



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



Yüksek Lisans Tezi

**BİYOAKTİF ÖZELLİKLİ FARKLI AMORF YAPILARIN GAMA
VE NÖTRON ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN MONTE CARLO
METHODU İLE İNCELENMESİ**

Hasipcan AYDIN

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gülfem SÜSOY DOĞAN

II. DANIŞMAN

Doç. Dr. Hüseyin Ozan TEKİN

Aralık, 2019

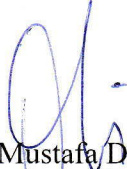
İSTANBUL

Bu çalışma, 20.12.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Nükleer Fizik Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Dr. Öğr. Üyesi Gülfem SÜSOY DOĞAN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Mustafa DEMİR
İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi
Tıp Fakültesi



Doç. Dr. Lidya AMON SUSAM
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışma iyonlaştırıcı radyasyondan korunma açısından önemli bir konu olan iyonlaştırıcı radyasyonun zayıflatılmasına yönelik olarak hazırlanmış ve tez kapsamında konuyla ilgili kapsamlı bilgiler verilmiştir.

Yüksek Lisans tez çalışması boyunca bana bilgi birikiminden yararlanma fırsatı veren, bu alandaki tecrübelerini esirgemeyen, tatlı diliyle motive ve teşvik etmekte hep desteğini hissettiren, çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gülfem SÜSOY DOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Simülasyon programının temininde tanıştığım, daha sonrasında bu konudaki engin bilgilerini benim paylaşarak, tezin seçilmesinde, malzeme ve yöntem seçiminde birikimleriyle desteğini hep hissettiğim, çok değerli eş danışmanım Doç. Dr. Hüseyin Ozan TEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimde tecrübe ve bilgi birikimleriyle her zaman destekleyen başta Prof. Dr. Baki AKKUŞ olmak üzere Doç. Dr. Lidya AMON SUSAM, Araş. Gör. Fatma Çağla ÖZTÜRK'e ve yüksek lisans eğitimim boyunca beraber çalıştığım yüksek lisans ve doktora öğrencisi arkadaşlarım Yusuf Cenk İLTUŞ, Dilara OTU, Güler AĞGEZ, Berk DÜZEN ve Tuğba ÇEPNİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

En önemlisi 30 yaşından sonra bile eğitim esirgenmez diyerek bana bu yolda güvenen canım aile bireylerim babam Şeyhmus AYDIN, annem Aynur AYDIN, kardeşlerim Baran, Vedat ve Barış Civan'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Bu yolda hep yanımda olan çocukluk arkadaşım kan bağı olmayan kardeşim, Yusuf ELGİN'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2019

Hasipcan AYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	7
2.1 RADYASYON NEDİR?	7
2.2 RADYASYON KAYNAKLARI.....	8
2.2.1 Doğal Radyasyon Kaynakları.....	8
2.2.2 Yapay Radyasyon Kaynakları	9
2.3 RADYOAKTİF DÖNÜŞÜM VE ÇEŞİTLERİ.....	10
2.3.1 Alfa Dönüşümü	11
2.3.2 Beta Dönüşümü	12
2.3.3 Gama Yayınlanması	13
2.4 RADYASYON MADDE ETKİLEŞİMLERİ.....	15
2.4.1 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	16
2.4.2 İyonlaştırıcı Radyasyon	16
2.4.3 Yüklü Parçacıkların Madde Etkileşimleri	17
2.4.4 Yüksüz Parçacıkların ve Elektromanyetik Radyasyonun Madde Etkileşimleri.....	19
2.4.4.1 Fotonlar.....	20
2.4.4.2 Nötronlar.....	25
2.5 RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ.....	28
2.6 RADYASYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ.....	29
2.7 RADYASYONDAN KORUNMA PARAMETRELERİ.....	33
2.7.1 Lineer Azaltma Katsayısı (LAK)	34
2.7.2 Kütle Azaltma Katsayısı (KAK).....	35

2.7.3	Yarı Değer Ve Onda Bir Değer Kalınlığı	36
2.7.4	Ortalama Serbest Yol.....	36
2.7.5	Etkin Atom Numarası ve Elektron Yoğunluğu	36
2.7.6	Nötron Azalması ve Soğurulması.....	38
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	40
3.1	BİYOAKTİF ÖZELLİKLİ AMORF CAMLAR.....	40
3.2	MONTE CARLO SİMÜLASYONU	43
3.2.1	MCNP.....	45
3.2.2	WinXCOM ile KAK değerinin hesaplanması	47
3.2.3	LAK, YDK, ODK ve OSY değerlerinin hesaplanması	48
3.2.4	Z_{etkin} ve N_{etkin} değerlerinin hesaplanması	48
3.2.5	Makroskobik Tesir Kesiti	49
4.	BULGULAR.....	50
4.1	TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK KAK DEĞERLERİNİN TAYİNİ	50
4.2	TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK YDK, ODK VE OSY DEĞERLERİNİN TAYİNİ	57
4.3	TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK $Z_{ETKİN}$ VE $N_{ETKİN}$ DEĞERLERİNİN TAYİNİ	63
4.4	TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK GEÇİŞ FAKTÖRLERİNİN MCNP4C PROGRAMIYLA TAYİNİ	68
4.5	TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK MAKROSKOBİK TESİR KESİTİNİN TAYİNİ.....	70
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	72
	KAYNAKLAR.....	77
	ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: 1896'da Wilhelm Röntgen tarafından oluşturulan, eşi Frau Roentgen'in elinin X ışını görüntüsü (Wikizeroo, Wikizeroo X-Işını, 2008).....	3
Şekil 2.1: Dünya Geneline Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Alınan Dozların Oranları (TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Bilgi Köşesi, 2017).	7
Şekil 2.2: Dünya Geneline Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri (TAEK, 2017b).	8
Şekil 2.3: Dünya Geneline Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozları ve Oransal Değerleri (TAEK, 2017c).	10
Şekil 2.4: Alfa dönüşümü.	11
Şekil 2.5: Negatron dönüşümü (Wikizeroo, 2019).	12
Şekil 2.6: Elektromanyetik Spektrum (Wikizeroo, Wikizeroo Elektromanyetik Spekturum Sayfası, 2008).	14
Şekil 2.7: Gama Dönüşümü.	15
Şekil 2.8: İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitlerinin Madde İçerisinde Nüfuz Etme ve İyonlaştırma İlişkisi.	17
Şekil 2.9: Bremsstrahlung Radyasyonu.	19
Şekil 2.10: Foton Enerjine göre Madde Etkileşimlerinde Baskın Etkileşim Grafiği.	21
Şekil 2.11: Fotoelektrik Etki.	22
Şekil 2.12: Compton Etkileşimi.	23
Şekil 2.13: Çift Oluşum.	24
Şekil 2.14: Nötronun bir çekirdekten esnek saçılması.	26
Şekil 2.15: Nötronun bir çekirdekten esnek olmayan saçılması.	26
Şekil 2.16: Nötron Yakalama.	27
Şekil 2.17: Fisyon Reaksiyonu.	28
Şekil 3.1: Örnek bir Monte Carlo Simülasyonu Modeli.	45
Şekil 3.2: MCNP4C 2D Ekran Görüntüsü.	46

Şekil 3.3: MCNP4C 3D Ekran Görüntüsü.	47
Şekil 3.4: WinXCOM programının anayüzü.	48
Şekil 4.1: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri	54
Şekil 4.2: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri	55
Şekil 4.3: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri	55
Şekil 4.4: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri	57
Şekil 4.5: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri	58
Şekil 4.6: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri	58
Şekil 4.7: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri	59
Şekil 4.8: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri	59
Şekil 4.9: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri	60
Şekil 4.10: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri.....	60
Şekil 4.11: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri.....	61
Şekil 4.12: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri.....	61
Şekil 4.13: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri.....	64
Şekil 4.14: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri.....	64
Şekil 4.15: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri.....	65
Şekil 4.16: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri.....	65

Şekil 4.17: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri.....	66
Şekil 4.18: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri.....	66
Şekil 4.19: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri	68
Şekil 4.20: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri	69
Şekil 4.21: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri	69
Şekil 4.22: Tüm cam örneklerine karşılık makroskopik tesir kesitleri.	71

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1: İyonlaştırıcı parçacık ve elektromanyetik dalga çeşitlerinin karşılaştırılması (Akyıldırım, 2011).....	16
Tablo 2: İlk Biyoaktif Cam Yapı 45S5'nin molar kesiti dağılımı	40
Tablo 3: BGXB Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları	42
Tablo 4: SRY Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları	43
Tablo 5: FPGZ Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları	43
Tablo 6: BGXB grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri.....	51
Tablo 7: SRY grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri.	52
Tablo 8: FPGZ grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri	53

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
α	: Alfa çekirdeği
β^-	: Negatron Parçacığı
β^+	: Pozitron Parçacığı
γ	: Gama ışını
n	: Nötron Parçacığı
ν	: Nötrino
μ	: Lineer Azaltma Katsayısı
μ_m	: Kütle Azaltma Katsayısı
ρ	: Yoğunluk
τ	: Fotoelektrik olay kısmi zayıflatma katsayısı
σ	: Compton saçılması kısmi zayıflatma katsayısı
κ	: Çift oluşumu olayı kısmi zayıflatma katsayısı
N_A	: Avagadro Sayısı
c	: Işık hızı
h	: Planck sabiti
I_0	: Kaynaktan gelen radyasyon şiddeti
I	: Engel tarafından zayıflatılmış radyasyon şiddeti

Kısaltmalar	Açıklama
AB	: Avrupa Birliği
ALARA	: As Low As Reasonably Achievable
ÇNAEM	: Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
eV	: Elektronvolt
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu
KAK	: Kütle Azaltma Katsayısı
LAK	: Lineer Azaltma Katsayısı
MCNP	: Monte Carlo N Particle
MeV	: Mega Elektronvolt
Netkin	: Etkin Elektron Yoğunluğu
ODK	: Ondabir Kalınlık Değeri
OSY	: Ortalama Serbest Yol
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances

SSCB	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyeti Birliği
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
Sv	: Sievert
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atom Radyasyonunun Etkilerine İlişkin Bilimsel Komite
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
YDK	: Yarı Değer Kalınlık Değerı
Zetkin	: Etkin Atom Numarası



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOAKTİF ÖZELLİKLİ FARKLI AMORF YAPILARIN GAMA ve NÖTRON ZAYIFLATMA ÖZELLİKLERİNİN MONTE CARLO METHODU ile İNCELENMESİ

Hasipcan AYDIN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Gülfem SÜSOY DOĞAN

II. Danışman : Doç. Dr. Hüseyin Ozan TEKİN

Bu tez çalışmasında farklı kimyasal bileşenlere sahip biyoaktif amorf malzemelerin gama ve nötron zayıflatma özellikleri incelenecektir. Gama zayıflatma parametrelerinden; Lineer zayıflatma katsayısı (μ), Kütle zayıflatma katsayısı (μ/ρ), Yarı değer kalınlığı (YDK), Onda bir değer kalınlığı (ODK), Ortalama serbest yol (OSY) ve Etkin atom numarası (Zetkin), Nötron zayıflatma parametresi ΣR ve Gama geçiş faktörü MCNP4C Monte Carlo koduyla incelenecektir. Cam malzemelerle yapılan çalışmalar biyoaktif amorf cam sistemlerinde radyasyonun zararlı etkilerini zayıflatmada ve yok etmekte kullanılabilecek yapılar olduğunu göstermektedir.

Aralık 2019, 97 sayfa.

Anahtar kelimeler: Radyasyon, Radyasyondan Korunma ve Azaltma, MCNP, WinXCOM, Biyoaktif Amorf

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF GAMMA AND NEUTRON ATTENUATION PROPERTIES OF DIFFERENT AMORPHOUS STRUCTURES WITH BIOACTIVE PROPERTIES BY MONTE CARLO METHOD

Hasipcan AYDIN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Gulfem SUSOY DOGAN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Huseyin Ozan TEKIN

In this thesis, gamma and neutron attenuation properties of bioactive amorphous materials with different chemical components will be examined. Gamma attenuation parameters; Linear attenuation coefficient (LAC), Mass attenuation coefficient (MAC), Half value layer (HVL), Tenth value layer (TVL), Mean free path (mfp) and Effective atomic number (Z_{eff}) and Neutron attenuation parameter; ΣR and Gamma transmission factors will be examined with MCNP4C Monte Carlo code. Studies with glass materials show that bioactive amorphous glass systems can be used to attenuation and eliminate the harmful effects of radiation.

December 2019, 97 pages.

Keywords: Radiation, Radiation Protection and Attenuation, MCNP, WinXCOM, Bioactive Amorf

1. GİRİŞ

Radyasyon, fiziğin iki önemli alanı olan atom fiziği ve nükleer fizik ile ilgilidir. 19. Yüzyılın sonlarından başlayarak özellikle ilk 50 yıl yapılan atom fiziği ve nükleer fizikteki keşifler ile temellendirilmiştir. Devamında da günümüze kadarki süreçte gelişmiş ve gelecekte de gelişimine devam edecektir.

Basit manada radyasyon hareket halindeki enerjidir. Daha gelişmiş bir tanımlaması; Einstein'ın özel görelilik teorisinde açıkladığı, atom sistemlerinde maddenin kütlesinin yani parçacıkların kütlesinin enerji dönüşümü sürecinde açığa çıkan ürüne “radyasyon” denir. Bu ürünler, parçacık ya da elektromanyetik enerji formunda yayınlanır. Temel atomun da yapı taşı olan parçacıklar proton, nötron ve elektrondur (Martin, 2013). Doğada bilinen dört temel kuvvetin büyüklük sıralaması aşağıda gösterilmiştir.

- Kütleler arası, çekici kuvvet, kütle çekim (gravitasyon) kuvveti = G
- Radyoaktif dönüşümleri etkileyen, zayıf kuvvet = $10^{24} G$
- Elektrik yükleri arasındaki, elektromanyetik kuvvet = $10^{37} G$
- Sadece çekirdek arasında var olan güçlü çekici, nükleer kuvvet = $10^{39} G$

Bu dört kuvvetin etkisinde atomlar birbirilerine bağlı sistemlerdir. Yani, protonlar ve nötronlar bir arada çekirdeği, elektronlar da çekirdeğin etrafındaki yörüngelere bağlı olarak dolanarak atomu oluştururlar. Proton ve nötron sayılarına göre her oluşum farklı bir elementi ve elementin izotopunu temsil eder. ^1H atomu bu durum için istisnadır. Nötron içermeyen en temel atom bir proton ve bir elektrondan meydana gelen Hidrojen atomudur. Bir proton, bir nötron ve bir elektrondan meydana gelen Döteryum, Hidrojen atomunun bir izotopudur. Atomdaki parçacıklar mümkün olan en düşük potansiyel enerji seviyesinde kararlı yapıda bulunurlar. Fazla enerjileri varsa kararsızdırlar ve radyoaktiftirler.

Proton; ilk olarak 1815 yılında William Prout tarafından atomların *protyles* olarak adlandırıldığı hidrojen atomlarından oluştuğunu öne sürmesiyle ortaya çıktı. Yaklaşık 100 sene sonra 1911 yılında Ernest Rutherford'un, atom çekirdeğini keşfetmesi ve 1917-1919 yılları arasında azot (^{14}N) gazı çalışmalarında azot gazının alfa parçacığıyla çarpıştırmada oksijen (^{17}O) ve bir hidrojen atomunun açığa çıktığını gözlemlemesiyle en küçük atom olarak hidrojen atomunu

1920 yılında “proton” olarak adlandırdı. Protonun keşfi atom altı parçacık kavramının da başlangıcı oldu. Proton bir atom altı parçacıktır. P veya p^+ şeklinde gösterilir. +1 elektrik yüküne ve 1.6021×10^{-19} C yüküne sahiptir. $1,6726 \times 10^{-27}$ kg veya 938,272 MeV/c² kütlesi vardır. Ortalama bozunma süresi $2,1 \times 10^{29}$ yıl olan proton parçacığı 0,8414 fm yarıçapa sahiptir. Atom ve parçacık fiziğinde yapılan çalışmalar protonların kuarklardan meydana geldiğini gösterdi. Baryon sınıfında, fermiyon istatistiğine göre sınıflanan proton parçacığı 2 üst (u) ve 1 alt (d) kuark içermektedir ve ½ spine sahiptir (Britannica, 2019).

Nötron; 1932 yılında James Chadwick tarafından keşfedilen nötron parçacığı, keşfinden 10 yıl önce E. Rutherford tarafından öngörülmüştü. Nötron da bir diğer atom altı parçacıktır. N veya n^0 şeklinde gösterilir. Elektrik yükü olmayan nötron parçacığı, $(-2 \pm 8) \times 10^{-22}$ e deneysel limit elektrik yüküne sahiptir. $1,6749 \times 10^{-27}$ kg veya 939,5654 MeV/c² kütleyle sahip nötron parçacığı, proton parçacığından ufak bir miktar ağırdır. Ortalama bozunma süresi 881,5 sn yaklaşık 15 dakikadır. Proton parçacığı gibi nötronlar da kuarklardan meydana gelmiştir. Baryon sınıfında, fermiyon istatistiğine göre sınıflanan nötron parçacığı 1 üst (u) ve 2 alt (d) kuarka ve ½ spine sahiptir (Martin, 2013) (Byrne, 2011).

Elektron; 1838 yılında Richard Laming tarafından atomların kimyasal özelliklerini açıklamak için elektron yükünün bölünemez bir özelliğinin kavramını hipotezleştirdi. Johnstone Stoney 1891 yılında bu yüke elektron adını verdi. J. J. Thomson ve ekibi ise 1897 yılında onu parçacık olarak tanımladı. Elektron ilk keşfedilen atom altı parçacıktır. e^- veya β^- sembolleri ile gösterilir. -1 elektrik yüküne ve $-1,6021 \times 10^{-19}$ C yüküne sahiptir. $9,1093 \times 10^{-31}$ kg veya 0,510 MeV/c² kütleyle sahip elektron parçacığının ortalama bozunma süresi $6,6 \times 10^{28}$ yıldan daha fazladır. 2,8179 fm yarıçapa sahiptir. Temel parçacık olan elektronlar leptonlar sınıfında ½ spine sahip fermiyon istatistiğine sahiptir (Martin, 2013) (Raith & Mulvey, 2001).

Maxwell’in elektrik alanının sebebinin manyetik alan ve manyetik alanının sebebinin elektrik alan olduğunu anlaması ve ışığın elektromanyetik olduğunu göstermesiyle bu alanda çalışmalar arttı. Bu ışığa bugün foton olarak adlandırıyoruz. Foton veya kuantum hipotezi, kara cisim ışımasının açıklanması için keşfedilmiştir, fakat elektromanyetik ışımaların tamamını kapsamaktadır. Maxwell’in çalışmaları bu alanda yapılan çalışmaları arttırdı. 1895 yılının kasım ayında Alman Fizikçi Willhelm Conrad Roentgen içi gazla dolu yüksek vakumlu katot ışını tüpleri, çinko sülfid ve baryum-platinosiyenür gibi fotoğraf plakları ve potansiyel uygulandığında ışıma yayan fosforlar aracılığıyla daha önce doğası bilinmemesi sebebiyle x-ışınları diye adlandırdığı x-

ışınını keşfetti (Raith & Mulvey, 2001). Sadece birkaç gün içinde x-ışınlarının en önemli özelliğini tanımladı. X-ışınları yoğun maddelerin içerisinden geçebiliyordu ve nesnenin görüntüsü fotoğraf plakalarının üzerinde oluşabiliyordu. Şekil 1.1’de Röntgen’in eşi Frau Röntgen’in elinin meşhur fotoğrafıdır. Roentgen aynı zamanda x-ışınlarının içinden geçtiği gazı iyonlaştırabildiğini, kırınım, yansıma ve girişim de yapabileceğini keşfetti.



Şekil 1.1: 1896’da Wilhelm Röntgen tarafından oluşturulan, eşi Frau Roentgen’in elinin X ışını görüntüsü (Wikizeroo, Wikizeroo X-Işını, 2008).

X-ışınının keşfi radyasyon farkındalık çağının da başlamasıydı. Bir sene sonra 1896 yılında Becquerel, x-ışınlarının floresans ya da fosforenansdan kaynaklanabileceğini düşündüğü için sıkıca sarılmış fotoğraf plakalarının üzerine bir potasyum uranil sülfat tuzu döktü ve yüklenmiş floresansın Roentgen’in x-ışınlarını içerip içermediğini gözlemlemek için güneş ışınlarına maruz bıraktı. Plaka kaldırıldığında kristalin ana hatları açıkça gözlenebiliyordu. Becquerel bunun yüklenmiş floresanstan kaynaklandığını düşündü ve deneyini tekrarlamak için başka tuzlar içeren birkaç plak daha hazırladı. Fakat, hava kapalı olduğundan uranyum kristallerinin bağlı olduğu plakalar çekmecede kaldı. Kristaller güneş ışığına maruz kalmadıkları halde plakalar merakı sebebiyle Becquerel tarafından banyo ettirildi ve plakalar üzerindeki kristallerin ana ürünlerine benzediğini fark etti. Becquerel, plakaları etkileyen şeyin, ki daha

sonra radyasyon olarak anılacak uranyum tuzundan ve kendiliğinden meydana geldiğine karar verdi (Martin, 2013). Bu karar aktivitenin keşfiydi. Radyoaktivite kavramı fiziğin artık en önemli kavramlarından biriydi. Aynı sene M. Curie ve eşi toryum atomları için aynı durumu dış etkenlerden bağımsız olarak radyoaktif olduklarını gözlemledi. 1899 yılında Rutherford uranyum atomundaki ışımların alfa(α) ve beta(β^-) parçacıkları olduğunu gözlemledi ve radyoaktivitenin atom altı bir süreç olduğunu iddia etti. 1900 yılında Paul Ulrich Villard radyoaktif atomların gama(γ) ışınlarını da yayınladığını gösterdi. Klasik fiziğin temel ilkeleri bir yere kadar fizikteki yeni keşiflerin tanımlamasını yapmaya yetti. Fakat, en başta fotonun parçacık ve dalga ikilemi fizikte yeni bir çağın miladı oldu. Modern ve kuantum fiziğinin temelleri de bu ve bunlar gibi keşiflere dayanır.

Atom ve nükleer fizikte ki tüm bu keşifler ve keşiflere bağlı icatlar, radyasyon kavramının günlük hayatımızda daha fazla bir yer edinmesine yol açtı. 20. Yüzyılın başına kadar sadece doğal radyasyon yani evrenin başlangıcından beri var olan radyasyon kaynaklarına ek olarak 1930'lu yıllardan itibaren nükleer enerji, nükleer silahlar, radyasyonun tıp ve teknoloji gibi alanlarda kullanılması ve parçacık hızlandırıcı gibi unsurların eklenmesiyle yapay radyasyon kaynakları radyasyon kavramının daha da günlük hayatımızda yer edinmesine sebep oldu. Bu icatlar ve keşiflerle radyasyonun madde etkileşiminde iyonize edici etkisinin keşfi ve canlılar için zararlı etkilerinin gözlenmesi radyasyondan korunma gereksinimini ortaya koymuştur. Radyasyonun zararlı etkileri olduğu, 1895 yılında x-ışınlarını keşfeden Roentgen tarafından hemen fark edilmişti. Fakat radyasyon doz limitleri, zaman sınırlamaları, mesafe ve zırhlama kavramları ancak 1913 yılında etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır (Akkaş, 2015). 1913 yılında, Alman Radyoloji Derneği, x-ışınlarının enerjisini göz önüne almadan 2 mm kurşun malzemenin zırhlama için yeterli olacağını açıklamışlardı (Faw & Kenneth Shultis, 2002).

