing ve ark., 2002), (5%) PbO - (45%) BaO - (50%) B_2O_3

bileşiminden oluşan cam materyali (Issa, 2016), (60%) PbO (35%) SiO_2 - (0.5%) Li_2O - (4.3%) B_2O_3 - (0.2%) Dy_2O_3 bileşiminden oluşan cam materyali (Saddeek ve ark., 2018) ve (40%) WO_3 - (60%) TeO_3 bileşiminden oluşan cam materyalleri (Jarupreedeedhad ve ark., 2019) için kütlesel zayıflama katsayıları, bu tez çalışmasında S6 kodlu cam örneği referans alınarak kıyaslanmıştır.

İlgili çizelgeden de görüldüğü gibi; bu tez çalışmasına konu olan S6 kodlu cam materyalinin kütlesel zayıflama katsayı değeri 356 keV enerjili fotonlar için literatürdeki diğer çalışmalara göre daha düşüktür. Özellikle %60 oranında kurşun karışımı bulunan Saddeek ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ürettikleri numunenin nerdeyse yarısına tekabül etmektedir. Ama 662 keV enerjili fotonlar için kütlesel zayıflama katsayısı incelendiğinde literatürdeki diğer malzemelere kıyasla zırh olarak kullanılabilme durumu daha olasıdır.

Çizelge 4.12. S6 cam örneğinin kütlesel zayıflama katsayısının (cm^2/g) literatür ile kıyaslanması

	Kütlesel Zayıflama Katsayısı	
Foton Enerjileri (keV)	**356**	**662**
(0.30%) Bi_2O_3 · (0.70%) B_2O_3	0.1485	0.0856
(5%) PbO · (45%) BaO · (50%) B2O3	0.1260	0.0780
(60%) PbO · (35%) SiO_2 · (0.5%) Li_2O (4.3%) B_2O_3 · (0.2%) Dy_2O_3	0.1923	0.0916
(40%) WO_3 · (60%) TeO_3	-	0.0911
Bu tez çalışmasında (S6 numunesi)	**0.0978**	**0.0750**

İleriki çalışmalar açısından düşünüldüğünde; özellikle kütlesel zayıflama katsayılarının değerlendirilmesinde bahsedilen yoğunluk faktörü göz önünde tutulduğunda, bu tez çalışmasına konu olan cam numunelerine yoğunluklarını arttırıcı etki gösterecek ek madde katkıları yapılarak yeni zırh materyalleri oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

AKKURT, I., ALTINDAĞ, R., GÜNOĞLU, K. and SARIKAYA, H., 2012. Photon attenuation coefficients of concrete including marble aggregates. Annals of nuclear energy, 43:56-60.

AKKURT, I., KILINÇARSLAN, S. and BAŞYİĞİT, C., 2004. The photon attenuation coefficients of barite, marble and limra. Annals of Nuclear Energy, 31:577-582.

ALAM, M. N., MİAH, M. M. H., CHOWDHURY, M. I., KAMAL, M., GHOSE, S. and RAHMAN, R., 2001. Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. Applied Radiation and Isotopes, 54:973-976.

AL-BURİAHİ, M. S., ARSLAN, H. and TONGUÇ, B. T., 2019. Mass attenuation coefficients, water and tissue equivalence properties of some tissues by Geant4, XCOM and experimental data, 57:433-437.

ANONİM, 2010. Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği El Kitabı, Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastaneleri, 19:12-27.

ANONİM, 2011. Radyasyondan Korunma, Radyoloji, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 51s.

ARAL, İ., 2019. Alumina ve Zirkonya Esaslı Seramiklerin Nükleer Zırhlanma Kabiliyetlerinin MCNP-X Kodu ile Araştıtılması. Yükesek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim ÇEÇEN Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı, 99s.

ATTİX, F. H. and ROESCH, C., 1968, Fundamentals, Academic Press, New York, 424s.

BASHTER, I. I., 1997. Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes, 24 (17):1389-1401.

BOYES, W., 2003, İnstrumentation Refernce Book, Butterwort-Heinemann, United States of America, 1062s.