Genel olarak kurşun zırhlama ve beton malzemelerle yapılan radyasyon zırhlaması kullanılmaktadır ancak kurşunun toksin etkisi, ağır ve üretim zorlukları olması, beton zırhlamanın da sadece yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi, yeni zırhlayıcı malzeme arayışlarına gereksinim duyulmasına sebep olmuştur. Bu sebeple 2004 yılında ilk kez cam malzemeler radyasyon zırhlayıcı malzeme olarak çalışılmış ve literatürde yer almıştır. Cam malzemelerle yapılan çalışmalar biyoaktif amorf cam sistemlerinde radyasyonun zararlı etkilerini azaltmada ve yok etmekte kullanılabilecek yapılar olduğunu göstermektedir.

Radyasyonun zararlı etkisini analiz etmek ve azaltmak amacıyla her yıl birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı optik, ısı, fiziksel ve yapısal açıdan incelenmiş biyoaktif yapılı amorf cam sistemlerinin radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenerek bu camların radyasyon kalkanı olarak kullanım potansiyellerinin değerlendirilmesidir.

Camların, radyasyon zırh malzemesi olarak kullanımı hakkında literatürdeki ilk çalışma 2004 yılında Singh ve diğ. tarafından yapılmıştır. “Bu çalışmada bizmut-borat ve bizmut-kurşun-borat cam sistemlerinin gama radyasyonuna karşı davranışları incelenmiş ve bazı standart radyasyon kalkanı olarak kullanılan betonlar ile kıyaslamaları yapılmıştır” (Singh & ve diğ., 2004). Aynı sene Fukuda ve diğ. tarafından, klinik olarak kullanılan bir X-ışını koruyucusunun ve kurşun camın radyasyona karşı koruyucu etkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır (Fukuda & ve diğ., 2004). 2012 yılında Kaewjaeng ve diğ. $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ cam sistemine BaO katkısının radyasyon özelliklerine etkisini incelemiştir (Kaewjaeng & ve diğ., 2012). Aynı yıl, Tuscharoen ve diğ. BaO, B_2O_3 ve pirinç kabuğu külü içeren cam sisteminin radyasyon özelliklerini incelemiştir (Tuscharoen & ve diğ., 2012). 2013 yılında Chanthima ve diğ. $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O-Bi}_2\text{O}_3$ cam sisteminin radyasyon parametrelerini incelemiştir (Chanthima & Kaewkhao, 2013). 2014 yılında Singh ve diğ. silikat ve borat esaslı ağır metal camların radyasyon özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir (Singh & ve diğ., 2014). 2016 yılında yapılan diğer çalışmalarda, Sarachai ve diğ. $\text{BaO-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ cam sisteminin foton etkileşimi ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemiştir (Sarachai & ve diğ., 2015). Elalaily $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ cam sistemine PbO, BaO, SrO ağır metal oksitlerini ekleyerek bu bileşenlerin camların radyasyon zırhlama özelliklerine etkisini incelemiştir (Elalaily & ve diğ., 2016). Dong ve diğ. $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Li}_2\text{O}$ cam sisteminin radyasyon zırhlama uygulamaları için uygunluğunu araştırmıştır (Dong & ve diğ., 2017). 2018 yılında Allahmoradi ve diğ. $\text{PbO-SiO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ yapılı camların gama zırhlama özelliklerini incelemiştir (Allahmoradi & ve diğ., 2018). Yine aynı yıl Bagheri ve diğ. Bi_2O_3 , PbO, and BaO içeren cam malzemelerin gama zırhlama özelliklerini açıklamamışlardır (Bagheri & ve diğ., 2018). Dogra ve diğ. Yaptıkları çalışmada $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ içeren camların gama zırhlama özelliklerini incelemiştir (Dogra & ve diğ., 2018). Elmahroug ve diğ. $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5\text{-TeO}_2$ içeren cam sistemlerin radyasyon zırhlama özelliklerini MCNP5 kodu kullanarak incelemişleridir (Elmahroug & ve diğ., 2018). Issa ve diğ. $\text{BaO-ZnO-B}_2\text{O}_3$ katkılı cam sistemlerin gama ışınlarını parametrelerini

MCNP5 kodu kullanarak açıklamışlardır (Issa & ve diğ., 2018). Tekin ve diğ. Bizmut ilk katkılanmış boron silika telurit camların foton zırhlama karakterlerini incelememiştir (Tekin & ve diğ., Photon shielding characterizations of bismuth modified borate –silicate–tellurite glasses using MCNPX Monte Carlo code, 2018). 2019 yılında Agar ve diğ. Yaptıkları çalışmada BaO, MoO₃ and P₂O₅ içeren camları MCNP kodu kullanarak zırhlama özelliklerini açıklamışlardır (Agar & ve diğ., 2019). Tekin ve diğ. Boron fosfat içeren cam sistemlerin foton ve nötron zırhlama özelliklerini radyoloji tesisleri için incelemiştir (Tekin & ve diğ., 2019a). Tekin ve diğ. Na₂O-CaO-P₂O₅-SiO₂ biyoactive cam sistemlerin foton ve nötron zırhlama parametrelerinin MCNPX kodu kullanarak incelemiştir (Tekin & ve diğ., 2019b) .

“Radyasyon zırh malzemesi olarak araştırılan camlar dışında endüstride mevcut durumda kullanılan bazı radyasyon zırhlama camları mevcuttur. Bu camlardan bazıları: Schott AG cam firmasının radyasyon zırhı olarak geliştirdiği RS 253, RS 253 G18, RS 323 G19, RS 360 ve RS 520 camlarıdır. Bu camların yanı sıra Corning Inc. firmasının geliştirdiği Med-X Glass, Med-Gamma Glass ve Nuclear Glass Block camları bulunmaktadır” (Akıllı, 2019).

2. GENEL KISIMLAR

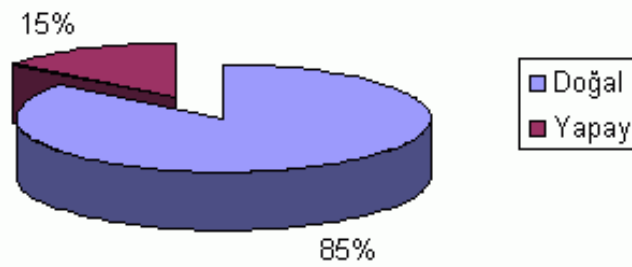
Bu kısımda radyasyon hakkında genel bilgiler verilecektir. Radyasyon nedir, radyasyon kaynakları, radyoaktif dönüşüm ve çeşitleri, radyasyon madde etkileşimleri, radyasyonun biyolojik etkileri, radyasyondan korunma yöntemleri ve radyasyondan korunma parametreleri açıklanacaktır.

2.1 RADYASYON NEDİR?

Evrenin varoluşundan yani enerji-madde dönüşümü “O” an meydana geldikten sonra bilinen evrenin herhangi bir yerindeki tüm canlılar bir radyasyon alanı içerisinde var olmuş ve var olacak, yaşamış, yaşıyor, yaşayacaklardır. Bu radyasyon alanı oluşumuna göre iki şekilde kaynaklanmaktadır.

- 1) Doğal radyasyon kaynağı
- 2) Yapay radyasyon kaynağı

Dünyamızda her bir canlı ortalama olarak yıllık 2,8 mSv yıllık doza maruz kalmaktadır (TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Bilgi Köşesi, 2017). Bu dozun radyasyon kaynağı Şekil 2.1’de verilen doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının dağılımına göre olmaktadır.

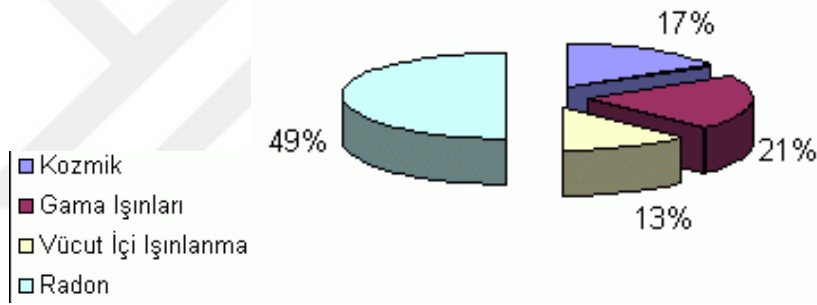


Şekil 2.1: Dünya Geneline Doğal ve Yapay Radyasyon Kaynaklarından Alınan Dozların Oranları (TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Bilgi Köşesi, 2017).

2.2 RADYASYON KAYNAKLARI

2.2.1 Doğal Radyasyon Kaynakları

Evrenin herhangi bir yerinde ve dünyamızda arka alan radyasyonu ve her doğal madde de bir miktar radyoaktif materyal mevcuttur. Bu radyasyonun kaynağı doğal radyasyon olarak tanımlanır. Kozmik ışınlar, uzay kaynaklı, kararsız yapıdaki atomun kararlı hale gelebilme isteğiyle fazla enerjisini yayınlamasıyla meydana gelen yer kabuğu kaynaklı karasal radyasyon ve bu kaynakların dönüşümünden ortaya çıkan diğer kaynaklar doğal radyasyon kaynaklarının sebepleridir. Doğal radyasyon kaynakları yolu ile herhangi bir insanın ortalama yıllık alacağı doz miktarı 2,4 mSv civarındadır (TAEK, 2017b). Şekil 2.2’de doğal radyasyon kaynaklı alınan dozu yüzdesel olarak sebep dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.2: Dünya Genelinde Doğal Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozlarının Oransal Değerleri (TAEK, 2017b).

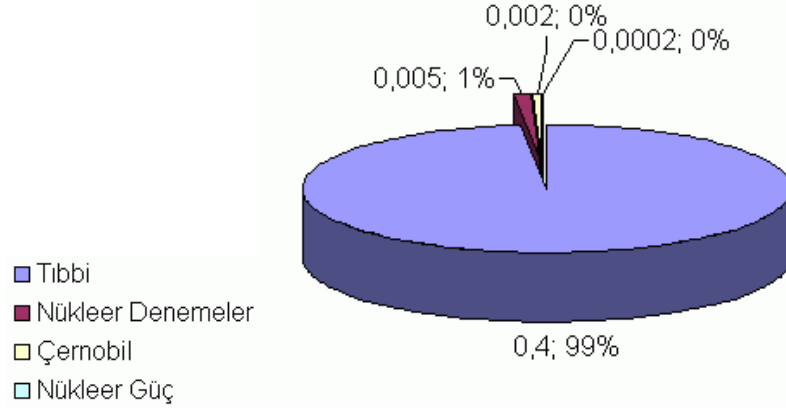
Kozmik ışınlar, dünyamız özellikle güneş kaynaklı yüksek enerjili parçacıklara ve elektromanyetik ışımalara maruz kalmaktadır. Bu yüksek enerjili parçacıkların büyük çoğunluğu pozitif yüklü proton parçacıklarıdır. Dünya'nın atmosferine ulaşan protonlar elektrik yüklerinden dolayı dünyanın çekirdeğinden kaynaklı manyetik alanın etkisiyle büyük bir kısmı tutulur. Yani kısmi olarak zırhlanırlar. UNSCEAR (Birleşmiş Milletler Atom Radyasyonunun Etkilerine İlişkin Bilimsel Komite) tarafından 2017 yılındaki açıklamaya göre kozmik ışınlardan kaynaklı herhangi bir kişinin yıllık ortalama etkin doz miktarı 0,4 mSv civarındadır (TAEK, 2017b). Sievert, canlı dokunun maruz kaldığı radyasyonun etkisini gösteren "doz eşdeğeri"nin SI sistemindeki birimidir.

Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon vücut içi ve vücut dışı olarak incelenmektedir. Vücut içi maruz kalma, yeryüzünde doğal olarak bulunan radyoaktif izotopların solunum yolu veya gıda

yoluyla alınması kaynaklıdır. Vücut dışı maruz kalma, yeryüzündeki radyoizotopların yaydığı gama ışınları kaynaklıdır. Tüm vücudumuz bu dış kaynaklı doğal radyasyona maruz kalır. Genellikle yapı ve teknoloji malzemeleri kaynaklıdır. Yeryüzü kaynaklı doğal radyasyon kaynaklı bir kişinin yıllık ortalama etkin doz miktarı 0,48 ile 0,5 mSv aralığındadır (TAEK, 2017b). Vücudumuz yapısı gereği evreni yansıtmaktadır. Vücudumuzda radyoaktif elementler içerir. Bu sebeple vücudumuzun kendisi de doğal radyasyon kaynağıdır ve vücudumuz kaynaklı bir miktar doza maruz kalırız. Radon en fazla doğal radyasyon kaynağıdır. Kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun dönüşümü sonucu gaz olarak yeryüzüne ulaşır. Solunum yoluyla vücuda alındığında solun yolu boyunca organlara yapışarak ışıma yapar. 19. Yüzyılda başlayan doğal radyasyon kaynaklarındaki keşifler bu sürecin insanlar tarafından taklit edilip insanlığın yararına kullanılması amacıyla yerini icatlara bıraktı. Bu icatlar yapay radyasyon kavramını ortaya çıkardı. Doğal radyasyon kaynakları, radyasyonun zararlı etkilerinin anlaşılmasında her ne kadar farkındalık yaratmış olsa da radyasyonun zararlı etkileri yapay radyasyon kaynaklarında daha fazla gözlemlendi.

2.2.2 Yapay Radyasyon Kaynakları

Yapay radyasyon kaynakları, doğal radyasyon kaynaklarındaki yapılan keşiflerin insanlık daha geniş tabiriyle canlılık yararına kullanılabileceği şiarıyla başta bilim, enerji ve sağlık olmak üzere gıda, askeri, güvenlik v.b. alanlarda yapılan yatırımlarla yapay radyasyon kaynakları icat edildi. Yapay radyasyon kaynakları yoluyla ile her bir insanın ortalama alabileceği doz miktarı 0,4 mSv civarındadır (TAEK, 2017c). Şekil 2.3’de yapay radyasyon kaynaklı alınan dozu yüzdesel olarak sebep dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.3: Dünya Genelinde Yapay Radyasyon Kaynaklarından Maruz Kalınan Radyasyon Dozları ve Oransal Değerleri (TAEK, 2017c).

Yapay radyasyona sebep olan icatlar, nükleer güç santralleri, ^{235}U atomunun termal nötron ile bombardıman edilmesiyle uranyum atomun daha küçük atomlara bölünmesi yani fisyon yapmasıyla, daha küçük atomlara ek olarak açığa çıkan ısı enerjisinin buhar yoluyla türbinleri döndürmesi yoluyla elektrik enerjisi üretmesini amaçlamaktadır. 1986 yılında SSCB’de meydana gelen Çernobil kazası ve nükleer silah denemeleri yapay radyasyon kaynaklarına nükleer serpinin de eklenmesine sebep oldu. Sağlık alanında, başta tıbbi görüntüleme, radyoloji, nükleer tıp ve radyoterapi başlıca yapay radyasyon kaynaklarının icat edildiği ve kullanıldığı alanlardır. Bunlara ek olarak endüstriyel uygulamalar ve tüketici ürünleri de eklenebilir. Tüm bu icatlar radyasyon ile ilişkimizi daha yakın ve daha çok zaman geçirmemize sebep oldu. Radyasyonun yararlı etkilerinin yanı sıra zararlı etkileri de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) başta olmak üzere tüm bilimsel alanlar tarafından dikkate alınması ve önemle çalışılması gereken bir alan olduğunu gösterdi.

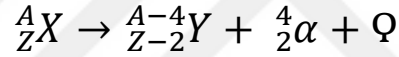
2.3 RADYOAKTİF DÖNÜŞÜM VE ÇEŞİTLERİ

Rutherford radyoaktif dönüşümü bir elementin başka bir elemente dönüşümü olarak kabul etmişti. Radyoaktif bozunma olarak da kullanımı yaygındır. Fakat bozunma kelimesi işlemin ortadan kalkmasını tanımlar, gerçekte ise, fazla enerjisi olan yani kararsız bir atomun kararlı hale gelebilmek için kendisini başka bir atoma dönüştürmesidir. Böylece ya kararlı bir duruma ya da kararlılığını sürdürebilmek için daha uygun bir duruma geçer (Martin, 2013).

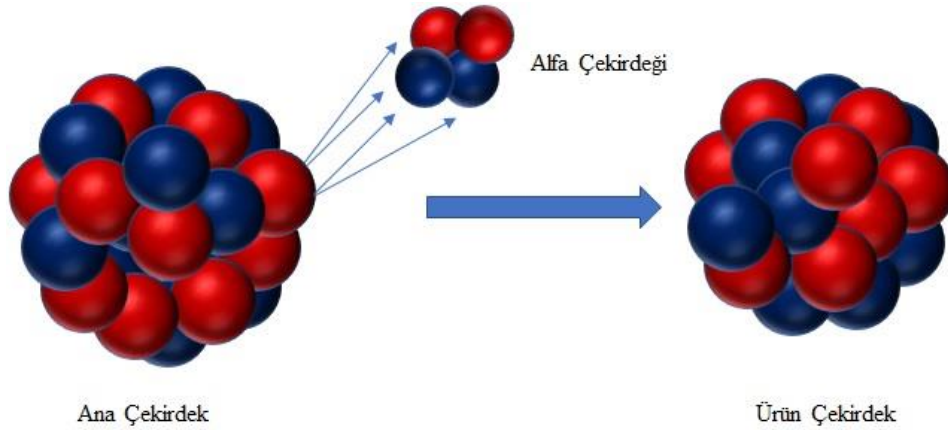
Atom çekirdekleri, yapı taşları olabildiğince en küçük potansiyel enerji durumunda bulunmadıklarında radyoaktif dönüşüme uğrarlar; sonuç olarak, çekirdek yeni bir yapıya bu fazla enerjinin yayılmasıyla meydana gelir. Çekirdek yeni element veya aynı çekirdeğin izotopuna dönüşür. Çekirdeğin dönüşümü, alfa çekirdeği, proton parçacığı, beta parçacıklarının yoluyla parçacık ve x-ışını ve gama ışımasıyla elektromanyetik ışıma şeklinde yayınlanmasıyla oluşabilir.

2.3.1 Alfa Dönüşümü

İki proton ve iki nötrondan meydana gelen alfa (α) parçacığı, elektronlarından arınmış bir helyum çekirdeğidir. Göreceli olarak pozitif yüklü alfa parçacığı nükleer ölçekte büyük bir parçacıktır. Bu sebeple alfa yayınlayan bir çekirdeğin kütlelerinin büyük olması gerekir. Alfa parçacığı uranyum, polonyum ve radyum gibi ağır radyoaktif elementlerin dönüşümünde yayınlanır. Yayınlanan alfa parçacığı tek enerjilidir. Enerjisi kütlesi oranında yüksektir. Alfa dönüşümü süresiz dönüşümdür. Yani enerjisini tek seferde yayınlar.



Alfa dönüşümünde çekirdek iki nötron ve iki proton kaybeder. Alfa dönüşümü sonrasında atom numarası iki, kütle numarası 4 azalır (Nolan, 2014). Şekil 2.4’de alfa dönüşümü gösterilmiştir.

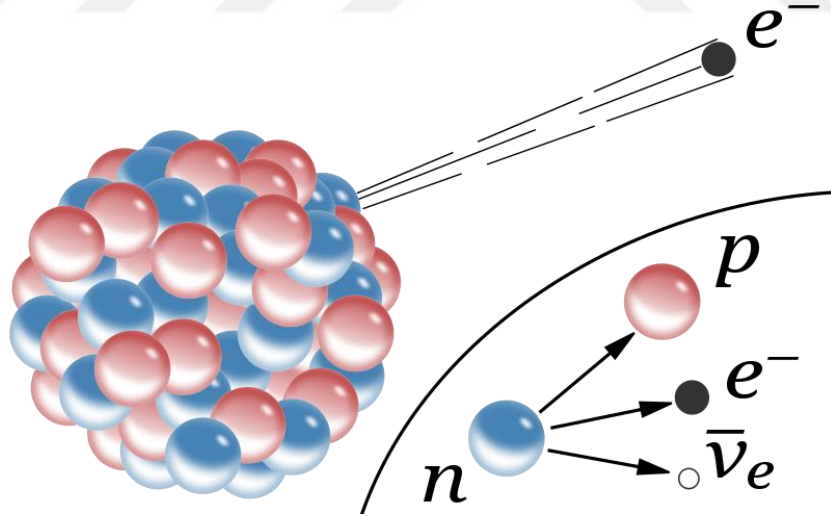
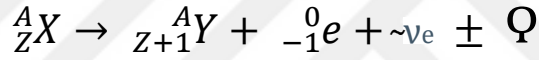


Şekil 2.4: Alfa dönüşümü.

2.3.2 Beta Dönüşümü

Beta dönüşümü kararsız durumdaki atomun negatif yüklü elektron olarak negatron ve pozitif yüklü elektron olarak pozitron yayınlamasıyla gerçekleşir.

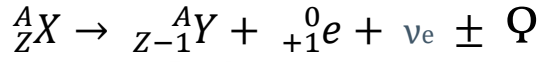
Negatron; Nötron zengini kararsız çekirdeklerin kararlı duruma gelebilmesi için nötron sayılarını azaltmaları gerekmektedir. Bunun gerçekleşmesi çekirdekte bir negatif yükün azalmasıyla mümkündür. Nötron zengini çekirdeklerin fazla nötron sebebiyle sahip oldukları fazla enerjiyi yani kütleyi negatif yüklü bir elektron parçacığı yayınlamasıyla beta dönüşümü gerçekleşir. Negatif yüklü parçacığın bir diğer adı negatrondur. Negatif yüklü beta dönüşümü çekirdekte yük artışına, çekirdeğin kütlesinin yani enerjisinin bir miktar azalmasına ve bir nötron parçacığının bir proton parçacığına dönüşmesine sebep olur. Yeni çekirdek yanında bir negatron ve antinötrino yüksek bir enerjiyle yayınlanır. Şekil 2.5’de negatron dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Negatron dönüşümü (Wikizeroo, 2019).

Negatron ve antinötrino arasındaki enerji paylaşımı rastgele olduğundan, elektronlar farklı kinetik enerjilere sahip olmaktadır. Negatron dönüşümü sürekli bir dönüşümdür. Yani dönüşümün bir maksimum enerji değerinde yayınlandığını gösterir. Bu enerji geri tepme enerjisidir ve negatron ile antinötrino arasında paylaşılır.