CHANSHETTİ, U. B., SHELKE, V. A., JADHAV, S. M., SHANKARWAR, S. G., CHONDHEKAR, T. K., SHANKARWAR, A. G., SUDARSAN, V. and JOGAD, M. S., 2011. Densıty And Molar Volume Studıes Of Phosphate Glasses. Physics, Chemistry and Technology Vol. 9, No:1, 29-36s.

CNSC, 2012. İntroduction to Radiation. Minister of Public Works And Govornmet Services Canada (PWGSC), cc172(93): 6-7.

DAVUTOĞLU, H. 2008. Radon Gazını Ölçme Metotları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya. 62 s.

DONG, M. G., SAYYED, M. I., LAKSHMİNARAYANA, G., ÇELİKBİLEK ERSUNDU, M., ERSUNDU, A. E., NAYAR, P. and MAHDİ, M. A., 2017. Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. Journal of Non-Crystalline Solids, 468:12–16.

ELBASHİR, B. O., SAYYED, M. I., DONG, M. G., ELMAHROUG, Y., LAKSHMİNARAYANA, G. and KİTYK, I. V., 2018. Characterization of Bi_2O_3-ZnO-B_2O_3 and TeO_2-ZnO-CdO-Li_2O-V_2O_5 glass systems for shielding gamma radiation using MCNP5 and Geant4 codes. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 126:112-123.

EL-KHAYATT, A. M., ALİ, A. M. and SİNGH, V. P., 2014. Photon attenuation coefficients of Heavy-Metal Oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: A comparison study. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 735:207–212.

EMİKÖNEL, S., 2015. Barit Kaplanmış Bazı Kumaş Türlerinin Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 71 s.

GERWARD, L., GUİLBERT, N., JENSEN, K.B. and LEVRİNG, H., 2001. X-ray absorption in matter reengineering XCOM. Radiat. Phys. Chem. 60, 23–24.

GERWARD, L., GUİLBERT, N., JENSEN, K.B. and LEVRİNG, H., 2004. WinXCom - a program for calculating X-ray attenuation coefficients. Radiat. Phys. Chem. 71:653-654.

HİNE, G.J. and BROWNELL, G.L., 1956. Radiation Dosimetry. Academic Press, Massachusetts, 946s.

HUBBELL, J.H. and BERGER, M.J., 1968. Sections 4.1 and 4.2 in Jaeger, R.G. (ed.): Engineering Compendium on Radiation Shielding (IAEA, Vienna), Vol. 1, Ch. 4, pp. 167-202, Springer, Berlin.

HUBBELL, J. and BERGER, M., 1987. XCOM: Photon cross sections on a personal computer, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD.

HUBBELL, J.H., 1969. Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV, Natl. Stand. Ref. Data Ser. 29.

ISSA, SHAMS A.M. 2016. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO– B_2O_3 glass system. Radiation Physics and Chemistry, 120:33-37.

JACKSON, D.F. and HAWKES, D.J., 1981. X-Ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures. Phys. Rep., 70:169-233.

JARUPREEDEEPHAD, K., CHAİPHAKSA, W., WİWATKANJANA, P. and KAEWKHAO, J., 2019. Theoretical calculation of mass attenuation coefficient and radiation shielding parameters of WO_3-TeO_3 glasses. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1259, The 5th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics 14–17 December 2018, Siem Reap, Cambodia.

KARATAŞLI, M. ve ÖZER, T., 2018. İş güvenliğinde dozimetreler. İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi, 10 (1): 15-31.

KHANNA, A., BHATTİ, S. S., SİNGH, K. J. and THİND, K. S., 1996. Gamma-ray attenuation coefficients in some heavy metal oxide borate glasses at 662 keV. Nuclear ınstruments and methods in physics research B, 114:217-220.

KOLOS, M. H. and WHİTLOCK, P. A., 2008, Monte Carlo Methods, Wiley-Blackwell, Weinheim, 202s.

KRANE, S.K. 2001. Nükleer Fizik. 1. Cilt. Palme Yayıncılık, Ankara. No: 173. 404 s.

KUMAR, A., 2017. Gamma ray shielding properties of PbO-Li_2O-B_2O_3 glasses. Radiation Physics and Chemistry, 136:50–53.