Pozitron; Bir proton parçacığının kütlesi, bir nötron parçacığı ve bir elektron parçacığının toplam kütesinden azdır. Bu sebeple, bir proton parçacığı bir pozitron ve nötron parçacığı üretecek yeterli kütleyle yani enerjiye sahip değildir. Pozitron dönüşümü çekirdek içinde toplam bir değişimdir. Proton ve nötron parçacıklarının daha zayıf bağlı olmak için kendilerini tekrar düzenlemeleridir. Bu sayede çekirdek bir protonunu bir nötron parçacığına dönüşümü ve bir pozitif elektron yani pozitron yayınlayacak enerjiye sahip olur. Pozitron yayınlanmasında, bir proton parçacığı bir nötron parçacığına dönüşür, bir pozitron ve elektron nötrino yayınlanmasıyla çekirdek dönüşümü tamamlanır (Chandra, 2004).



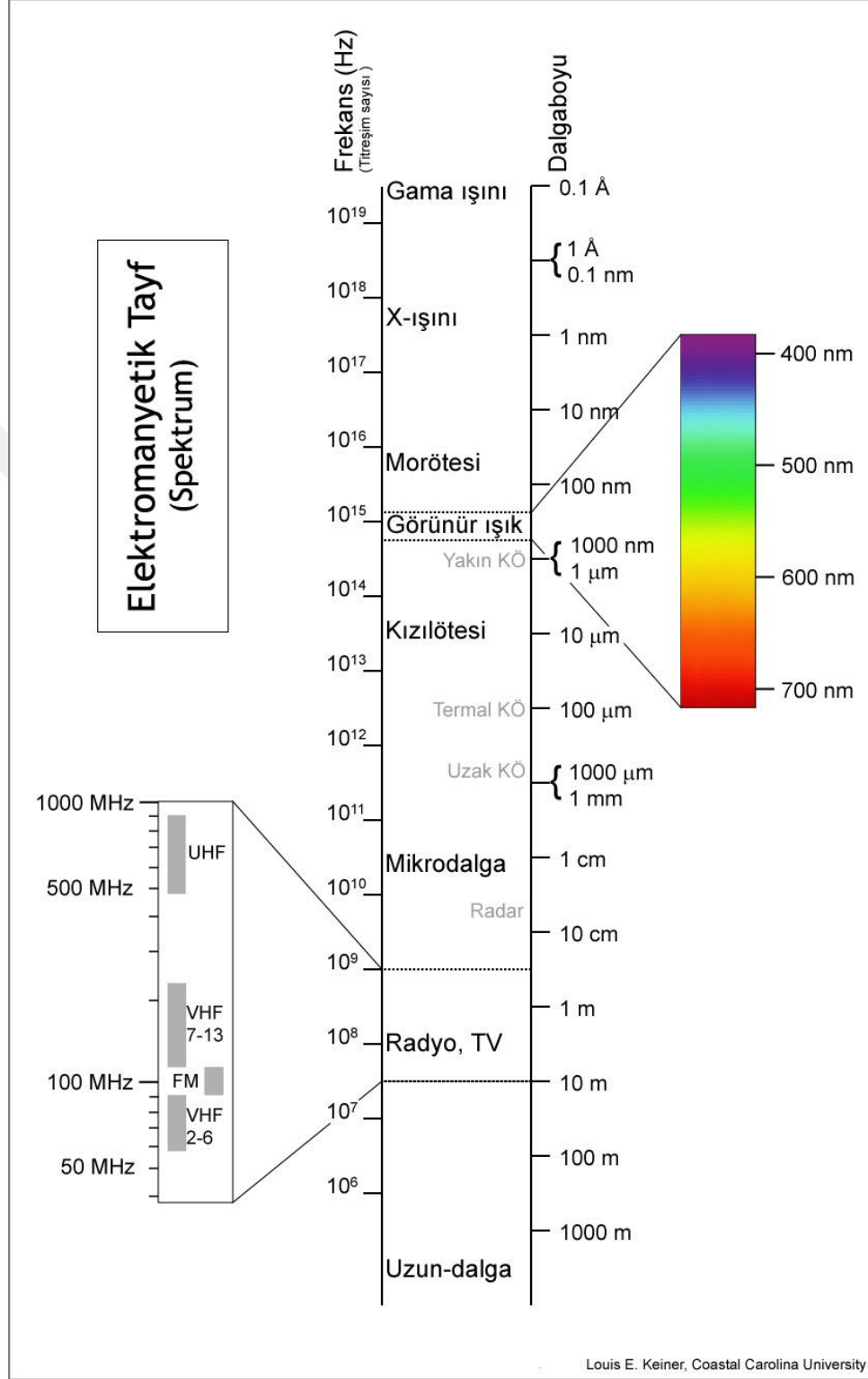
2.3.3 Gama Yayınlanması

Radyoaktif dönüşüm, nötronların ve protonların sık bağlı olmadığı uyarılmış bir çekirdeğin dönüşümü sonucu oluşan rastgele bir işlemdir. Bu uyarılmış çekirdeği oluşturan parçacıklar en düşük enerji durumunda bulunacak şekilde tekrar düzenlendiğinde elektromanyetik ışıma yani radyasyon yayarlar.

Elektromanyetik radyasyon; Kuantum fiziğinin de temelini oluşturan elektromanyetik radyasyon teorisi 19. Yüzyıl sonunda Stefan ve Boltzmann'ın birbirilerinden bağımsız olarak sıcaklık ve dalga boyu arasındaki ilişkiyi açıklamak için deneysel olarak yaptıkları çalışmada, ısıtılan bir cisimden yayınlanan radyasyon enerjisinin şiddeti ve sıcaklığıyla ilişkilidir, diye tanımlamalarıyla başladı. Kara cisim ışıması olarak da tanımlanır. Kara cisim ışımasının en büyük kazanımı foton hipotezi oldu. Foton, elektromanyetik radyasyon sonucunda yayınlanır. Ve tüm elektromanyetik ışımaları kapsar. Bir frekans veya dalga boyuna sahip olan foton, ışık hızında hareket eder. Boşlukta, belirli bir dalga boyundaki (λ) elektromanyetik enerjinin bu dalga boyu ile orantılı bir frekansı (μ) ve foton enerjisi (E) bulunmaktadır. Bu yüzden elektromanyetik tayf bu üç değerden herhangi biri kullanılarak ifade edilebilir. Elektromanyetik radyasyonun enerji, frekans ve dalga boyu arasındaki ilişki denklem (2.1)'de verilmiştir. Ve tüm elektromanyetik radyasyon çeşitleri şekil 2.6'daki gibi sıralanır. Hertz, düşük frekanslı radyo dalgalarının elektromanyetik spektrumun düşük enerjili bölgesinde, Roentgen x-ışınlarını spektrumun yüksek enerjili bölgesinde olduğunu göstermiştir.

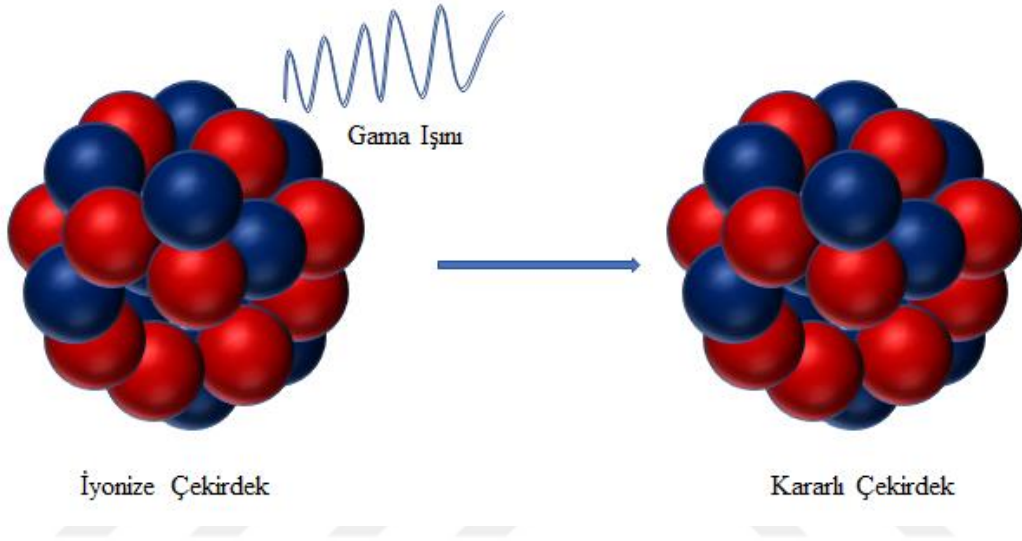
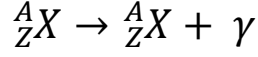
$$E = h\mu ; E = \frac{hc}{\lambda} ; c = \mu\lambda' \text{ dir.} \quad (2.1)$$

c, ışık hızı 299.792.458 m/s ve h, Planck sabiti $6,62606957(29) \times 10^{-34}$ J.s'dır (Martin, 2013).



Şekil 2.6: Elektromanyetik Spektrum (Wikizeroo, Wikizeroo Elektromanyetik Spekturum Sayfası, 2008).

Gama ışınları; Gama yayınlanması daha önce bahsettiğimiz alfa, negatron ve pozitron dönüşümlerinden sonra meydana gelebilir. Gama ışınları uyarılmış çekirdeğin fazla enerjisini yayınlanmasında açığa çıkar. Yani gama yayınlayan atom hala aynı atomdur. Bu geçişler 10^{-9} s veya daha az zamanda meydana gelir. Şekil 2.7’de gama dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Gama Dönüşümü.

Gama ışınlarının alfa ve beta parçacıklarına göre madde içi geçiş kabiliyetleri çok daha fazladır. Buna nazaran madde etkileşimlerinde iyonlaştırma kabiliyetleri çok daha azdır. Gama ışınları yüksüzdür. Elektrik ve manyetik alanın Coulomb kuvvetinden etkilenmez.

2.4 RADYASYON MADDE ETKİLEŞİMLERİ

Radyasyon, çeşidi önemli olmaksızın yayıldığı ortama enerji aktararak çeşitli etkileşimlere sebep olur. Tüm radyasyon çeşitleri madde ile etkileşir. Fakat her radyasyon madde ile etkileşiminde aynı etkiyi yapmaz. Radyasyon, etkileşimlerine göre iki başlıkta toplanır;

- İyonlaştırıcı olmayan radyasyon
- İyonlaştırıcı radyasyon

2.4.1 İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Radyasyon-Madde etkileşimlerinde maddeyi iyonize edici yeterli enerjiye sahip olmayan radyasyon çeşididir. Elektromanyetik radyasyon türlerinden radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızıl ötesi, görünür ışık ve yakın mor ötesi ışınlar iyonlaştırıcı enerjiye sahip olmayan radyasyondurlar. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri madde etkileşimlerinde maddenin uyarılmasına sebep olabilirler. Uyarılan atom üst enerji seviyesine çıkar ve taban durumuna dönerken aldığı enerjiyi geri verir. Fakat, atomun elektron ve çekirdek yapısında bir değişime neden olmaz (Martin, 2013). Bu sebeple de iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak adlandırılır.

2.4.2 İyonlaştırıcı Radyasyon

Radyasyon – Madde etkileşimlerinde atomun yörüngesindeki elektronları veya atomun kendisinin uyarılması ve atomun kendisinde veya çekirdeğinde iyonlaşma meydana gelmesi durumudur. Parçacık özellikli iyonlaştırıcı radyasyonlar yani alfa çekirdeği, nötron parçacığı, negatron parçacığı ve pozitron parçacığı ile elektromanyetik radyasyon türlerinden uzak mor ötesi, x-ışınları ve gama ışınları iyonlaştırıcı radyasyonun çeşitleridir. Uyarılan atomun çekirdeği ve elektron iyon çiftleri oluşturur. Bu iyon çiftleri oluşurken maddenin yapısına göre gelen radyasyon enerji kaybeder. Bir atomu iyonize etmek için gerekli en düşük enerji birkaç eV ile helyumu bir kez iyonize etmek için gerekli enerji 24,6 eV aralığında olabilir (Akyıldırım, 2011). Tablo1’de iyonlaştırıcı parçacık ve elektromanyetik dalga çeşitlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

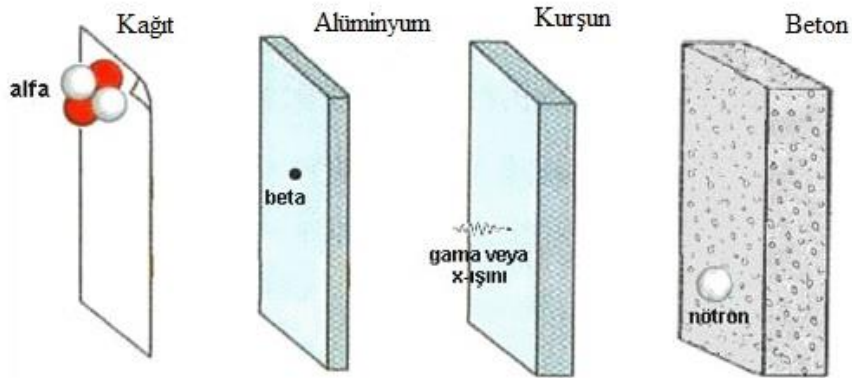
Tablo 1: İyonlaştırıcı parçacık ve elektromanyetik dalga çeşitlerinin karşılaştırılması (Akyıldırım, 2011)

	α	B^-	B^+	n	X – Işınları	γ - Işınları
Yük	+2	+1	-1	0	0	0
İyonizasyon	Doğrudan	Doğrudan	Doğrudan	Dolaylı	Dolaylı	Dolaylı
Kütle (akb)	4,00277	0,000548	0,000548	1,008665	-	-
Hız (cm/s)	$6,94 \times 10^8$	$2,82 \times 10^{10}$	$2,82 \times 10^{10}$	$1,38 \times 10^{10}$	$2,99 \times 10^{10}$	$2,99 \times 10^{10}$
Enerji (MeV)	3 - 10	0 - 3	0 - 3	0 - 10	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-5} - 10$
Havada Menzil (cm)	0 - 10	0 - 10^3	0 - 10^3	0 - 10^5	$10^2 - 10^3$	10 - 10^4
Suda Menzil (cm)	20 – 125×10^{-8}	<1	<1	0 – 100	$10^{-3} - 1$	$10^{-3} - \dots$

İyonlaştırıcı radyasyon etkileşme mekanizmasına göre parçacığın çeşidine ve enerjisine bağlı olduğu gibi etkileştiği atomun proton sayına ve yoğunluğuna da bağlıdır. Bu nedenle, yüklü, yüksüz parçacıkların ve iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonların madde etkileşimi farklı düşünülmelidir (Krane, 1988).

Yüklü parçacıkların iyonlaştırıcı radyasyon türleri öncelikle maddede yüklü bir parçacığın uyarılmasına ve salınmasına sebep olurlar. X ve Gama ışınları, negatron – pozitron çiftleri oluşturarak maddeyle etkileşirler. Nötron parçacığı, proton veya ağır iyonlar oluşturarak daha sonra da salınan bu parçacıkları doğrudan iyonlaştırıcı süreç işlenerek yani, yüksüz parçacıklar yüklü parçacıklar salınımına sebep olarak maddeyi iyonlaştırır (IAEA, 1971).

Parçacık ve elektromanyetik radyasyonların madde içinde nüfuz etme ve iyonlaştırma özellikleri karşılaştırıldığında nüfuz etme özellikleri yüksek olan gama ışını ve nötron parçacığı en tehlikeli radyasyon türleridir. Nötron parçacığı yüksüz, gama ışını yüksüz ve kütesiz oldukları için madde içinde daha derine nüfuz edebilirler. Alfa çekirdeği, beta parçacıkları ve proton parçacığı yüklü ve kütleli parçacık oldukları için madde etkileşimlerinde nüfuz etme yetileri kısıtlıdır. Fakat kütleleri oranında yüksek enerjiye sahip oldukları için madde etkileşimlerinde iyonlaştırma yetileri daha fazladır (Martin, 2013). Şekil 2.8’de iyonlaştırıcı radyasyon çeşitlerinin madde içerisinde nüfuz etme ve iyonlaştırma ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.8: İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitlerinin Madde İçerisinde Nüfuz Etme ve İyonlaştırma İlişkisi.

2.4.3 Yüklü Parçacıkların Madde Etkileşimleri

Alfa çekirdeği, beta parçacıkları ve proton parçacığı yüklü parçacıklardır. Madde etkileşimlerinde enerji kaybı ve geliş doğrultularından sapma olmak üzere iki özellik

sınıflandırılırlar. Bu radyasyon türleri madde ile etkileştiklerinde başlangıçtaki tüm enerjilerini çekirdeğin yörüngesinde dolanan elektronlara Coulomb etkisi de dahil olmak üzere tek seferde aktarırlar. Bu aktarım elastik olmayan ve çekirdekten elastik saçılma sonucunda oluşmaktadır. Ağır yüklü ve hafif yüklü olarak iki başlıkta incelenirler.

Ağır yüklü parçacıklar ve çekirdekler; proton parçacığı ve alfa çekirdeği içermektedir. Ağır yüklü bir parçacığın veya çekirdeğin madde etkileşiminde ortamdaki atomların negatif yüklü elektronları ile kendi pozitif yükleri arasında Coulomb kuvveti etkisiyle etkileşmektedir. Bu etkileşim elastik olmayan çarpışmalar sebebiyle meydana gelir. Ağır yüklü parçacıkların ve çekirdeklerin madde etkileşmesinde gelen parçacığın veya çekirdeğin kinetik enerjisi atomun enerjisinden yeterince büyük ise, parçacık veya çekirdek sahip olduğu enerjiyi yolu üzerindeki atomları iyonlaştırmak için maddeye aktarır (Krane, 1988).

Ağır yüklü iyonlaştırıcılar çekirdeklerle de reaksiyona girebilir. Fakat, atomun yarıçapı atom çekirdeğinin yarıçapından daha büyük olduğundan, atomun bir elektronu ile reaksiyon istatistiği daha yüksektir. Çekirdekle olan etkileşimlerde büyük kütleli çekirdek, Coulomb kuvvetinin etkisiyle ağır yüklü iyonlaştırıcının yön değiştirmesine sebep olur. Bu durum elastik çarpışmadır (Krane, 1988).

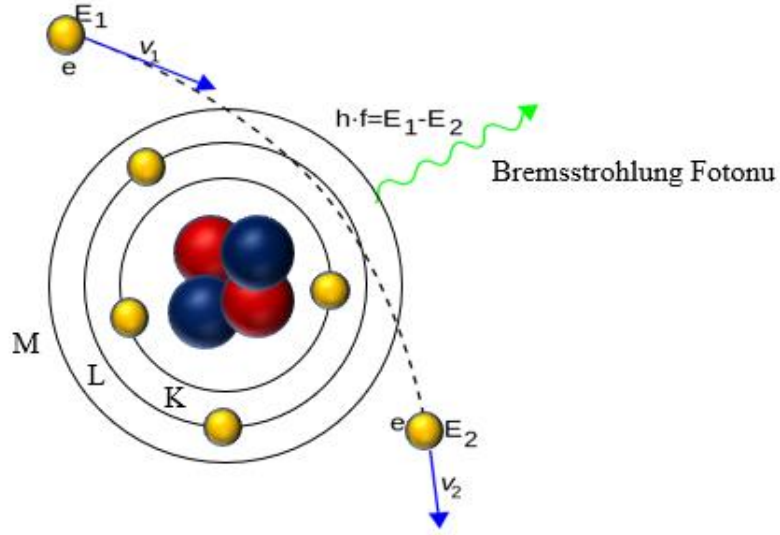
Hafif yüklü parçacıklar; negatif yüklü negatron ve pozitif yüklü pozitrondan oluşan beta parçacıklarıdır. Yüksek enerjileri ve hafif kütleleri nedeniyle, MeV düzeylerinde enerjiye sahip beta parçacıkları ışık hızına yakın hızlarda hareket ederler. Bu nedenle ağır yüklü iyonlaştırıcılarla madde etkileşimleri kıyaslandığında daha hızlı, daha uzun menzilli ve dolambaçlı bir yol kat ederler.

Beta parçacıkları madde etkileşiminde enerjilerini dört şekilde kaybederler; doğrudan iyonlaştırma, iyonlaşma nedeniyle yayılan beta parçacıklarının sebep olduğu delta ışınları, Bremsstrahlung ve Cerenkov radyasyonudur (Martin, 2013).

İyonlaşmayla enerji kaybı, negatronlar eksi yükleri ve kinetik enerjileri, Coulomb kuvvetinin etkisiyle soğurulduğu ortamdaki atomların yörünge elektronlarını koparır ve iyon çiftleri meydana getirir. Aynı durum pozitronlar içinde geçerlidir. Böylece negatronlar veya pozitronlar enerji kaybederek etkileştikleri ortamı iyonize ederler (Martin, 2013), (Krane, 1988).

Delta ışınları, beta parçacıklarının doğrudan iyonlaşmasında oluşan büyük enerjili negatronların ortamdaki diğer atomları iyonlaştırmasıyla iyonizasyon izleri boyunca oluşurlar.

Bremsstrahlung, enerji kaybı yüksek atom numarasına sahip bir soğurucu ortamından geçen yüksek hızlı beta parçacıkları Bremsstrahlung veya diğer adıyla frenleme radyasyonu üretirler. Şekil 2.9’da gösterildiği gibi çekirdek yakınından geçen beta parçacıkların çekirdeğin Coulomb kuvvetinden dolayı saparak, ivmelenirler (Martin, 2013). Sonuç olarak madde ile etkileşimlerinde Bremsstrahlung ile enerji kaybederler. Kaybedilen enerji Bremsstrahlung fotonuna aktarılan enerji kadardır.



Şekil 2.9: Bremsstrahlung Radyasyonu.

2.4.4 Yüksüz Parçacıkların ve Elektromanyetik Radyasyonun Madde Etkileşimleri

Elektromanyetik radyasyon ve nötron parçacığının yükleri olmadığı için madde etkileşimleri yüklü parçacıkların aksine Coulomb kuvvetinden bağımsız gerçekleşir. Yüksüz parçacıkların madde etkileşimleri maddede yüklü bir parçacığın uyarılarak koparılmasıyla yani iyonlaştırıcı fotonlar, x-ışını ve gama ışınları için negatron veya negatron – pozitron çiftleri oluşturarak, nötron parçacığı için proton parçacığı veya ağır iyonlar oluşturarak ikincil radyasyon yoluyla dolaylı iyonlaştırma görülür. Sonuç olarak, yüksüz parçacıklar ve elektromanyetik iyonlaştırıcı radyasyon madde etkileşimlerinde yüklü parçacık koparılmasını tetikleyerek madde

etkileşimlerini gerçekleştirirler. Yüksüz parçacıkların madde etkileşimlerini foton ve nötronlar için ayrı incelenebilir.

2.4.4.1 Fotonlar

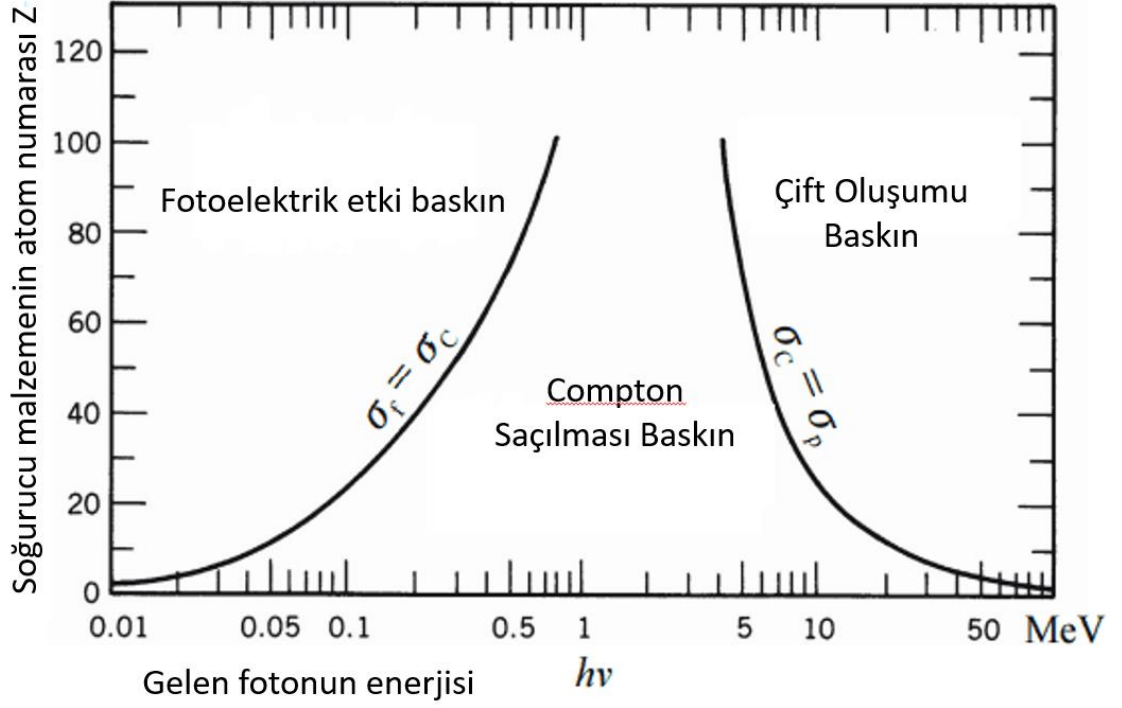
Durgun kütlesi olmayan, her zaman ışık hızında hareket eden ve her ne kadar bir dalga olsa da bir parçacık gibi etkileşebilen fotonlar, yüksüz, fiziksel bir boyuta sahip olmayan ve alt bileşenler oluşturacak şekilde bölünemeyen elektron parçacığına benzer bir biçimde gerçek bir “nokta”dır (Martin, 2013). Yüksüz olmaları sebebiyle Coulomb kuvvetinden etkilenmezler. Enerjisi $E = h\nu$ ve momentumu $p = h/\lambda$ olan fotonların, enerjileri momentum cinsinden $E = pc$ 'dir. h , plank sabiti, ν frekans, λ dalga boyu ve c ışık hızıdır. Fotonlar, elektromanyetik etkileşmeyi sağlayan temel taşıyıcılarıdır. Bu sebeple madde ile iyonlaşma ve bulundukları ortamda enerji depolamayla etkileşme yapmaktadırlar.

Fotonlar fazla enerjinin taşınması gerektiğinde ortaya çıkarlar. Hem dalga hem de parçacık ikilemi, fotonları diğer bozonlardan farklı kılar. Her iki özellik fotonun ortamla etkileşmesini sağlar. Girişim ve kırınım olayları fotonların dalga özelliklerini, enerjiyi depolamak için soğurulması ve momentum kazanması parçacık özelliğini gösterir (Krane, 1988). Bu iki özellik her zaman doğru değildir. Fakat birbirlerinin tamamlayıcısıdır.

Fotonların madde etkileşimleri ve enerji değişimleri için temel üç etkileşim vardır.

- Fotoelektrik Etki
- Compton Saçılması
- Çift oluşumdur.

Şekil 2.10'da enerji seviyelerine göre fotonların madde etkileşimlerinin baskınlık ayrımı gösterilmiştir.



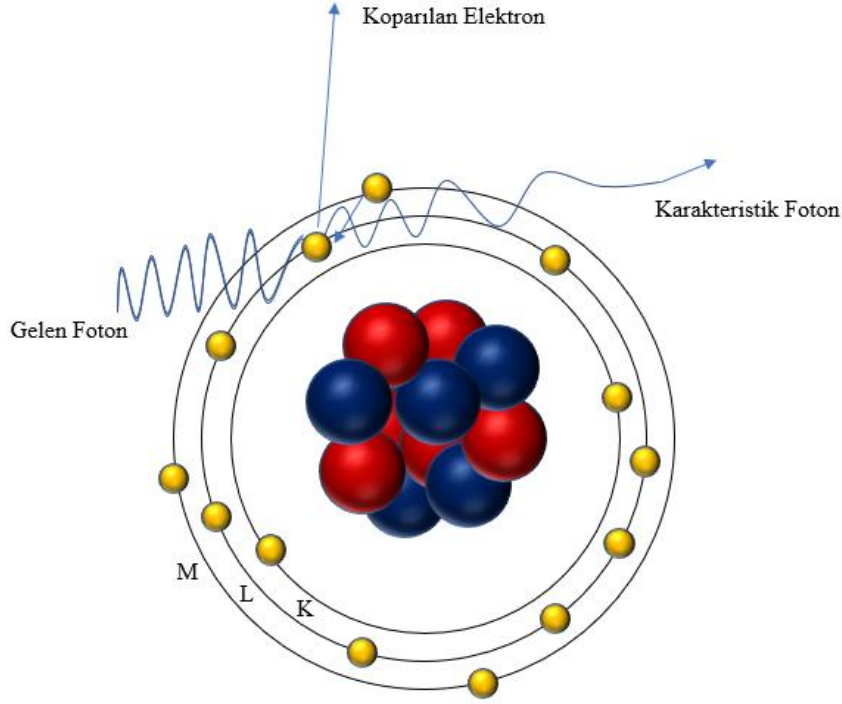
Şekil 2.10: Foton Enerjine göre Madde Etkileşimlerinde Baskın Etkileşim Grafiği.

Fotoelektrik Etki; düşük enerjili bir fotonun soğurucu ortamdaki bağlı bir elektron parçacığı ile etkileşmesi sonucunda fotonun enerjisinin tamamını etkileştiği elektrona aktararak, etkileştiği elektronu yörüngesindeki bağlanma enerjisinin fotonun enerjisi arasındaki farka eşit bir enerjiyle atomdan koparması olayıdır. Denklem (2.2)'de bağlanma enerjisi ve gelen fotonun kinetik enerjisi arasındaki bağıntı verilmiştir.

$$E_{\gamma} = h\nu = I_B + K_e \quad (2.2)$$

E_{γ} gelen fotonun enerjisi, I_B elektronun koparılması için gerekli enerji, K_e koparılan elektronun kinetik enerjisidir.

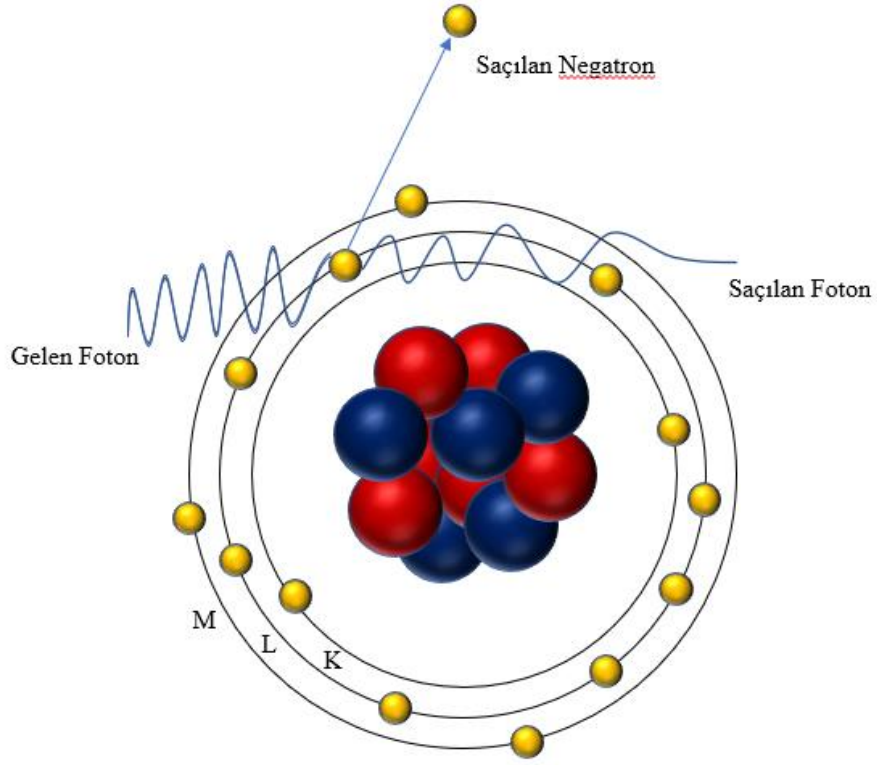
Fotoelektrik etki genellikle atomun iç-kabuğundaki elektronlardan biriyle meydana gelir. Koparılan elektronun oluşturduğu boşluk üst kabuktan başka bir yörünge elektronu tarafından doldurulur ve genellikle karakteristik bir x-ışını yayınlanır. Koparılan elektron parçacığının kinetik enerjisi etkileşme olayının olduğu ortamda soğurulur. Şekil 2.11'de fotoelektrik etki gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Fotoelektrik Etki.

Fotoelektrik soğurma, yüksek atom numaralı malzemeler ile 500 keV'den düşük enerjili fotonlar arasında gerçekleşir. Etkileşmenin soğurma katsayısı τ , atomun atom numarası ile radyasyon enerjisinin bir fonksiyonudur ve $\tau \approx \text{sabit} \times (Z^5 / E^3)$ ile ifade edilir. Z atomun atom numarası, E enerjisidir (Martin, 2013), (Krane, 1988).

Compton Etkileşimi; Compton saçılması olarakta adlandırılan compton etkileşimi genellikle orta enerjideki gama ışınları ve düşük atom numarasına sahip atomlara bağlı serbest elektron veya atomun yüksek elektronları arasında baskın olarak gerçekleşir. Compton etkileşimi, iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonun her enerjisinde gerçekleşme olasılığı vardır. Şekil 2.12'de Compton etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Compton Etkileşimi.

Compton etkileşimi sonucunda saçılıma uğramış foton, enerjisinin bir kısmını etkileştiği elektron aktarmış yani enerjisinin bir kısmını kaybetmiş, frekansı azalmış, dalga boyu artmış olarak, etkileşimden farklı bir yöne doğru saçılarak çıkmıştır. Compton kayması olarak adlandırılan dalga boyundaki bu artış denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = 0.024264 (1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Martin, 2013). Dalga boyundaki bu değişimin sadece fotonun saçılma açısına bağlı olduğu söylenebilir. Fotonun saçılan enerjisi elektrona aktarılmaktadır. Bu elektron parçacığına geri tepen elektron denir. Geri tepen elektronun enerjisi saçılma açısına bağlıdır. 180° saçılma açısına karşılık gelen değer maksimum değerdir. Denklem (2.4)'de geri tepen elektronun enerjisi;

$$K_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma (1 - \cos\theta)}{1 + \gamma (1 - \cos\theta)} \quad (2.4)$$

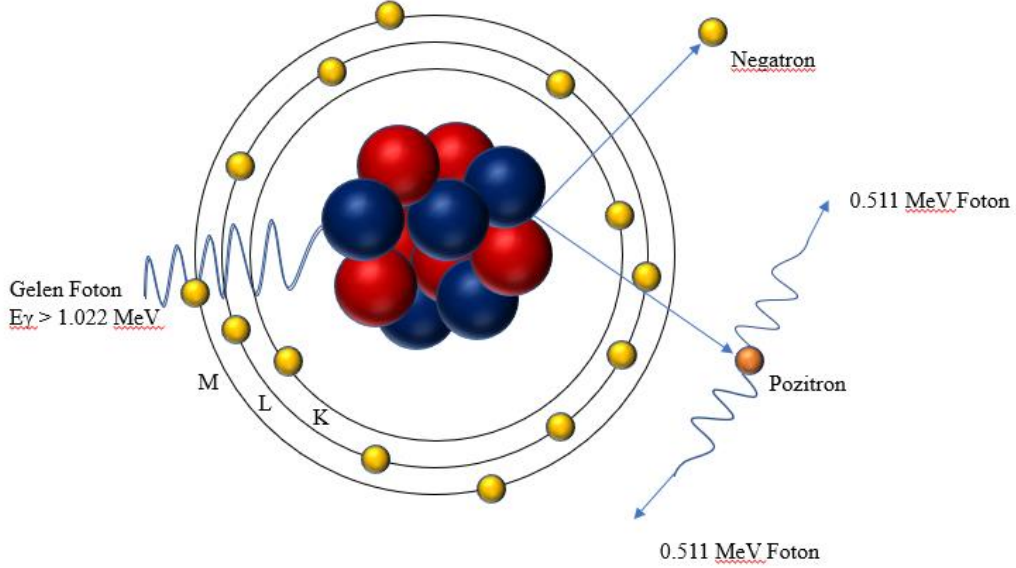
Bağıntısı kullanılarak hesaplanır (Bilge & Tuğrul, 1990). K_e geri tepen elektronun enerjisi, $h\nu$ gelen fotonun enerjisi, $h\nu'$ saçılan fotonun enerjisidir.

Compton etkileşimi katsayısı σ ile gösterilir ve iki bileşenden; $\sigma = \sigma_a + \sigma_s$ oluşur.

σ compton etkileşim katsayısı, σ_a elektronlarla çarpışma nedeniyle kaybedilmiş foton enerjisi için compton soğurma katsayısı, σ_s foton demetinden dışarı saçılmadan dolayı enerji kaybına karşılık gelen saçılma katsayısıdır.

σ atom numarası (Z) ile enerji (E) arasındaki elektron yoğunluğu; $\sigma \approx \text{sabit} \times (Z / E)$ şeklindedir.

Çift Oluşum; yeterli enerjiye sahip bir fotonun ($>1,022 \text{ MeV}$) bir çekirdeğin elektromanyetik alanıyla etkileştiğinde biri eksi yüklü negatron ve diğeri artı yüklü pozitron olarak fotonun enerjisinin, bir çift elektron parçacığına dönüşmesidir. Çift oluşum, fotonun tüm enerjisinin iki elektron kütesine dönüştüğü bir etkileşimdir. Enerjinin korunumu ilkesi gereği negatron ve pozitron durgun kütle haricindeki enerjiyi paylaşır. Bu paylaşım çekirdeğin yükü nedeniyle eşit olarak gerçekleşmez. Pozitron, negatrona göre $0,0075Z$ kadar daha fazla kinetik enerjiye sahiptir (Martin, 2013). Şekil 2.13’de çift oluşumu göstermiştir.



Şekil 2.13: Çift Oluşum.

Çift oluşum sonucu açığa çıkan pozitron parçacığı, antinegatron olması sebebiyle soğurulma ortamındaki bir serbest negatron ile eşleşip $0,511 \text{ MeV}$ enerjiye sahip birbirine zıt yönde iki yok olma fotonun oluşmasına sebep olur ve pozitron çok kısa sürede yok olur. Bu şekilde kütle enerjiye dönüşmüştür (L’Annunziata, 2012).

Çift oluşum etkileşme katsayısı κ , atom numarasının karesi ve enerjisi 1,022 MeV'den büyük fotonlarla ilişkilidir (Martin, 2013). $\kappa \approx \text{sabit} \times Z^2 (E - 1,022)$ 'dir.

2.4.4.2 Nötronlar

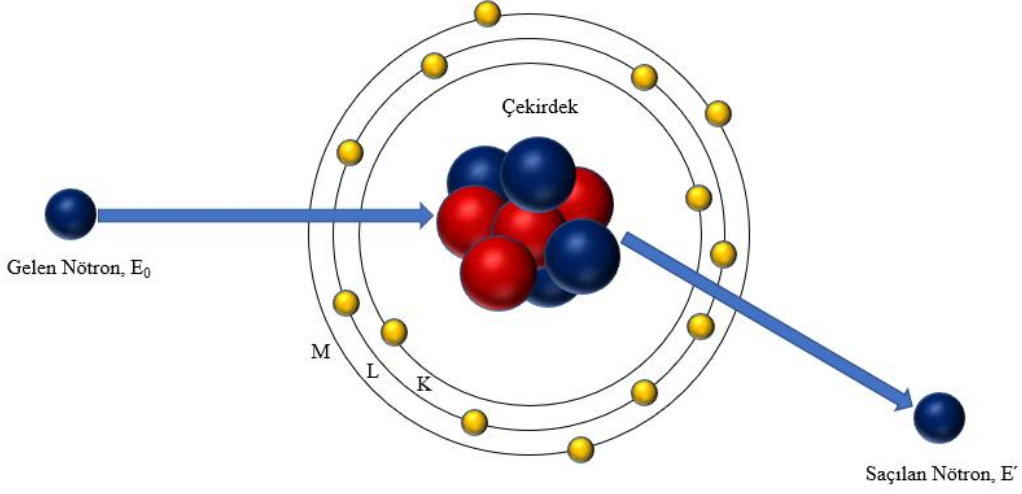
Nötronlar; yüksüz parçacıklarıdır. Bu nedenle, çekirdek ile nükleer kuvvetlerle etkileşmektedirler. Yani çeşitli saçılma reaksiyonları meydana getirerek madde ile etkileşebilirler ve kararsız yeni ürünler meydana getirerek soğurulabilirler. Nötron parçacıkları doğal kaynaklardan yayınlandığı gibi nükleer reaktörler ve parçacık hızlandırıcıları aracılığıyla da üretilir. Nötron parçacıkları genellikle hızlı nötron olarak adlandırılır. Hızlı kavramı, nötronun enerjisine karşılık gelen hızın büyüklüğüdür. Bulundukları ortamda yaptıkları etkileşimler sonucu hızları azalır. Nötron parçacıkları sahip oldukları enerjiye göre;

- Soğuk nötron ($T < 20^\circ \text{C}$): 40,0253 eV;
- Termal nötron: 0,0253 eV;
- Epitermal nötron: 0,0253 ile 1 eV
- Epikadmium nötron: $> \text{eV}$
- Yavaş nötron: 0,0253 – 100 eV
- Orta enerjili nötron: $0,5 - 10^4 \text{ eV}$
- Hızlı nötron: 0,01 – 10 MeV
- Yüksek enerjili nötron: $> 10 \text{ MeV}$ olarak sınıflandırılır.

Nötron parçacıkları enerjilerine göre madde atomlarının çekirdekleri ile birçok etkileşme meydana getirebilirler. Bu etkileşimlerin başlıcaları; esnek saçılma, esnek olmayan saçılma, nötron yakalama, nükleer reaksiyonlar ve fisyon olarak kabul edilmektedir (Knoll, 1999).

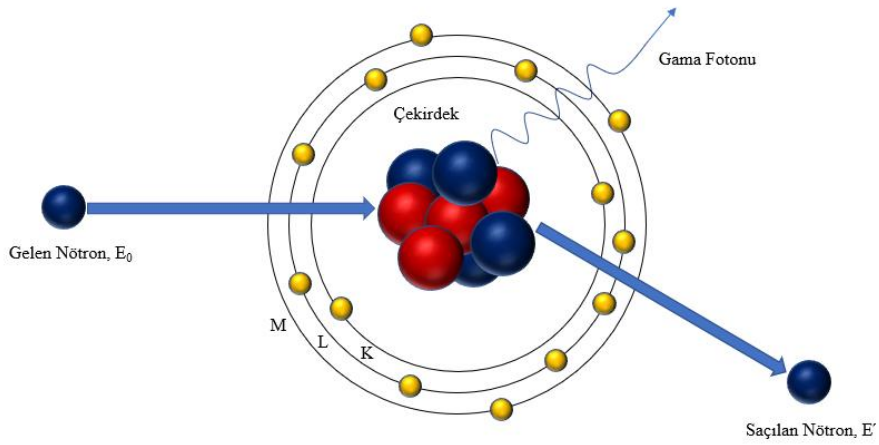
Nötron parçacıkları çok nadir atomların elektronları ile etkileşirler. Genel olarak nötronlar hedef atomun çekirdeği ile etkileşirler.

Esnek saçılma etkileşimi; orta enerjili ve daha düşük enerjili nötronların temel enerji kaybetme mekanizmasıdır. Hidrojen gibi hafif elementler, nötron yavaşlatılmasında oldukça etkilidir. Atomun çekirdeğine çarpan nötron parçacığı, kinetik enerjisinin bir kısmını atomun çekirdeğine aktardıktan sonra geliş doğrultusundan saparak farklı bir doğrultuda çekirdekten uzaklaşır. Esnek saçılmada atomun yapısında bir değişiklik gözlenmez. Toplam kinetik enerji korunur. Şekil 2.14'de nötron etkileşimlerinin esnek saçılması gösterilmiştir.



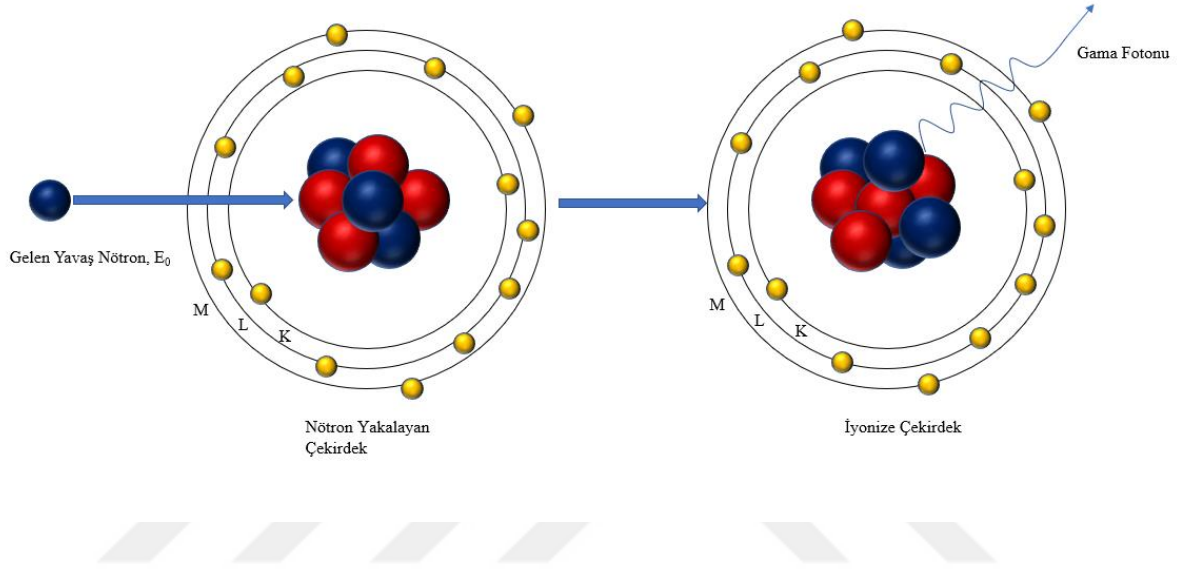
Şekil 2.14: Nötronun bir çekirdekten esnek saçılması.