LAKSHMİNARAYANA, G., ELMAHROUG, Y., KUMAR, A., DONG, M. G., LEE, D.-E., YOON, J. and PARK, T, 2020. TeO2–B2O3–ZnO–La2O3 glasses: γ-ray and neutron attenuation characteristics analysis by WinXCOM

program, MCNP5, Geant4, and Penelope simulation codes. Ceramics İnternational, 46 (10):16620-16635.
MCGERVEY, J. D., 1983, İntroduction to Modern Physics, Academic Press, 768s.
MİLADJENOVİC, M., 1973, Radioisotope and Radiation Physics, Academic Press, New York and London, 254s.
MOZUMDER, A., 1999, Fundamentals of Radiation Chemistry, Academic Press, United of States of America, 392s.
NIST, XCOM Programı. https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html (Erişim tarihi 08.07.2020).
OBAİD, S. S., SAYYED, M. I., GAİKWAD, D. K., TEKİN, H. O., ELMAHROUG, Y. and PAWAR, P. P., 2018. Photon attenuation coefficients of different rock samples using MCNPX, Geant4 simulation codes and experimental results: a comparison study. Radiation Effects and Defects in Solids, 1–15s.
PARKS, J.E., 2015. The Compton Effect-- Compton Scattering and Gamma Ray Spectroscopy. Department of Physics and Astronomy 401 Nielsen Physics Building The University of Tennessee Knoxville, Tennessee, USA, 37s.
PHELPS, M. E., HOFFMAN, E. J. and TER-POGOSSİAN, M. M., 1975. Attenuation Coefficients of various body tissues, fluids, and lesions at photon energies of 18 to 136 keV. Radiology, 117:573-583.
RESMİ GAZETE, (24.03.2000). Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği, Resmî gazete, 23999.
SADDEEK, Y.B., SHAABAN, K.H.S., ELSAMAN, R., EL-TAHER, A. and AMER, T.Z., 2018. Attenuation-density anomalous relationship of lead alkali borosilicate glasses. Radiation Physics and Chemistry, Radiation Physics and Chemistry, 150:182-188.
SHULTİS, J.K. and FAW, R.E., 2010. Radiation Shielding and Radiological Proktection. Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, USA, 1424.
SİEGBAHN, K., 1965, Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy, North Holland, 862s.
SİNGH, K., SİNGH, H., SHARMA, V., NATHURAM, R., KHANNA, A., KUMAR, R., BHATTİ, S. S. and SİNGH S. H., 2002. Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 194(1):1–6.
SİNGH, H., SİNGH, K., GERWARD, L., SİNGH, K., SAHOTA, H. S. and NATHURAM, R., 2003. ZnO-PbO-B_2O_3 glasses as gamma-ray shielding materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 207(3):257–262.
TAEK, 2017. Doğal Radyasyon Kaynakları. http://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyonkaynaklari.html (Erişim tarihi 08.07.2020).
TAYLOR, J. R. and ZAFİRATOS, C. D., 2004, Modern Physics for Scientists and Engineers, Pearson Prentice Hall, 720s.
THİNH, T. P. and LEROUX, J., 1979. New basic empirical expression for computing table of x-ray mass attenuation coefficients. X-ray spectrometty, 8(2), 85-91s.

TOMAL, A., MAZARRO, I., KAKUNO, E. M. and POLETTİ, M. E., 2010.Experimental determination of linear attenuation coefficient of normal, begin and malignant breast tissues. Radiation measurements, 45:1055-1059.

UNSCEAR, 2000. ANNEX B: Sources and effects of ıonizing radiation, Volume 1 Sources, -exposures from natural radiation sources.. New York, USA. 654.

X-5 Monte Carlo Team, 2008. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory, USA, 223s.

YAMAN, D., 2017. Disporsuyum katkılı çinko borat fosforların termolüminesans yöntemi kullanılarak dozimetrik özelliklerin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 72s.

YORULMAZ, N., 2006. Özgül soğurma oranlarının görüntüsel bir vücut modeli yardımıyla monte carlo yöntemi kullanılarak belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 100s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ömer Faruk ÇİÇEK

Uyruğu : Türk

Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa, 07/10/1983

Telefon : 0 (541) 464 78 87

e-mail : ofarukc63@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Şanlıurfa Anadolu Lisesi, Merkez, Şanlıurfa	2002
Üniversite	: Harran Üniversitesi Fizik Bölümü	2010