Esnek olmayan saçılma etkileşimi; hızlı ve yüksek enerjili nötronların ağır çekirdekler ile olan etkileşiminde baskındır. Özellikle 2 MeV üzerinde enerjiye sahip nötron parçacıkları ile büyük atom numarasına sahip atom çekirdekleri arasındaki etkileşimde soğurucu ortamda bir gama ışını meydana getirir. Yani nötron parçacığı ile atomun çekirdeği arasındaki etkileşimde nötron sahip olduğu kinetik enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktararak farklı bir doğrultuda ve başlangıçtaki enerjisinden daha az bir enerji ile uzaklaşır. Kinetik enerjisi artan çekirdek uyarılmış duruma geçer ve bir gama salınımı ile bozulur. Şekil 2.15’de nötron etkileşimlerinin esnek olmayan saçılması gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Nötronun bir çekirdekten esnek olmayan saçılması.

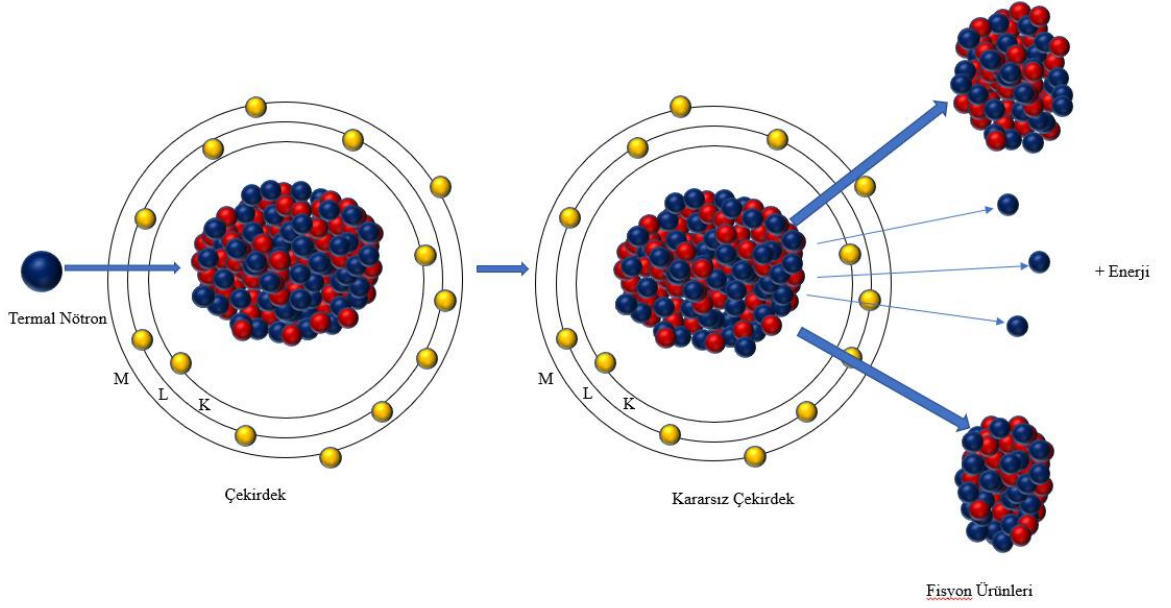
Nötron yakalanması; esnek ve esnek olmayan saçılmalarla etkileşimlerden sonra enerjisinin büyük kısmını kaybeden nötron parçacığı yavaşlamıştır. Bu durumda, soğurucu ortamdaki atom çekirdekleri tarafından kolayca yakalanabilir. Uyarılmış duruma gelen radyoizotop çekirdek taban enerjisine dönmek için foton yayınlr. Şekil 2.16'da nötron yakalama etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 2.16: Nötron Yakalama.

Nükleer reaksiyonlar; nötron yakalamasından farklı olarak uyarılmış atom çekirdeğinin taban enerjisine dönmek için parçacık yayınlamasıdır. eV ila keV arasındaki nötron yakalanmasında gözlemlenir. Bu yayınlanmalar (n,p), (n,2n), (n, alfa çekirdeği) şeklinde gözlemlenir.

Fisyon; 0,0253 eV enerjiye sahip termal nötronların ağır atomların çekirdeği ile etkileşmeye girmesi ile çekirdeği kararsız duruma getirmesidir. Kararsız duruma gelen ağır atom çekirdeği iki farklı çekirdeğe dönüşür ve açığa bir veya daha fazla nötron parçacığı salınımı gözlemlenir [39]. Şekil 2.17'de fisyon etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 2.17: Fisyon Reaksiyonu.

2.5 RADYASYONUN BİYOLOJİK ETKİLERİ

Daha önce radyasyonu etkileşimlerine göre iyonlaştırıcı olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyon olarak iki başlıkta incelemiştik. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarında iyonlaştırıcı olmayan radyasyonun yapılan çalışmalarda henüz tespit edilebilmiş olumsuz etkisine rastlanmamıştır. İyonize radyasyonun biyolojik etkileri x-ışınlarını keşfeden Roentgen tarafından bile fark edilmişti. Keza radyoaktiviteyi tanımlayan, keşfeden Becquerel ve radyoaktiviteye büyük katkılar sağlayan Curie ailesi, radyum ile yaptıkları çalışmalar sonucunda büyük sağlık problemleri yaşamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda ulusal ve yerel organizasyonlar yıllık ve beş yıllık ortalama maruz kalınacak doz oranlarını sınırlamışlardır. Ülkemizde TAEK olarak bilinen Türkiye Atom Enerjisi Kurumu en etkin kurum olarak yıllık maruz kalınacak doz oranını 20mSv/yıl ve beş yıllık ortalama maruz kalınacak doz oranı da 50mSv olarak belirlemiştir.

Radyasyona maruz kalan bir canlının yaşayacağı etkiler genel olarak radyasyon yanıkları, radyasyon hastalıkları, doğal ömür sürecinin kısalması, kanser ve kalıtsal bozukluklardır (Steel, 1997). İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan bireyin, biyolojik bir etki daha açıkça zarar görebilmesi, radyasyonun tipinden bağımsız tüm enerjisinin hücre ve dokular tarafından

soğurulması gerekir. İyonlaştırıcı radyasyon canlıda oluşturduğu etkileri üç şekilde sıralamak mümkündür (Özalpan, 2001).

- Fiziksel
- Kimyasal
- Biyolojik

Fiziksel etki de dokuyu oluşturan atom ve molekülleri, iyonize olması sonucu uyarılmasıdır. Fiziksel etkilenmeyi, kimyasal etki takip eder ve hasar görmüş atom ve moleküller diğer hücre yapılarıyla reaksiyona girerek serbest radikallerin meydana gelmesine sebep olur. Bu değişiklikler en son kademede biyolojik etkilenmeyi başlatır. İyonlaştırıcı radyasyon, hücre içi moleküller ve genetik materyal olan DNA ve kromozomlarda hasar ve yıkım meydana getirebilir. Mutasyon olarak tanımlanan bu durum tamir edilmez ise, hücreyi ölüme götüren süreci başlatan metabolik değişiklikler meydana gelir.

İyonlaştırıcı radyasyon sadece hücreler üzerinde etki yaratmaz. Daha özellikli etkileri organlar ve dokular üzerinde görülür. Organlar ve dokular üzerinde görülen olumsuz etkiler dokunun veya organın meydana getirdiği hormon, hücreler, enzimler gibi yapıların artmasına veya azalmasına, dokunun veya organın büyümesine ve işlevsizliğine sebep olabilir. Bu durumlar hücrelerin bölünmesi, çoğalması gibi etkileri değiştirerek kontrolsüz yapının oluşmasına ve tümörlerin oluşmasına sebep olacak durumların ortaya çıkmasına sebep olabilir (Güngör, 1991).

Günümüzde radyasyon araçları, sağlık fiziğinde tedavi ve görüntüleme, sanayide üretim ve kontrol, tarım ve gıdada, teknolojiye kullanılsa da genel olarak kontrolsüz şekilde iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmak biyolojik olarak kötü sonuçların meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak gerekmektedir.

2.6 RADYASYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ

Radyasyonun zararlı ve yıkıcı etkileri kısa sürede fark edilmesine rağmen radyasyondan korunma yöntemleri için yapılan çalışmalar aynı titizlikle ilerlemedi. Doğal ve yapay radyasyon kaynakları, nükleer enerjinin elektrik enerjisi ve silah olarak kullanılması ve nükleer enerji santrallerinde meydana gelen kazalar birçok canlının gereksiz doza maruz kalarak

hastalanmasına veya canından olmasına sebep oldu. Bu sebeple, radyasyondan korunma ile ilgili hükümetler ve devletler üstü uluslararası kurumlara ihtiyaç doğdu. Başta Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA), Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) gibi uluslararası ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) gibi yerel organizasyonlar kuruldu. Radyasyondan korunma ile ilgili olarak ICRP'nin yayınladığı 60 numaralı rapor ve IAEA'nın yayınladığı “Temel güvenlik Standartları” ismi altında BSS-115 numaralı yayında radyasyondan korunma ile ilgili üç temel ilke önerilmiştir.

- Gereklilik
- Doz Sınırı
- Optimizasyon

Gereklilik, radyasyonun zararlı etkileri göz önünde bulundurularak gereksiz yere hiçbir radyasyon uygulamasına izin verilmemesi üzerinde durur. Doz sınırı, bir kişinin yıllık alabileceği etkin eşdeğer dozun kesin bir şekilde sınırlandırılması gerekliliğini ifade eder. Optimizasyon, ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibine işaret ederek. Mümkün olan en düşük doz prensibine dayanır. ALARA prensibine göre radyasyondan korunma üç temel unsur içerir. Bunlar;

- Zaman
- Mesafe
- Zırhlamadır.

Zaman; radyasyon kaynağının aktivitesine bağlı olarak maruz kalınan doz miktarı, kişinin radyasyona maruz kaldığı zaman ile doğru orantılıdır. Radyasyona maruz kalınan zaman azaltılarak alınan doz miktarı da azaltılır. Denklem (2.5)'de alınan doz miktarının zamana bağlı ifadesi verilmiştir.

$$\Delta X = I' \frac{A}{R^2} \Delta t \quad (2.5)$$

ΔX alınan doz miktarını, I' gama ışını sabitini, A kaynağın aktivitesini, R kaynağa olan uzaklığı ve Δt geçen zamanı temsil eder.

Mesafe; yüksüz iyonlaştırıcı radyasyonların madde etkileşimlerinde nüfuz etme mesafesi çok yüksektir. Radyasyon şiddeti, radyasyon kaynağının mesafesiyle ters orantılıdır. Radyasyon

kaynağının mesafesi arttıkça, radyasyonun şiddeti azalmaktadır. Alınan doz miktarı matematiksel olarak kaynak mesafesinin karesiyle ters orantılı olarak azalacaktır. Denklem (2.6)'da radyasyon şiddeti ile mesafe arasındaki ilişki gösterilmektedir.

$$D_1 R_1^2 = D_2 R_2^2 \quad (2.6)$$

D_1 ve D_2 kaynağın mesafeye göre şiddetini, R_1 ve R_2 ise kaynağın değişen mesafesini gösterir.

Zırhlama; zaman ve mesafe ayarlanabilir ve sınırlandırılabilir olsalar da radyasyondan korunmak için en önemli optimizasyon zırhlama değildir. Radyasyon kaynağı ile canlı veya cansız sistem arasına yerleştirilen zırhlayıcı malzeme radyasyonun tamamen soğurulmasına veya makul seviyelere inmesine yardımcı olur. Zırhlayıcı malzemeler değiştirilebilir ve geliştirilebilir olması sebebiyle atom fiziği ve nükleer fiziğin araştırılan konularından biridir. Bu sebeple iyi bir zırh malzemesi geliştirmek büyük önem taşımaktadır.

Radyasyon zırhlama malzemesi olarak genellikle kullanılan malzemeler kurşun, demir, tungsten, beton ve cam malzemelerdir.

Kurşun malzemeler; radyasyona karşı korumada en çok kullanılan malzeme kurşun ve kurşun katkılı malzemeleridir. Teorik olarak uranyumdan sonra en iyi zırhlayıcı elementtir. Fakat, uranyum doğal radyoaktif olduğu için bu alanda kullanımı yoktur. Dünya'daki bizmut yetersizliğinden dolayı kurşun kararlı yapıdaki izotoplardan en etkin elementtir.

Kurşunun radyasyon zırhlayıcı olarak düşünülmesindeki en önemli sebepler yüksek atom numarasına sahip olması, yüksek yoğunluğu, kararlı izotopu olması, düşük maliyeti ve dünya üzerindeki maden rezervleri kurşunun yıllarca yaygın olarak radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılmasına vesile olmuştur. Fakat son yıllarda yapılan araştırmalar genel olarak canlı sağlığı ve çevresel etkileriyle ilgili kurşunun toksik etkilerinin ciddi bir sorun teşkil ettiğini gösterdi. Bu sebeple zırh malzemesi olarak kullanımının kısıtlanması gerekmektedir. Nitekim, AB (Avrupa Birliği) tarafından oluşturulan "Restriction of Hazardous Substances Directive (Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama) Direktifi" 27 Ocak 2003 tarihinde Avrupa Konseyi tarafından kabul edilmiştir. Bu kapsamda, kurşun, kadmiyum, civa ve bromürlü bileşenler insan sağlığına zararlı maddelerin kullanımını yasaklar. Bu Direktif, ülkemizde de "EEE Yönetmeliği" adı ile Mayıs 2008'de Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu bağlamda, kurşundan vazgeçilmeye çalışılmaktadır (Birgör, 2009). Ayrıca kurşun zırhlama

malzemelerinin ağır ve şekillendirme zorlukları büyük sorun teşkil etmektedir. Kurşun düşük kaynama sıcaklığı nedeni ile radyasyon nedeniyle oluşabilecek ısıyı uzaklaştırmak için soğutmaya gereksinim göstermektedir (Akkaş, 2015).

Demir malzemeler; atom numarası ve yoğunluğu gama zırhlaması için kullanılan diğer malzemelere göre düşüktür. Fakat, demir ve çelik malzemeleri oksitlenmeden korunduğu takdirde diğer malzemelere göre daha yüksek sıcaklıklara kadar radyasyon zırhlamasında kullanılabilir. Yapısında magnezyum, nikel, krom veya kobalt gibi safsızlık olmadığı takdirde aktivasyonu yüksek değildir ve radyasyon hasarlarına karşı dirençli olarak nitelenmektedir (Akkaş, 2015).

Tungsten malzemeler; zor şekillendirilebilir ve pahalı olması olmasına karşı, yüksek yoğunluğu ($19,3 \text{ g/cm}^3$) ve yüksek atom numarası (74) nedeni ile zırhlamada düşük kalınlık istenildiğinde tercih edilmektedir. Tungsten, görece diğer zırh malzemelerine göre çok yüksek erime noktasına (3410°C) sahiptir (Profio, 1979).

Beton; Radyasyon uygulamalarının kullanıldığı yerlerde normal yapı malzemesine ek olarak katkılanmış yani yoğunluğu arttırılmış, ortalama olarak m^3 başına 3 tondan ağır beton zırh yapıları kullanılır. Bu yapılar agrega beton olarak tanımlanır. Özellikle iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyon zırhlamada tercih edilir. Fakat, sadece yapı zırhlamasında kullanılması, aşırı ağır ve maliyet beton zırhlamaların en önemli eksiklikleridir.

Cam Malzemeler; radyasyondan korunmada kullanılan zırhlayıcı kurşun ve beton malzemelerdeki olumsuzluklara karşı yeni zırhlayıcı malzeme araştırmalarını arttırmıştır. 2004 yılında Singh ve diğerleri, tarafından yapılan sistematik çalışmalar, literatürde ilk kez camların zırhlayıcı malzeme olarak kullanılmasını başlattı. Cam malzemeler saydam olmaları, çok bileşenli olarak katkılanılabilir olmaları, ucuz maliyetleri, üretim kolaylığı, şekillendirilebilir olmaları, hafif ağırlıkları ve en önemlisi canlı sağlığına zararlı etkilerinin olmaması kurşun ve beton malzemelere göre en önemli avantajlarıdır.

2.7 RADYASYONDAN KORUNMA PARAMETRELERİ

İyonlaştırıcı radyasyon türlerinin madde etkileşimlerinde iyonlaştırma ve nüfuz etme kabiliyetleri radyasyonun enerjisine yani kütesine ve yüküne göre farklılıklar gösterir. Alfa çekirdeği ve proton parçacığı, yüksek enerjili ve yüklü olmaları sebebiyle madde etkileşimlerinde çok kısa mesafede, yüksek iyonlaştırma kabiliyetleriyle ile gerçekleşir. Dünya atmosferinde ortalama alabilecekleri mesafe sadece birkaç cm'dir. Ancak yüksek vakum ortamında mesafeleri arttırılabilir. Alfa çekirdeği ve proton parçacığı zırhlamasında bir kağıt parçası bile yeterlidir. Beta parçacıkları, alfa çekirdeğine ve proton parçacığına göre daha düşük enerjiye sahip, yüklü parçacıklardır. Düşük enerjiye sahip olmaları kağıt gibi ince ve atom numarası düşük materyallerle yapacakları etkileşimde, madde etkileşimine yani soğurulmaya uğramadan malzemenin içinden geçmelerine olacak sağlar. Bu sebeple beta parçacıklarını zırhlamada yüksek atom numarasına sahip malzemeler tercih edilir. Alüminyum iyi bir beta parçacıkları zırhlayıcıdır. Yüksüz, parçacık olan nötron ile iyonlaştırıcı enerjiye sahip fotonların enerjilerine bağlı olarak madde etkileşimlerinde nüfuz etme kabiliyetleri çok fazladır. Nötron parçacığı ağır bir parçacık olması yüksek enerjiye sahip olması demektir. Soğuruldukları anda yüksek iyonlaştırma yetenekleri çok tehlikeli olabilir. İyonlaştırıcı yeteneğe sahip fotonlar durgun kütleleri olmamasına rağmen madde etkileşimlerinde enerjilerine bağlı olarak soğurulma ve iyonlaştırma kabiliyetleri vardır ve canlı sağlığı açısından tehlikelidir. Fotonların davranışları keskin hatlar ile belirlenmemiştir. Madde etkileşimlerinde bazıları soğurulur, bazıları etkileşmeksizin maddeden geçer ve bir kısmı da enerjisinin bir kısmını maddeye aktararak farklı bir yönde saçılım yaparlar (Martin, 2013). Bu sebeple nötron parçacıkları gibi, iyonlaştırıcı fotonlar da yüksek atom numaralı kurşun, beton ve cam malzemelerle zırhlaması gerekmektedir.

Fotonların, azalma ve soğurulma parametreleri altı başlık altında toplanır;

1. Lineer azaltma katsayısı (μ)
2. Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ)
3. Yarı değer kalınlığı ($\ln 2/\mu$)
4. Onda bir değer kalınlığı ($\ln 10/\mu$)
5. Ortalama serbest yol ($1/\mu$)
6. Etkin atom numarası (Z_{etkin})

Nötronların azalma ve soğurulma parametresi $\sum_R$ 'dir.

2.7.1 Lineer Azaltma Katsayısı (LAK)

Bir fotonun şiddetindeki değişim, zırhlayıcı kalınlığının fonksiyonu olarak denklem (2.7)'de gösterilen;

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I \quad (2.7)$$

şeklindedir.

Burada μ orantı sabiti, fotonların zırhlayıcı ortamdan geçerken toplam azalma katsayısıdır. Gelen fotonlar tek enerjili bir demet ve ideal bir geometriyle azalır veya saçılırsa, x kalınlığındaki bir zırhlayıcıdan geçen fotonların şiddeti veya sayısı I , tekrar düzenlenirse;

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.8)$$

olur. $I(x)$ 'e göre integral alınırsa,

$$\int_{I_0}^{I(x)} \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx \quad (2.9)$$

$$\ln I(x) - \ln I_0 = -\mu x \quad (2.10)$$

$$\ln \frac{I(x)}{I_0} = -\mu x \quad (2.11)$$

Sonuç olarak;

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\mu x} \quad ; I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.12)$$

olarak Beer Lambert bağıntısı elde edilir. I_0 gelen fotonun şiddeti, $I(x)$ zırhlayıcı ortamının x kalınlığından geçen fotonun şiddeti ve μ lineer azaltma katsayısıdır. Denklem (2.11)'de lineer azaltma katsayısının çıkarımı verilmiştir.

Lineer azaltma katsayısı, zırhlayıcı ortamda birim uzunluk başına etkileşim olasılığıdır ve birim zamanda radyoaktif atomların dönüşüm olasılığı olan radyoaktif bozunma sabiti λ ile eş anlamlıdır. Lineer azaltma katsayısının birimi cm^{-1} 'dir. Matematiksel olarak bir foton

demetinin tam olarak zırhlanamayacağını ileri sürer, fakat deneysel olarak üstel azalma veya soğurulma, foton şiddetinin algılanamaz düzeylere azaltılabileceğini gösterir (Martin, 2013).

Foton şiddeti ile azalma katsayıları arasındaki ilişki, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve yeterli enerjiye sahip fotonlar için çift oluşum gibi iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyon ile madde etkileşimlerinde geçerlidir. Bu etkileşim denklem (2.13)'de verilmiştir.

$$I(x) = I_0 (e^{-\tau x} e^{-\sigma x} e^{-\kappa x}) = I_0 e^{-(\tau+\sigma+\kappa)x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.13)$$

μ , toplam azalma katsayısıdır ve ortamdaki foton etkileşiminin azalma katsayılarının toplamıdır. $\mu = \tau + \sigma + \kappa$ şeklindedir. τ fotoelektrik oluşum katsayısı, σ compton saçılımı oluşum katsayısı ve κ çift oluşum oluşma katsayısıdır.

Her etkileşimin baskın olduğu enerji değerleri daha önce verilmişti. Her bir etkileşimin oluşum katsayısının azalması diğer katsayıların artmasına sebep olur. Bu sebeple toplam azalma katsayısı μ değişmemektedir (Knoll, 1999).

2.7.2 Kütle Azaltma Katsayısı (KAK)

Lineer azaltma katsayısının, zırhlayıcı malzemenin yoğunluğuna oranıyla bulunur. Kütle azaltma katsayısının birimi cm^2/g 'dir. μ_m şeklinde gösterilir. Denklem (2.14)'te kütle azaltma katsayısının formülü verilmiştir.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

μ lineer azaltma katsayısı, ρ zırhlayıcı malzemenin yoğunluğudur.

Zırhlayıcı malzemenin foton etkileşiminde bir diğer önemli unsur malzemenin yoğunluğudur.

Kütle azaltma katsayısı bilinen bir element veya bileşiğin lineer azalma katsayısı Denklem (2.15)'te gösterilmiştir.

$$\mu = \mu_m * \rho \quad (2.15)$$

2.7.3 Yarı Değer Ve Onda Bir Değer Kalınlığı

Yarı değer kalınlığı, gelen fotonların şiddetini ilk sahip olduğu değer yarısına indirmek için gerekli olan zırhlayıcı malzemenin kalınlığıdır. YDK olarak tanımlanır. Birimi cm'dir. Denklem (2.16)'da yarı değer kalınlığının formülü verilmiştir.

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.17)$$

Benzer şekilde onda bir değer kalınlığı, gelen fotonların şiddetini onda bire inmesi için gerekli olan zırhlayıcı malzeme kalınlığıdır. ODK olarak tanımlanır. Denklem (2.18)'de onda bir değer kalınlığının formülü verilmiştir.

$$x_{\frac{1}{10}} = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.18)$$

2.7.4 Ortalama Serbest Yol

Belli bir enerjiye sahip fotonun herhangi bir etkileşmeye uğramadan kat edebileceği ortalama mesafedir. OSY olarak tanımlanır. Birimi cm'dir. Bir diğer ifadeyle foton madde etkileşmesinin meydana gelmesinin muhtemel olduğu zırhlayıcı kalınlığıdır. Denklem (2.19)'da formülü verilmiştir.

$$OSY = \frac{1}{\mu} \quad (2.19)$$

2.7.5 Etkin Atom Numarası ve Elektron Yoğunluğu

Etkin atom numarası (Z_{etkin}) ve Elektron yoğunluğu (N_{etkin}) çoklu elementsel yapıların iyonlaştırıcı radyasyona karşı tepkilerini tanımlamak için kullanılan parametreleridir. Genellikle radyasyon zırlama, soğurma dozu, foton çoğalma faktörü hesaplamalarında, teknik ve endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. Etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu radyasyon korunmasında zırlama için hazırlanan malzemelerin gama ışını ve x-ışını malzeme soğurulma kesirlerinin anlamını göstermek için ölçülen parametreleridir. Kaynak fotonun enerjisine bağlı olarak değişen (Z_{etkin}) ve (N_{etkin}) değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır (Büyükyıldız, 2016).

Etkin atom numarası hesaplamalarında dört yöntem kullanılmaktadır (Büyükyıldız, 2016).

1. Direkt metot
2. Interpolation metot
3. Ratio-cross-section metot
4. Empirical metot

Direkt metot; etkin atom numarası hesaplamada kullanılan en yaygın metottur (Profio, 1979). Teorik olarak etkin atom numarası hesaplaması direkt metot ile yapılmaktadır. Direkt metot hesaplaması, zırhlı malzemenin toplam kütle azaltma katsayısı ile bağıntılıdır. Direkt metot hesaplaması denklem (2.24) ve denklem (2.25)'de gösterilmiştir.

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{zırh} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i \quad (2.20)$$

Denklem (2.19)'da kütle azaltma katsayısı kullanılan zırhlı malzeme için $(\mu_{en}/\rho)_{zırh}$ değeri verilmiştir. w_i malzemenin ağırlık dağılımı ve $(\mu_{en}/\rho)_i$ i kadar element için toplam kütle azaltma katsayısıdır. $(\mu_{en}/\rho)_{zırh}$ değeri toplam moleküller azaltma katsayısı ($\sigma_{m,en}$) olarak kullanılabilir.

$$\sigma_{m,en} = \frac{M}{N_A} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{zırh} \quad (2.21)$$

$M = \sum_i n_i A_i$ zırhlı malzemenin toplam moleküller ağırlığı, N_A Avagadro sayısı, n_i molekül içindeki toplam atom sayısı, A_i i'inci elementin atom ağırlığıdır.

Etkin atom azaltma katsayısı ($\sigma_{a,en}$) şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_{a,en} = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{zırh}}{N_A \sum_i \frac{w_i}{A_i}} = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i = \frac{\sigma_{m,en}}{\sum_i n_i} \quad (2.22)$$

$f_i = \frac{n_i}{\sum_j n_j}$ 'dir. f_i element bileşeninin kısmi izotop oranı, n_i element bileşeninin toplam atom sayısı, $\sum_j n_j$ molekül formülü içinde sunulan atomların toplam sayısıdır.

Etkin elektron azaltma katsayısı ($\sigma_{e,en}$) şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_{e,en} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i = \frac{\sigma_{a,en}}{Z_{etkin}} \quad (2.23)$$

Z_i i'inci atomun atom sayısıdır.

Sonuç olarak etkin atom sayısı etkin atom azaltma katsayısının, etkin elektron azaltma katsayısına oranıdır.

$$Z_{etkin} = \frac{\sigma_{a,en}}{\sigma_{e,en}} \quad (2.24)$$

$$Z_{etkin} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i}{\sum_j \frac{f_j A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_j} \quad (2.25)$$

Elektron yoğunluğu; Bir element için elektron yoğunluğu, birim kütle başına ifade edilen elektronların sayısıdır. Denklem (2.26)'da gösterilmiştir.

$$n_e = \frac{N_A Z}{A} \quad (2.26)$$

Çoklu yapıdaki elementsel malzeme için elektron yoğunluğu, N_{etkin} şeklinde ifade edilir. Denklem (2.27)'de gösterilmiştir.

$$N_{etkin} = N_A \frac{n Z_{etkin}}{\sum_i n_i A_i} = N_A \frac{Z_{etkin}}{\langle A \rangle} \quad (2.27)$$

$\langle A \rangle$ materyalin ortalama atom ağırlığıdır.

2.7.6 Nötron Azalması ve Soğurulması

Nötron şiddeti, birim alan başına düşen nötron sayısı (n/cm^2) ya da akış hızı yani akı ($n/\text{cm}^2 \text{ s}$) cinsinden hesaplanmaktadır. Nötronların madde etkileşiminde yavaşlamasına ve tamamen soğurulmasına neden olan etkenler belli olasılıklar dahilindedir ya oluşurlar ya da oluşmazlar.

Nötron soğurulması, foton soğurulmasına benzer bir çözüme sahiptir. Denklem (2.28)'de verilmiştir.

$$-\frac{dI}{dx} = \sum_{nr} I \quad (2.28)$$

I nötron akı şiddeti, x zırhlayıcının kalınlığı ya da soğurucunun kalınlığı, $\sum_{nr}$ nötron soğurma katsayısıdır. Nötron kaynağının şiddeti, soğurucu malzemenin nötron soğurma katsayısı $\sum_{nr}$ ile orantılı olarak azalır (Martin, 2013).

Sonuç olarak denklem (2.28) çözümlendiğinde;

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma_{nr} x}$$

ifadesi elde edilir.

$I(x)$ x kalınlığına sahip zırhlayıcı veya soğurucu ortamın atomlarıyla herhangi bir etkileşme yapmadan geçen nötronların şiddeti, I_0 nötronun ilk şiddeti ve $e^{-\Sigma_{nr} x}$ ise nötronun x mesafesinde etkileşmeden hareket etme olasılığını ifade eder. Σ_{nr} nötronun zırhlayıcı veya soğurucu ortamda aldığı yol boyunca soğurularak veya saçılarak demetten ayrılmasına sebep olan etkileşmelerin birim mesafede meydana gelme olasılığıdır.

Makroskobik Tesir Kesiti; Hidrojen içermeyen malzemede, Σ_{nr} nötron soğurma katsayısı, makroskopik tesir kesiti $\Sigma = N \sigma_+$ şeklinde ifade edilir. N soğurucunun birim hacimdeki atom sayısı, σ_+ ise soğurucunun birim alandaki her bir atomun barn cinsinden toplam tesir kesitidir. Σ_{nr} 'nin birimi cm^{-1} 'dir.

Nötron Kütle Soğurma Katsayısı; nötron soğurma katsayısının, malzemenin yoğunluğuna oranıdır. Birimi (cm^2/g) 'dir. Denklem (2.29)'da gösterilmiştir.

$$\text{NKSK} = \frac{\Sigma_{nr}}{\rho} \quad (2.29)$$

Bir diğer ifade de ortalama serbest yoldur. Belli bir enerjiye sahip bir nötronun etkileşmeden soğurucu ortam içinde kat edebileceği mesafedir. Ortalama serbest yol, etkileşmenin meydana gelebileceği muhtemel ortalama kalınlıktır. Birimi cm 'dir. Denklem (2.30)'da gösterilmiştir.

$$\text{Nötron Ortalama serbest yol} = \frac{1}{\Sigma_{nr}} \quad (2.30)$$

Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için teorik olarak verilen parametrelerin fiziğinde yeni koruyucu malzeme arayışlarına devam edilmektedir. Bir sonraki bölümde cam malzeme türlerinden olan ve bu tez çalışmasının ana konusu olan biyoaktif özellikli amorf cam malzemeler verilecektir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, Biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin gama ışını ve nötron parçacığının radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Üç grup halinde toplam on üç amorf cam malzeme örneği ele alınmıştır. Amorf yapıli camlar, şekil ve Literatür çalışmasında molar kesitleri ve yoğunlukları daha önce fiziksel, kimyasal, ısıl ve elektriksel olarak çalışılan malzemelerin WinXCOM programı aracılığıyla kütle yüzdeleri tespit edilmiş. Yine WinXCOM programı aracılığıyla 0,02 MeV ile 20 MeV enerji aralığında on yedi tanımlanmış gama ışınının cam malzemelerle etkileşimde malzemelerin kütle azaltma katsayısı (KAK) hesaplanmıştır. Elde edilen KAK değerleri aracılığıyla lineer azaltma katsayısı (LAK), yarı değer kalınlık (YDK), onda bir değer kalınlık (ODK), ortalama serbest yol (OSY) değerleri hesaplanmıştır. MCNP4C programı kullanılarak Monte Carlo metoduyla 2 MeV enerjiye sahip gama ışını için cam malzemelerin geçiş faktörleri analiz edilmiştir. Cam malzemelerin etkin atom numarası (Z_{etkin}) ve elektron yoğunluğu (N_{etkin}) değerleri hesaplanmıştır. Nötron zırhlamasında makroskobik tesir kesiti hesaplaması yapılmıştır.

3.1 BİYOAKTİF ÖZELLİKLİ AMORF CAMLAR

1969 yılında Larry Hench tarafından insan vücudunda özellikle kemik dokusunun onarımında kullanılmak üzere icat edilmiştir (Karasu & ve diğ., 2017). 45S5 olarak adlandırılan ilk biyoaktif camlar, amorf yapılarıdır. Amorf, kendine özgü bir biçim olmayan demektir. Biyoaktif yapılar içerisinde temel olarak Sodyum (Na), Kalsiyum (Ca) ve Fosfor (P) elementi içerir. En temel yapılarında $Na_2O-CaO-P_2O_5$ moleküllerini içerirler (Kükürtcü, 2008). Silisyum (Si) ve benzer moleküller birleşiminden biyoaktif camlar elde edilmiştir. İlk ve en iyi sonuç veren biyoaktif cam bileşimi 45S5' tir. Tüm sınıflandırılan bileşimler kodlarla gösterilir ve kodlar bileşimin tipiyle ilişkilidir. Daha sonra oluşturulan birçok biyoaktif silikat camı 45S5 kodu verilen formüle dayanmaktadır. Tablo 2'de Hench ve diğ. Tarafından icat edilen 45S5 biyoaktif özellikli camın yüzdesel dağılımının göstermektedir (Hench & Ethridge, 1982).

Tablo 2: İlk Biyoaktif Cam Yapı 45S5'nin molar kesiti dağılımı

Bileşen Adı	Bileşenler ve Molar Kesitleri (ağ. %)			
45S5	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅
	45,00	24,50	24,50	6,00

Biyoaktif camların kimyasal özellikleri kontrol edilebilirdir. Herhangi bir teknik uygulama için istenilen bir türde biyoaktif cam tasarlamak mümkündür. Daha sonraki yapılan çalışmalar 45S5 biyoaktif cam yapısı baz alınarak araştırmalar yapılmıştır. Silikat içeriği, camın tam olarak erimesini ve homojenleşmesini sağlamaktadır (Kükürtcü, 2008). Biyoaktif camın içeriğindeki fosfatın rolü, camın biyoaktif olmasını sağlamaktır. Biyoaktif camların başlıca dezavantajları; iki yönlü cam ağından kaynaklanan mekanik zayıflıkları ve kırılma tokluklarıdır. Yaklaşık yoğunlukları 2.45 g/cm³, mikro sertlikleri 458 kg/mm², bükülme dayanımları 100- 200 MPa ve kırılma toklukları 1.2-2.6 MPa.m^{1/2} arasındadır (Kükürtcü, 2008). Daha sonraki zamanlarda yapılan gelişimlerle biyoaktif camlar kemik dokusu tedavisi dışında diş sağlığında da önemli yer almıştır. Canlı yapısına uygun geliştirilen biyoaktif camlar insan sağlığına uygun yapılardır.

Radyasyon zırhlamada cam yapıların sistematik olarak çalışmalarda umut verici sonuçlar vermesi, cam malzemelerin radyasyon zırhlama aracı olarak kullanılması araştırmalarını arttırdı. Yapılan çalışmalar genellikle yine kurşun içermektedir. Bu tez çalışmasında, kurşunun toksit etkisinden etkilenmemek için kurşun içermeyen ve biyolojik olarak vücuda uygunluğu kanıtlanmış biyoaktif özellikli amorf yapıli camlarla radyasyon zırhlama özellikleri incelendi. Bu sebeple, yapılan literatür çalışmasında kurşun ve benzeri toksik element içermeyen, daha önce fiziksel, kimyasal, ısı, elektriksel olarak çalışılmış biyoaktif cam yapılarla çalışıldı. Tablo – 3, 4 ve 5’de on üç biyoaktif özellikli amorf cam malzemeler malzeme kimlikleri, bileşik molar yüzdeleri ve yoğunluklarıyla beraber verilmiştir (Prasad, 2018), (Satyanarayana, 2017), (Rajkumar, 2018).

Üç grup halinde incelenecek malzemelerin ilk grubuna BGXB grubu, ikinci grubuna SRY grubu, üçüncü grubuna FPGZ grubu olarak adlandırılmıştır. BGXB grubunda beş adet biyoaktif özellikli amorf cam malzeme (Prasad, 2018) mevcuttur. Grup adlandırmasındaki X = 0,1,2,3,4 değerlerine göre değişkendir. SRY grubunda üç adet biyoaktif özellikli amorf cam malzeme (Satyanarayana, 2017) mevcuttur. Grup adlandırmasındaki Y = 5,10,15 değerlerine göre değişkendir. FPGZ grubunda beş adet biyoaktif özellikli amorf cam malzeme içermektedir (Rajkumar, 2018). Grup adlandırmasındaki Z = 0,1,2,3,6 değerlerine göre değişkendir.

BGXB grubunda, Fosfor Pentaoksit (P₂O₅), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na₂O), Silisyum Dioksit (SiO₂) ve Bor Trioksit (B₂O₃) molekülleri içermektedir. Fosfor Pentaoksit

(P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) sabit molar kesite sahiptir. Cam yapı Bor Trioksit (B_2O_3) ile katkılanmıştır. Silisyum Dioksit (SiO_2) ile Bor Trioksit (B_2O_3) molar kesitleri değişkendir. Her bir yapı için SiO_2 molar kesit yüzdesi %25 azaltılırken, B_2O_3 molar yüzdesi %25 arttırılmıştır. Tablo 3’de BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin örnek kimlikleri, molar bileşenleri ve kesitleri ile her örneğin toplam yoğunluğu verilmiştir.

SRY grubunda, Fosfor Pentaoksit (P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) ve Stronsiyum Hidroksit (SrO) molekülleri içermektedir. Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O), Potasyum Oksit (K_2O) molar kesitleri sabittir. Fosfor Pentaoksit (P_2O_5) ile Stronsiyum Hidroksit (SrO) molar kesitleri değişkendir. P_2O_5 molar kesiti 0,5 azaltılırken, SrO molar kesit değeri 0,5 arttırılmıştır. Tablo 4’de SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin örnek kimlikleri, molar bileşenleri ve kesitleri ile her örneğin toplam yoğunluğu verilmiştir.

FPGZ grubunda, Fosfor Pentaoksit (P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) ve Kalsiyum Florür (CaF_2) molekülleri içermektedir. Fosfor Pentaoksit (P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) ve Kalsiyum Florür (CaF_2) molar kesitleri değişkendir. P_2O_5 , CaO ve Na_2O molar kesitleri azaltılırken, CaF_2 molar kesit değeri arttırılmıştır. Tablo 5’de FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin örnek kimlikleri, molar bileşenleri ve kesitleri ile her örneğin toplam yoğunluğu verilmiştir.

Tablo 3: BGXB Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları

Örnek Kimliği	P_2O_5	Na_2O	CaO	SiO_2	B_2O_3	Yoğunluk (g/cm^3)
BG0B	1,72	22,70	21,77	53,85	0	2,66
BG1B	1,72	22,70	21,77	40,3875	13,4625	2,64
BG2B	1,72	22,70	21,77	26,925	26,925	2,63
BG3B	1,72	22,70	21,77	13,4625	40,3875	2,59
BG4B	1,72	22,70	21,77	0	53,85	2,54

Tablo 4: SRY Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları

Örnek Kimliği	P ₂ O ₅	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	SrO	Yoğunluk (g/cm ³)
SR5	59,50	20,00	17,00	3,00	0,50	2,654
SR10	59,00	20,00	17,00	3,00	1,00	2,604
SR15	58,50	20,00	17,00	3,00	1,50	2,596

Tablo 5: FPGZ Grubu Biyoaktif Özellikli Amorf Camların Örnek Kimliği, Molar bileşenleri ve kesitlerinin dağılımı, yoğunlukları

Örnek Kimliği	P ₂ O ₅	Na ₂ O	CaO	CaF ₂	Yoğunluk (g/cm ³)
FPG0	69,42	18,00	12,63	0	2,718
FPG1	69,25	17,40	12,60	0,79	2,662
FPG2	69,09	16,80	12,57	1,58	2,690
FPG3	68,93	16,20	12,54	2,37	2,701
FPG6	68,77	15,60	12,51	3,15	2,708

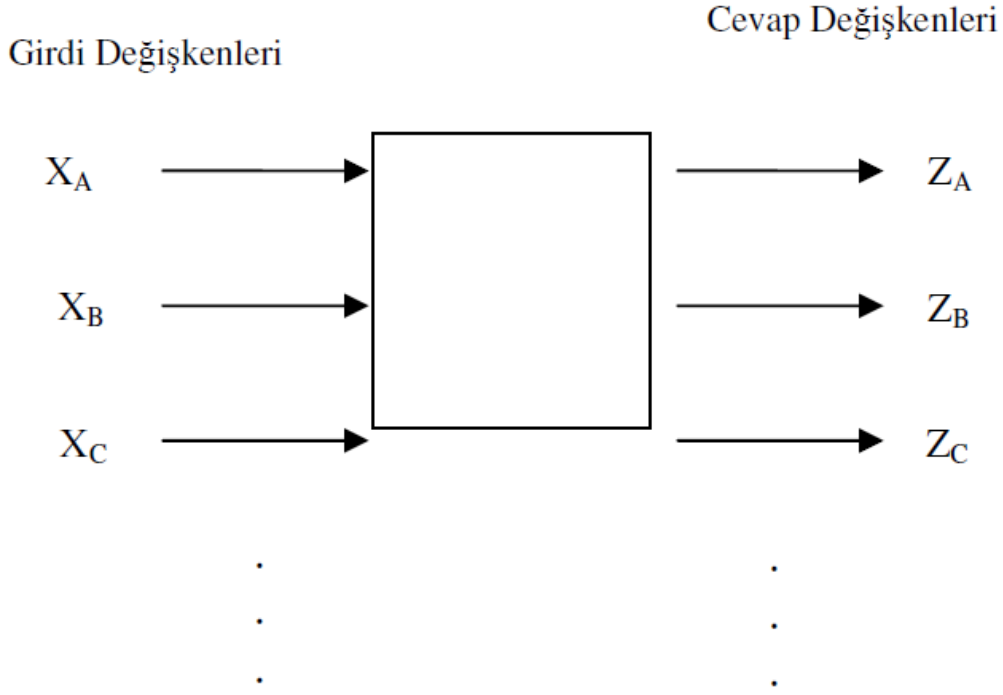
3.2 MONTE CARLO SİMÜLASYONU

Tasarlanan sistemin durumunu değiştiren olayların gerçekleşme zamanlarına ait değerlerinin bir olasılık dağılımından yararlanılarak belirlenmesi Monte Carlo simülasyonu olarak adlandırılır (Taha, 1989). Yöntem, sistemin belli bir zaman aralığında yer alan belirli bir anın durumunu yansıttığı için bir statik simülasyon modelidir. Bu metot olasılık teorisine bağlıdır. Genel olarak, bir probleme uygulanması, problemin tesadüfi sayılar kullanılarak defalarca denenip, hesap edilmek istenen parametrenin bu simülasyonların sonucuna bakılarak yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanır.

Monte Carlo simülasyonu üzerine ilk çalışmalar 1871 yılında A. Hall tarafından “ π ” sayısı üzerinde başlatılmıştır. Sonraki yıllarda W. Gosset tarafından geliştirilmeye çalışılmıştır. 1899 yılında Rayleigh parabolik diferansiyel denklemlere ait tek boyutlu rastgele sayıların değerini yaklaşık olarak bulma çalışmasında denenmiştir. Monte Carlo simülasyonu özellikle 1930’lu yıllarda kullanımı artmış matematiksel bir tekniktir. 1940 yılında Nükleer silah geliştirme projesi olan Los Alamos Ulusal Laboratuvarında, bombanın patlamasından sonra dağılan nötronlara karşı kalkan modellemek için Stanislaw Ulam, J. Von Neumann ve Fermi tarafından günümüze taşınmıştır. Basit bir simülasyon modeli;

- 1) Sistem davranışını örnekleyen bir model,
- 2) Şekil 3.1’de gösterilen bu model kendisine eklenen tesadüfi giriş değişkenlerini (X_a , X_b , X_c ...) ile tesadüfi çıktı değişkenlerine (Z_a , Z_b , Z_c ...) dönüştürmektedir. Bu çıktı değişkenlerine cevap değişkeni denilmektedir (Law & Kelton, 1991).
- 3) Girdi değişkenlerinin dağılımının bilindiği ancak cevap değişkenlerinin dağılımının ise bilinmediği varsayılmaktadır. Buradaki amaç cevap değişkenlerinin veya onlara ait parametrelerin dağılımlarını incelemektir.
- 4) Problem simüle edildiğinde, girdi tesadüfi değişkenleri örnekler aracılığıyla değiştirilirler.
- 5) Simülasyon işlemi başlatıldığında, her bir cevap değişkeni için bir değişkenler kümesi oluşturularak hesaplamalar gerçekleştirilir. Burada dikkat edilmesi gereken sonlu bir sistemin simüle edilmesi durumunda her bir denemenin her bir cevap değişkeni için bir gözlem değerini oluşturduğu ve simülasyon tahmininin ise N’in birden büyük veya eşit olduğu cevap değişkenleri kümesinden hesaplandığıdır. Bundan dolayı da simülasyon işletilmesi N deneme tarafından tanımlanmaktadır. Diğer simülasyon çalışmalarından farkı her işlemin bir tahmin ve simülasyon denemesi olmasıdır.

Cevap parametrelerinin sabit olmasına rağmen her bir simülasyon ikilemi farklı bir tahminler kümesini oluşturmaktadır. Bu farklı tahminler kümesinden kaynaklanan ve minimize edilmesi gereken tahmin hatası Monte Carlo yönteminin kullanımında katlanılması zorunlu bir durumu oluşturmaktadır (Law & Kelton, 1991).



Şekil 3.1: Örnek bir Monte Carlo Simülasyonu Modeli.

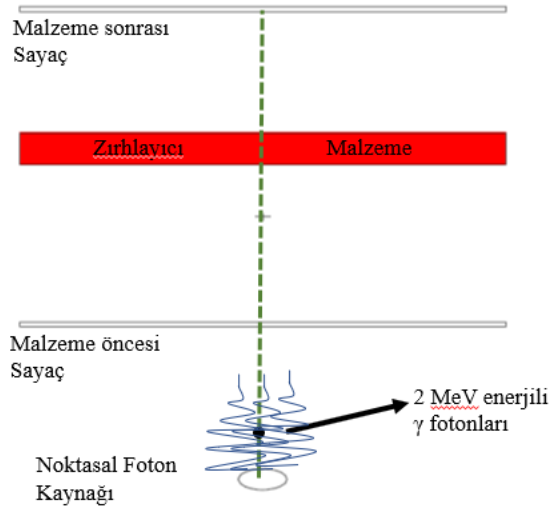
Monte Carlo simülasyonu kullanım alanları Hücre Simülasyonu, Borsa Modelleri, Dağılım Fonksiyonları, Sayısal Analiz, Doğal olayların simülasyonu, Atom ve Molekül Fiziği, Nükleer Fizik ve Yüksek Enerji Fiziği modellerini test eden simülasyonlar olarak örneklendirilebilir.

Nükleer Fizikte Monte Carlo Simülasyonun kullanımı en çok bilinen adıyla Monte Carlo N-Partical Transport Code yani MCNP'dir.

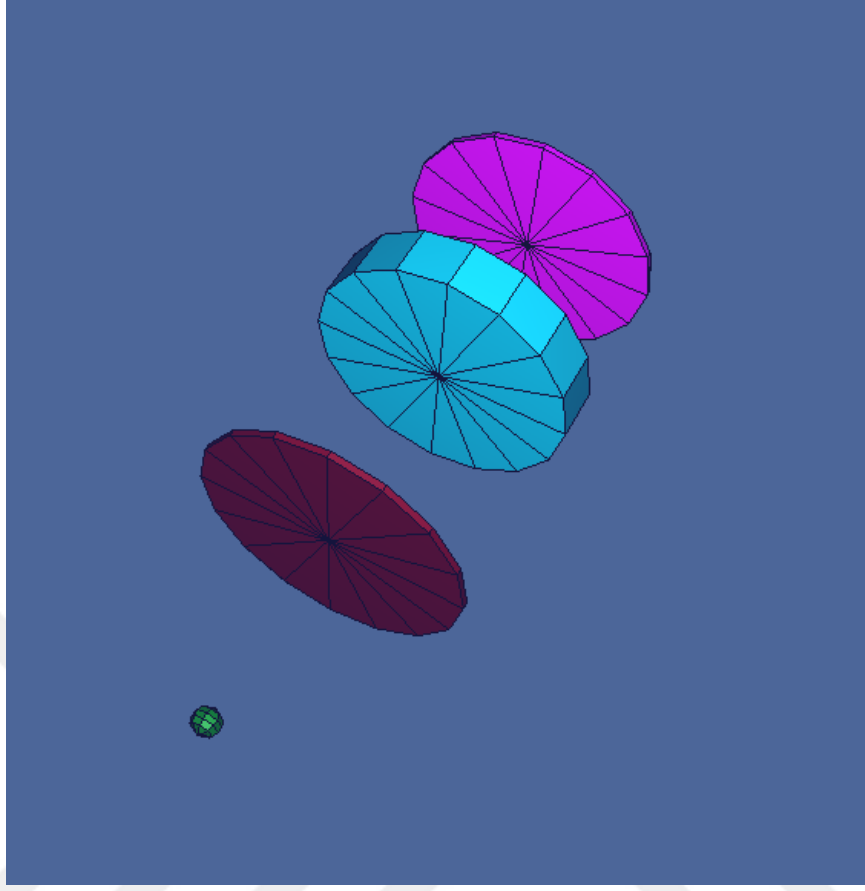
3.2.1 MCNP

Monte Carlo simülasyon metodunun fizik doğal biliminde kullanılan en yaygın uygulamalarından biridir. 1957 yılında Los Alamos National Laboratuvarında geliştirilmiştir. Günümüze gelinceye kadar bir gelişim göstermiş Fortran 90 tabanlı, nükleer süreçleri simüle etmek için kullanılan bir yazılım paketidir. Amerika Birleşik Devletleri'nde Oak Ridge, TN'deki Radyasyon Güvenliği Bilgi İşlem Merkezi ve uluslararası olarak Paris, Fransa'daki Nükleer Enerji Ajansı tarafından dağıtılmaktadır. Öncelikle nükleer çekirdek fisyonu gibi nükleer işlemlerin simülasyonu için kullanılırdı. Zamanlarda geliştirilmesiyle nötronları, elektronları ve fotonları içeren parçacık – madde, elektromanyetik ışıma -madde etkileşimlerini de simüle etme yeteneğine sahip oldu. Günümüzde temel uygulama alanları; radyasyondan korunma ve dozimetri, radyasyon kalkanı, radyografi, tıbbi fizik, nükleer kritik güvenlik, dedektör tasarımı

ve analizi, hızlandırıcı hedef tasarımı, fisyon ve füzyon reaktörü tasarımı bulunmaktadır. Şu anda MCNP 6.2 versiyonu en son versiyon olarak yayınlanmıştır (MCNP, 2005). Bu tez çalışmasında MCNP4C versiyonu kullanılmıştır. Simülasyon, x, y ve z koordinatları (0,0,0) merkez olmak üzere 100 cm çapında boş bir küre olarak tasarlanmıştır. Bir noktasal gama foton kaynağı merkezden (-25,0,0) koordinatında 2 MeV enerjiye sahip gama fotonlarını belirsiz sayıda 360° olacak şekilde yönden bağımsız olarak yayınlamaktadır. Merkez (0,0,0) koordinatından, x eksenine dik olarak (-10,0,0) koordinatında T4 olarak atanan sayaç-1, 0,5 cm kalığında ve 10 genişliğinde olacak şekilde tanımlandı. T4 tally, transmission factor olarak adlandırılan foton geçiş faktörünü saymaktadır. Merkez (0,0,0) koordinatından, x eksenine dik olarak (5,0,0) koordinatından başlamak üzere 0,5 cm kalınlığından başlayarak, her ölçüm sonrasında kalınlığı 0,5 cm arttırarak sırasıyla 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm ve son olarak 4 cm kalınlığa sahip olacak şekilde her kalınlık için genişliği 10 cm olan radyasyon zırhlayıcı biyoaktif özellikli cam malzemeler Bölüm 3.1’de açıklanan üç grup için de tanımlandı. Merkez (0,0,0) koordinatından, x eksenine dik olarak (19.5,0,0) koordinatında T4 olarak sayaç-2, 0,5 cm kalığında ve 10 genişliğinde olacak şekilde foton geçiş faktörünü saymak için zırh malzemenin arkasına tanımlandı. Şekil 3.2’de Simülasyon Uzayının 2 boyutlu görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.3’de Simülasyon uzayının XZ yönünden bakılacak şekilde 3 boyutlu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.2: MCNP4C 2D Ekran Görüntüsü.

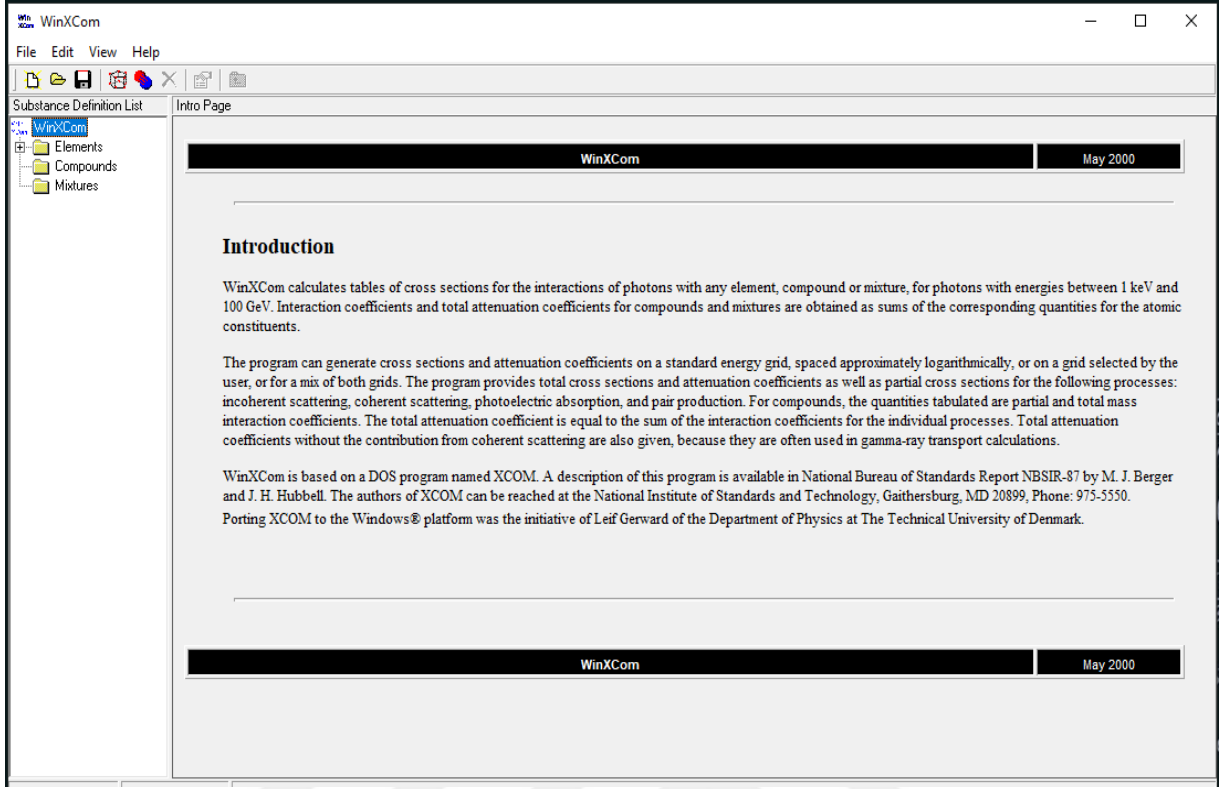


Şekil 3.3: MCNP4C 3D Ekran Görüntüsü.

Radyasyon zırhlayıcı malzemelerin tanımlanmasında elementsel olarak içerikleri WinXCOM programı aracılığıyla kütle kesitleri bulunarak tanılandırılmıştır. Ayrıca her malzemenin yoğunluğu simülasyona tanılandırılmıştır.

3.2.2 WinXCOM ile KAK değerinin hesaplanması

WinXCOM programı, XCOM programının Windows ve DOS ortamında kullanılması için düzenlenmiş versiyonudur. XCOM programı 1987 yılında M.J. Berger ve J.H. Hubbell tarafından yazılmıştır. XCOM bilgisayar programı element, bileşik ve karışım malzemelerinin 1 keV – 100 GeV aralığında enerjiye sahip fotonların madde etkileşimde fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu tesir kesitlerinin hesaplanması ve bunlara bağlı olarak maddelerin teorik kütle zayıflatma katsayılarının elde edilmesini sağlayan program olarak ifade edilmektedir. Malzemelerin içerikleri ve molar kesitleri bileşim değerleri program tarafından değerlendirilmekte ve istenilen enerji değerindeki teorik kütle zayıflatma katsayısını hesaplayabilmektedir (Berger & ve diğ., 2013). Şekil 3.4’de WinXCOM programının arayüzü verilmiştir.



Şekil 3.4: WinXCOM programının anayüzü.

Bu tez çalışmasında, sırasıyla 0,02 – 0,06 – 0,08 – 0,122 – 0,356 – 0,511 – 0,662 – 1,00 – 1,173 – 1,250 – 1,330 – 2,00 – 5,00 – 8,00 – 10,00 – 15,00 ve son olarak 20,00 MeV enerjiye sahip gama fotonları için Bölüm 3.1’de tanımlanan biyoaktif özellikli cam malzemelerin kütle azalma katsayıları (μ/ρ) bulunmuştur.

3.2.3 LAK, YDK, ODK ve OSY değerlerinin hesaplanması

Kütle azalma katsayıları bulunan malzemelerin LAK değerleri daha önce bölüm 2.6’da verilen Radyasyondan Korunma Parametreleri başlığındaki denklem (2.15) aracılığıyla Microsoft Office Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Sırasıyla YDK için denklem (2.17), ODK için denklem (2.18) ve OSY için denklem (2.19)’den yararlanılarak Microsoft Office Excel programı kullanılarak hesaplamaları yapılmıştır.

3.2.4 Zetkin ve Netkin değerlerinin hesaplanması

Etkin atom numarası hesaplanması Bölüm 2.6.5’de verilen direkt metot kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama için öncelikle WinXCOM programı aracılığıyla her bir element için ağırlık kesitleri hesaplanmıştır. Ağırlık kesitleri hesaplanan elementlerin, denklem (2.20) kullanılarak zırhlayıcı malzeme için kütle azaltma katsayısı hesaplanmış ve denklem (2.21)’de

verilen moleküller azalma katsayısı, ağırlık kesitleri ile kütle zayıflatma katsayısı çarpılarak hesaplanmıştır. Denklem (2.21)'de atomik azaltma katsayı elde edilmiştir. Denklem (2.23)'de elektronik azaltma katsayı elde edilmiştir.

Z_{etkin} değeri atomik azalma katsayısının, elektronik azalma katsayısına bölümüdür. Denklem (2.24) ve açılmış hali olan denklem (2.25)'ten yararlanarak Z_{etkin} değeri Microsoft Office Excel kullanılarak hesaplanmıştır.

Elektron yoğunluğu N_{etkin} değerinin hesaplamasında Bölüm 2.6.5'te verilen denklem (2.27)'dan yararlanarak Z_{etkin} değerinin materyalin ortalama ağırlığına bölünerek Microsoft Office Excel kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.5 Makroskobik Tesir Kesiti

Bölüm 2.6.6'da denklem (2.28)'den yararlanarak Nötron Kütle Soğurma Katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan NKSK değerleri denklem (2.29) kullanılarak Microsoft Office Excel aracılığıyla Makroskobik Tesir Kesitleri hesaplanmıştır.

Bu çerçevede genel bilgiler, malzeme ve metot yöntemleri verilen bu tez çalışmasının elde edilen bulguları incelenecektir.

4. BULGULAR

Bu yüksek lisans tezinde, teorik olarak gama ışınları ve nötron parçacığı karşısında biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin radyasyon zırhlayıcı özellikleri incelenmiştir. Bu sebeple, çalışılan malzemelerin teorik kütle azaltma katsayılarının hesaplanması benimsenmiştir. Uluslararası literatürde güvenilirliği kabul edilen XCOM bilgisayar programının Microsoft firmasının Windows İşletim sistemlerinde çalışabilen WinXCOM bilgisayar programı kullanılarak kütle azaltma katsayıları (KAK) hesaplanmıştır.

Bölüm 3’de üç grup halinde verilen biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin WinXCOM bilgisayar programı kullanılarak 0,02 MeV ile 20 MeV enerji aralığında on yedi enerji değeri için hesaplanan KAK karşılaştırması yapılmıştır. Böylelikle, teorik hesaplamalarla ulaşılan sonuçlar karşılaştırmalı olarak kendi grubu içinde değerlendirilebilmiştir.

Molar kesitleri ve yoğunlukları bilinen malzemelerin yarı değer kalınlığı (YDK), onda bir değer kalınlığı (ODK), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etkin}) ve elektron yoğunluğu (N_{etkin}) değerleri hesaplanan kütle zayıflatma katsayısı aracılığıyla hesaplanmıştır.

Radyasyon Zırhlama Parametreleri teorik olarak hesaplanan biyoaktif özellikli amorf malzemelerin MCNP simülasyonun MCNP4C versiyonu ile geçiş faktörleri simüle edilmiştir.

Son olarak makroskopik tesir kesitleri hesaplanmıştır.

4.1 TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK KAK DEĞERLERİNİN TAYİNİ

Bölüm 3.1’de tanımlanan biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin ilk grubu olan BGXB grubunda, Fosfor Pentaoksit (P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO) ve Sodyum Oksit (Na_2O) sabit molar kesite sahiptir. Silisyum Dioksit (SiO_2) ile Bor Trioksit (B_2O_3) molar kesitleri değişkendir. İlk malzeme olan BG0B cam malzemelerinde SiO_2 baskın bileşenin, diğer malzemelerde B_2O_3 ile katkılandırılması sonucu WinXCOM aracılığıyla Bölüm 3.2.2’de verilen enerjilerde Tablo 6’da ki değerler elde edilmiştir. Ayrıca, şekil 4.1’de KAK değerlerinin gösterilen foton enerjilerine göre değişimi verilmiştir.

Tablo 6: BGXB grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri.

E (MeV)	BG0B	BG1B	BG2B	BG3B	BG4B
	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM
0,020	3,90259	3,65257	3,40255	3,15252	2,90250
0,060	0,30338	0,29385	0,28432	0,27479	0,26526
0,080	0,21491	0,21059	0,20627	0,20195	0,19763
0,122	0,15831	0,15675	0,15518	0,15362	0,15205
0,356	0,10014	0,09977	0,09940	0,09904	0,09867
0,511	0,08611	0,08582	0,08553	0,08525	0,08496
0,662	0,07680	0,07656	0,07631	0,07606	0,07582
1,000	0,06324	0,06305	0,06286	0,06266	0,06247
1,173	0,05840	0,05822	0,05804	0,05786	0,05768
1,250	0,05655	0,05637	0,05620	0,05602	0,05585
1,330	0,05478	0,05461	0,05444	0,05427	0,05410
2,000	0,04444	0,04428	0,04412	0,04396	0,04380
5,000	0,02883	0,02859	0,02834	0,02809	0,02785
8,000	0,02451	0,02418	0,02385	0,02352	0,02319
10,000	0,02318	0,02280	0,02243	0,02205	0,02168
15,000	0,02170	0,02124	0,02077	0,02031	0,01985
20,000	0,02127	0,02075	0,02022	0,01970	0,01917

Daha önce tanımlanan biyoaktif özellikli cam malzemelerin ikinci grubu olan SRY grubunda, Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) ve Kalsiyum Oksit (K_2O) molar kesitleri sabittir. Fosfor Pentaoksit (P_2O_5) ile Stronsiyum Hidroksit (SrO) molar kesitleri değişkendir. İlk malzeme olan SR5 cam malzemelerinde P_2O_5 molar kesitinin azalmasına bağlı olarak SrO molar kesiti artırılması sonucu WinXCOM aracılığıyla Bölüm 3.2.2’de verilen enerjilerde

Tablo 7’de ki değerler elde edilmiştir. Ayrıca, şekil 4.2’de KAK değerlerinin gösterilen foton enerjilerine göre değişimi verilmiştir.

Tablo 7: SRY grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri.

E (MeV)	SR5	SR10	SR15
	XCOM	XCOM	XCOM
0,020	4.44143	4.69798	4.95453
0,060	0.32543	0.33787	0.35031
0,080	0.22382	0.22923	0.23465
0,122	0.16027	0.16183	0.16339
0,356	0.09963	0.09966	0.09969
0,511	0.08560	0.08559	0.08558
0,662	0.07632	0.07631	0.07629
1,000	0.06284	0.06282	0.06279
1,173	0.05802	0.05800	0.05798
1,250	0.05618	0.05616	0.05613
1,330	0.05443	0.05440	0.05438
2,000	0.04417	0.04416	0.04414
5,000	0.02875	0.02877	0.02879
8,000	0.02452	0.02456	0.02460
10,000	0.02323	0.02328	0.02333
15,000	0.02182	0.02189	0.02195
20,000	0.02145	0.02152	0.02160

Son olarak biyoaktif özellikli cam malzemelerin üçüncü grubu olan FPGZ grubunda, Fosfor Pentaoksit (P_2O_5), Kalsiyum Oksit (CaO), Sodyum Oksit (Na_2O) ve Kalsiyum Florür(CaF_2) molar kesitleri değişkendir. P_2O_5 , CaO ve Na_2O molar kesitleri azaltılırken, CaF_2 molar kesit değeri arttırılmıştır. Malzemeler bağlı tüm bileşenlerin molar kesitlerinin değişken olmasına

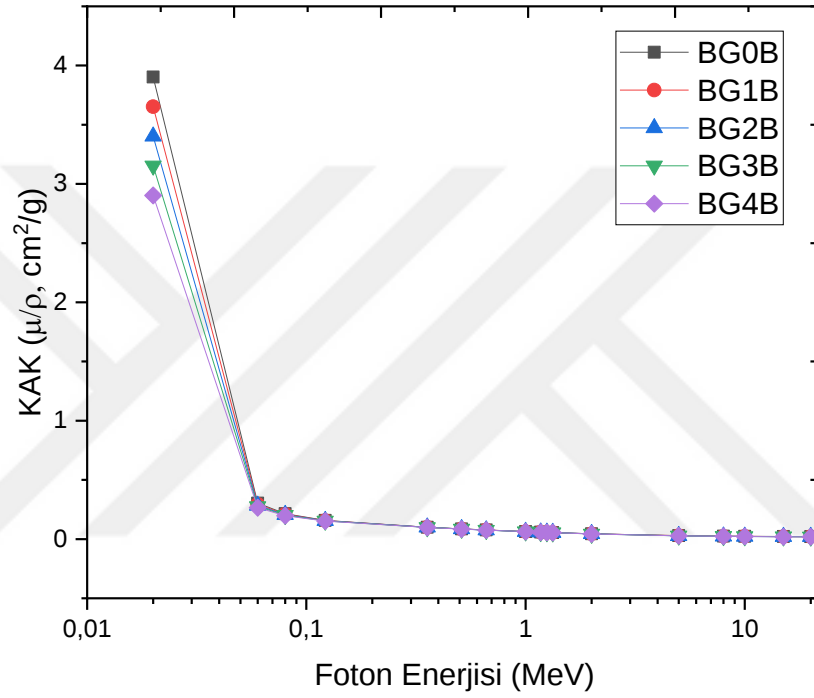
göre WinXCOM aracılığıyla Bölüm 3.2.2’de verilen enerjilerde Tablo 8’de ki değerler elde edilmiştir. Ayrıca, şekil 4.3’de KAK değerlerinin gösterilen foton enerjilerine göre değişimi verilmiştir.

Tablo 8: FPGZ grubu malzemelerin WinXCOM ile hesaplanan KAK (cm^2/g) değerleri

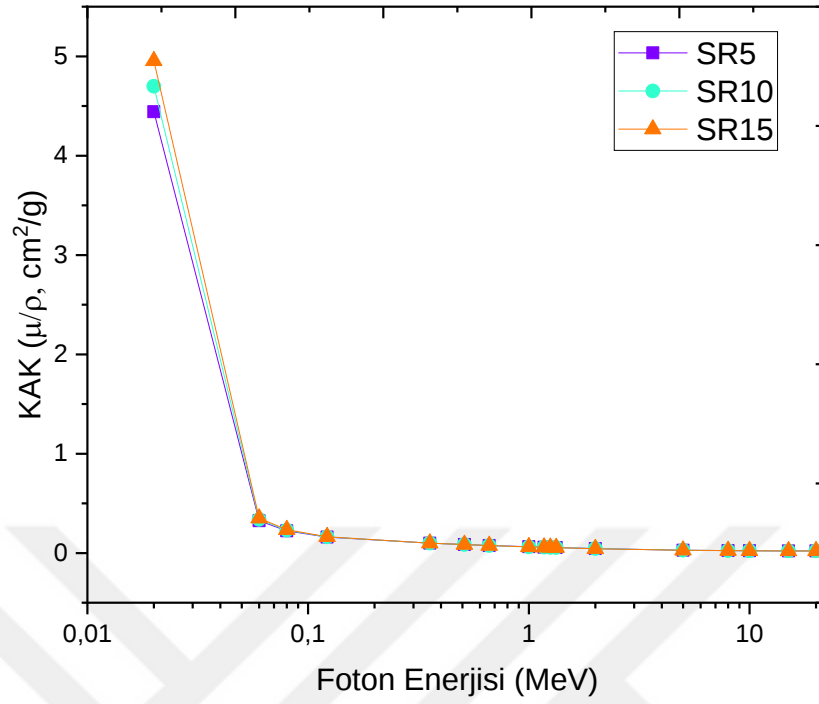
E (MeV)	FPG0	FPG1	FPG2	FPG3	FPG6
	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM	XCOM
0,020	3.90198	3.89630	3.89166	3.88645	3.88147
0,060	0.30214	0.30190	0.30170	0.30148	0.30126
0,080	0.21388	0.21376	0.21366	0.21355	0.21345
0,122	0.15749	0.15744	0.15739	0.15734	0.15730
0,356	0.09960	0.09958	0.09957	0.09955	0.09953
0,511	0.08565	0.08563	0.08562	0.08560	0.08559
0,662	0.07639	0.07638	0.07636	0.07635	0.07634
1,000	0.06291	0.06290	0.06289	0.06288	0.06287
1,173	0.05809	0.05808	0.05807	0.05806	0.05805
1,250	0.05624	0.05623	0.05622	0.05621	0.05620
1,330	0.05449	0.05448	0.05447	0.05446	0.05445
2,000	0.04420	0.04420	0.04419	0.04418	0.04417
5,000	0.02867	0.02866	0.02866	0.02865	0.02865
8,000	0.02437	0.02436	0.02435	0.02435	0.02434
10,000	0.02304	0.02303	0.02303	0.02302	0.02301
15,000	0.02156	0.02155	0.02155	0.02154	0.02153
20,000	0.02114	0.02113	0.02113	0.02112	0.02111

Genellikle yüksek yoğunluklu malzemeler daha yüksek atom sayısına sahiptir ve gama ışını koruması için tercih edilen bir malzeme olarak düşünülebilir. Bunun nedeni, KAK’ın esasen camların kimyasal bileşiğinin yanı sıra foton enerjisine de bağlı olmasıdır. KAK değerlerinde

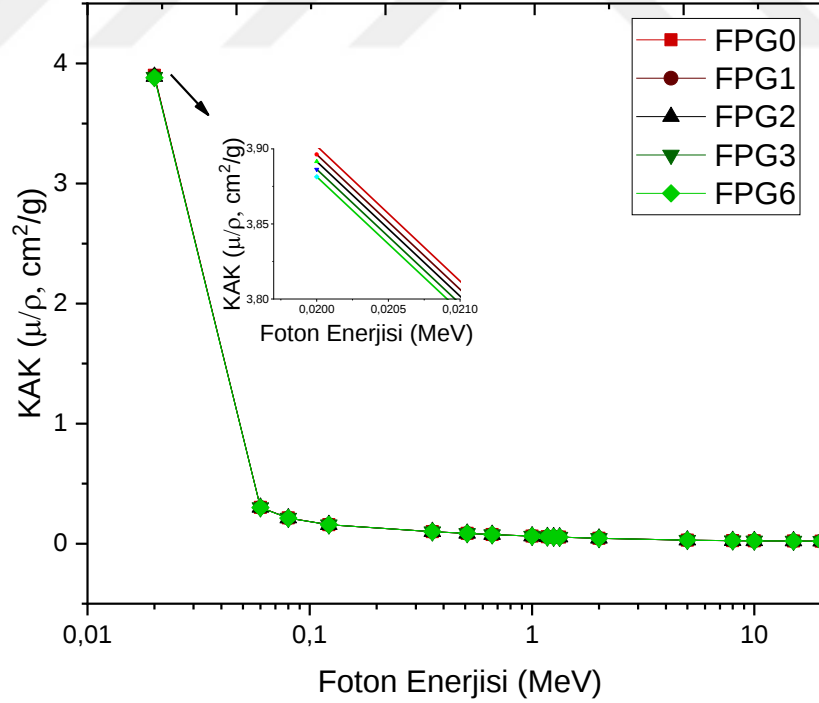
meydana gelen değişiklikler gama ışınlarının enerjisi için benzer özellikler gösterir. Genel olarak, üç farklı işlem, fotonların tüm enerji bölgesinde azaltmasına katkıda bulunur. Birincisi, 10-100 keV'lık düşük enerji bölgesinde önemli olan fotoelektrik etkidir. Bu işlemi takiben orta enerji bölgesinde yaklaşık 0.1-10 MeV arasında önemli olan Compton saçılmasıdır. Son olarak, 5 MeV enerjisinden daha yüksek enerji bölgesinde baskın olan çift oluşum etkileşimleridir. Bu enerji aralıkları malzeme tipleri için biraz farklılık gösterir.



Şekil 4.1: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri



Şekil 4.2: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri



Şekil 4.3: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için KAK değerleri

Şekil 4.1, şekil 4.2 ve şekil 4.3'ün analizinde 0,02 ile 0,6 MeV enerjileri arasındaki gama ışınlarının enerjisi arttıkça, her bir biyoaktif cam tipi için KAK değerlerinin hızla düştüğü açıkça görülebilir. Bu hızlı düşüşün sebebi Fotoelektrik etkisinin, çok düşük enerjili gama ışınlarında baskın olmasıdır. BGXB grubu malzemelerin düşük enerjili gama ışınlarında BG0B malzemesi en yüksek KAK değerine, BG4B malzemesi en düşük KAK değerine sahiptir. Bunun sebebi BG0B malzemesinde Silisyum Dioksit (SiO_2) molar kesitinin yani Si katkısının baskın olması ve toplam malzeme yoğunluğunun fazla olmasıdır. SRY grubu malzemelerin fotoelektrik etkinin baskın olduğu enerji değerlerinde SR15 malzemesinin en yüksek KAK değerine, SR5 malzemesinin ise en düşük KAK değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi SR15 malzemesinde molar kesitinin yani Sr atomunun katkısının baskın olmasıdır. Yoğunluğu düşük olmasına rağmen fotoelektrik tesir kesitinin Z^5 olması bu enerji aralığında SR15 malzemesinin KAK değerini daha yüksek olmasına sebep olduğu gözlenmiştir. FPGZ grubu malzemelerin düşük enerjili gama ışınlarında FPG0 malzemesi en yüksek KAK değerine, FPG6 malzemesinin en düşük KAK değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi FPG0 malzemesinde Fosfor Pentaoksit (P_2O_5) molar kesitinin yani P katkısının baskın olması ve toplam malzeme yoğunluğunun fazla olmasıdır.

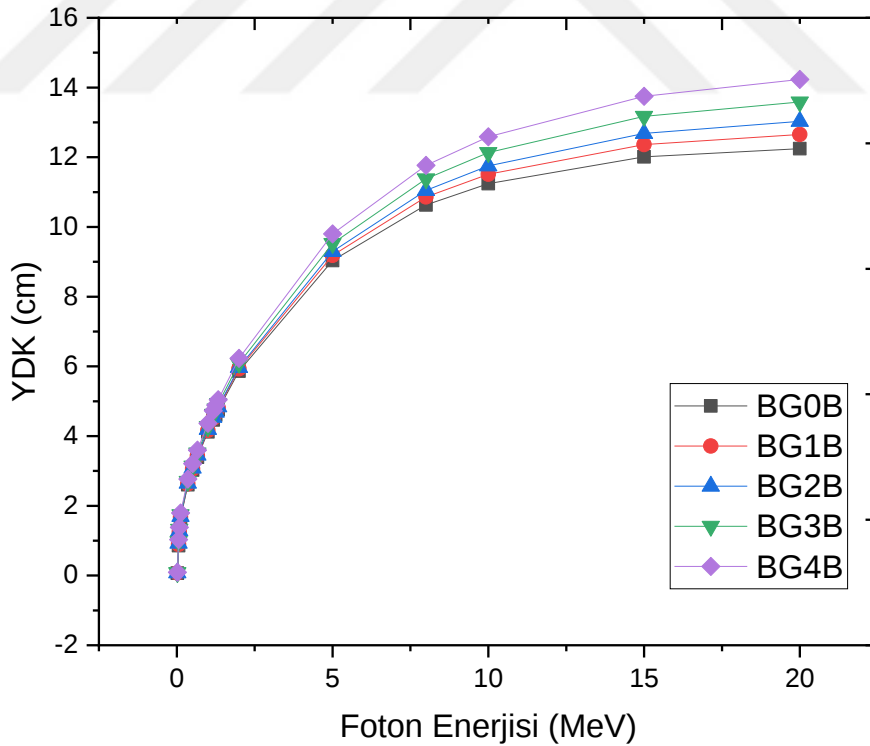
Compton saçılmasının baskın etkileşim olduğu 0,6 MeV'den sonraki orta seviye gama ışını enerjilerde tüm malzemeler için KAK değerleri yavaş yavaş azalır. Bunun nedeni, Compton saçılma kesiti etkileşen atomun atom sayısına Z bağlı olmasıdır. Yaklaşık 5 MeV'e kadar KAK değerleri sabit kalır.

5 MeV ve daha fazla enerjiye sahip yüksek gama ışınları bölgesinde çift oluşum baskındır. Bu enerjide her bir malzemenin KAK değeri en düşük seviyededir. Çift oluşum katsayısı Z^2 atom sayısı ile ilişkilidir. Tüm grup malzemeleri için çift oluşum bölgesinde KAK değerleri birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

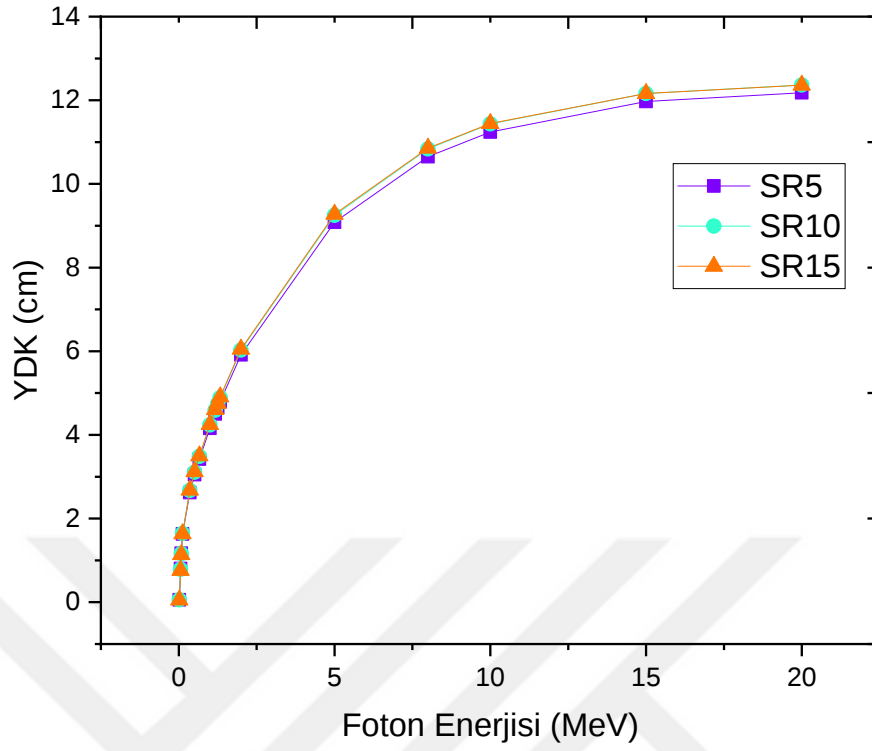
Tüm malzemeler incelendiğinde KAK değerinin malzeme yoğunluğu ile ilişkisi net olarak gözlenmiştir. Malzemelerin yoğunluklarına bakıldığında en yüksek yoğunluğa sahip BG0B malzemesinin KAK değeri de en yüksektir. Malzemelerin yoğunluğu azaldıkça, KAK değerleri de azalmaktadır.

4.2 TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK YDK, ODK VE OSY DEĞERLERİNİN TAYİNİ

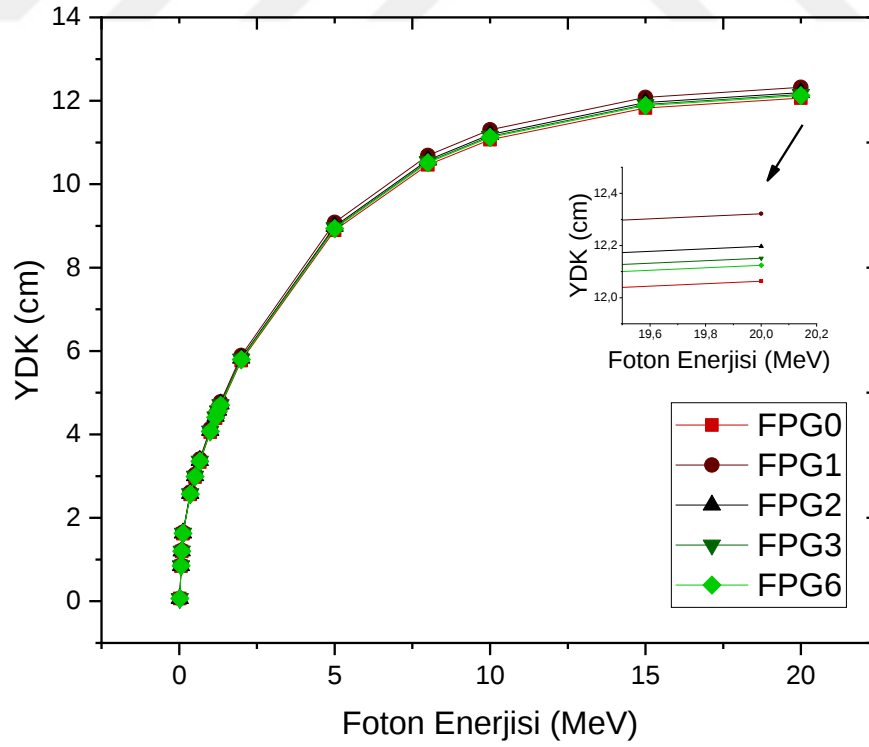
Bölüm 4.1’de kütle azaltma katsayıları verilen tüm biyoaktif özellikli amorf cam malzeme grupları için yarı değer kalınlığı, onda bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol parametreleri incelenecektir. Şekil 4.4’de BGXB grubu malzemelerinin YDK dağılımları verilmiştir. Şekil 4.5’da SRY grubu malzemelerinin YDK dağılımları verilmiştir. Şekil 4.6’de FPGZ grubu malzemelerin YDK dağılımı verilmiştir. Şekil 4.7’de BGXB grubu malzemelerinin ODK dağılımları verilmiştir. Şekil 4.8’da SRY grubu malzemelerinin ODK dağılımları verilmiştir. Şekil 4.9’da FPGZ grubu malzemelerin ODK dağılımları verilmiştir. Şekil 4.10’de BGXB grubu malzemelerinin OSY dağılımları verilmiştir. Şekil 4.11’da SRY grubu malzemelerinin OSY dağılımları verilmiştir. Şekil 4.12’de FPGZ grubu malzemelerin OSY dağılımları verilmiştir.



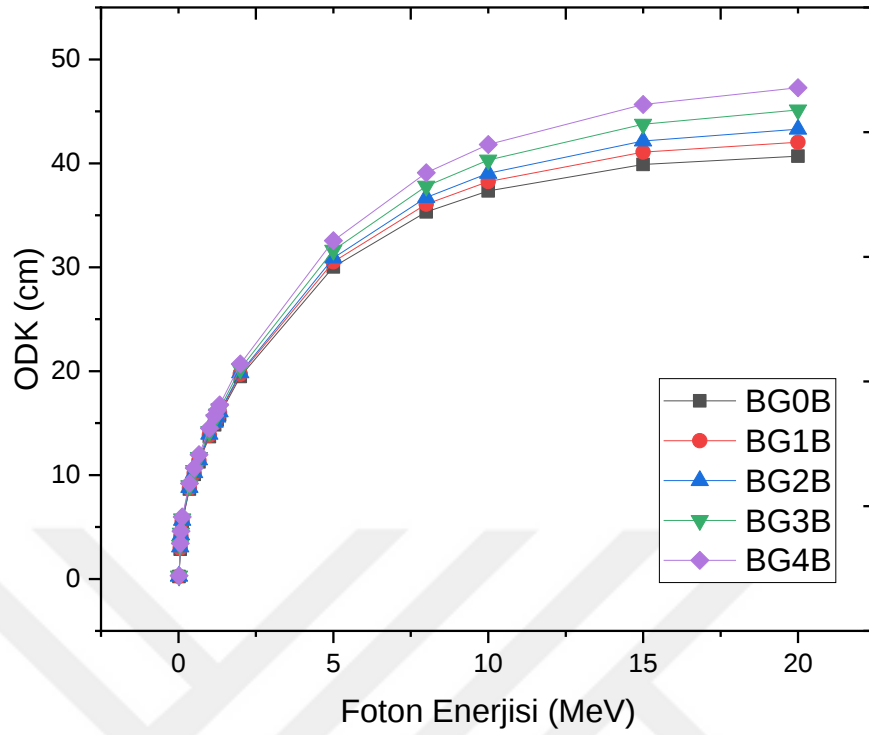
Şekil 4.4: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri



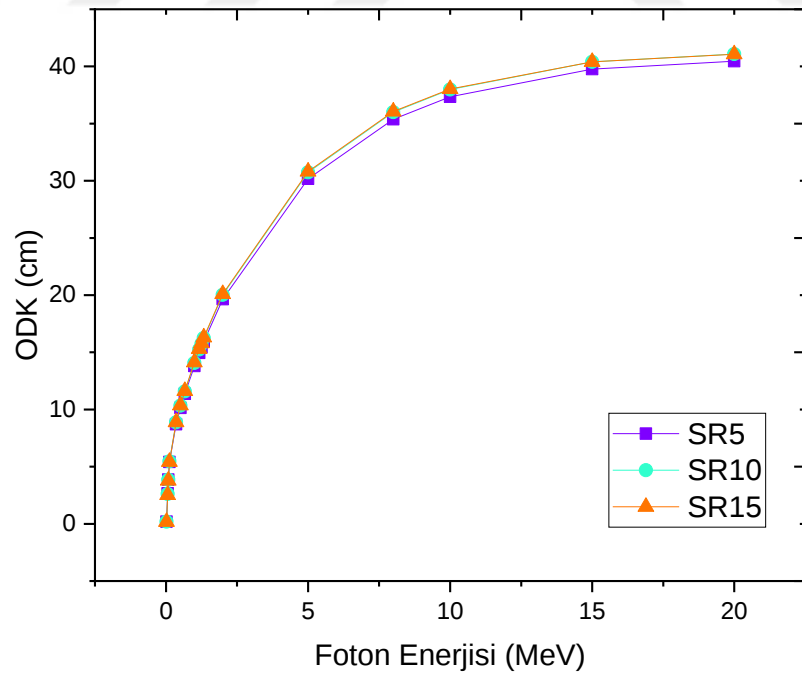
Şekil 4.5: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri



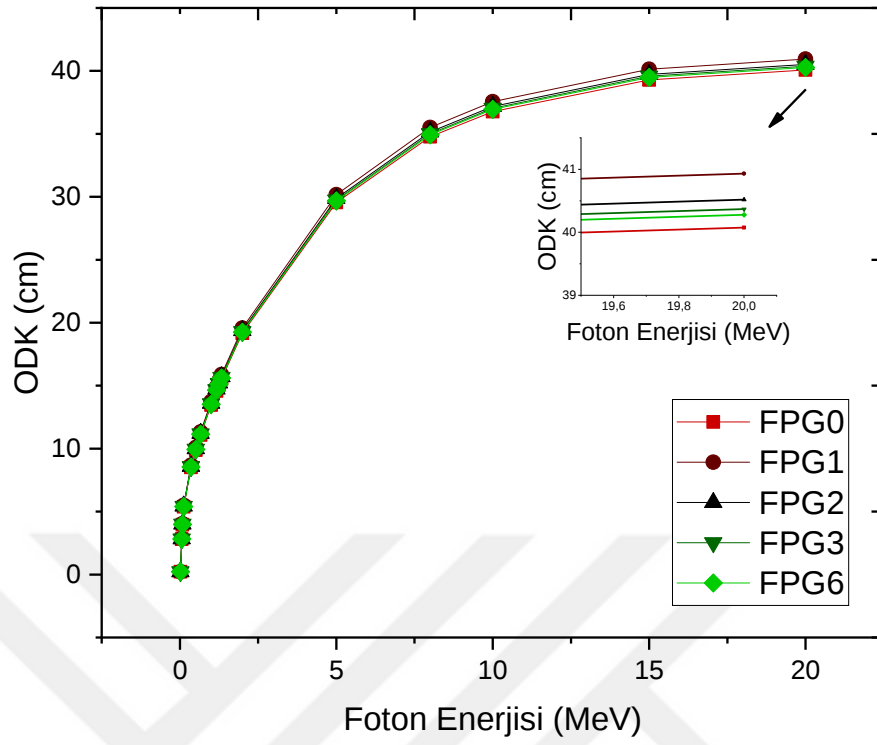
Şekil 4.6: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için YDK değerleri



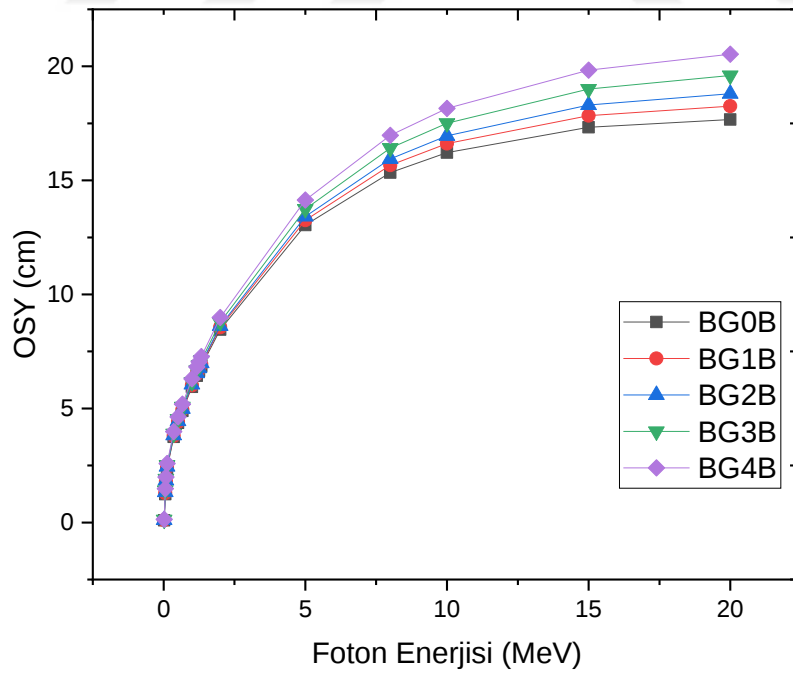
Şekil 4.7: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri



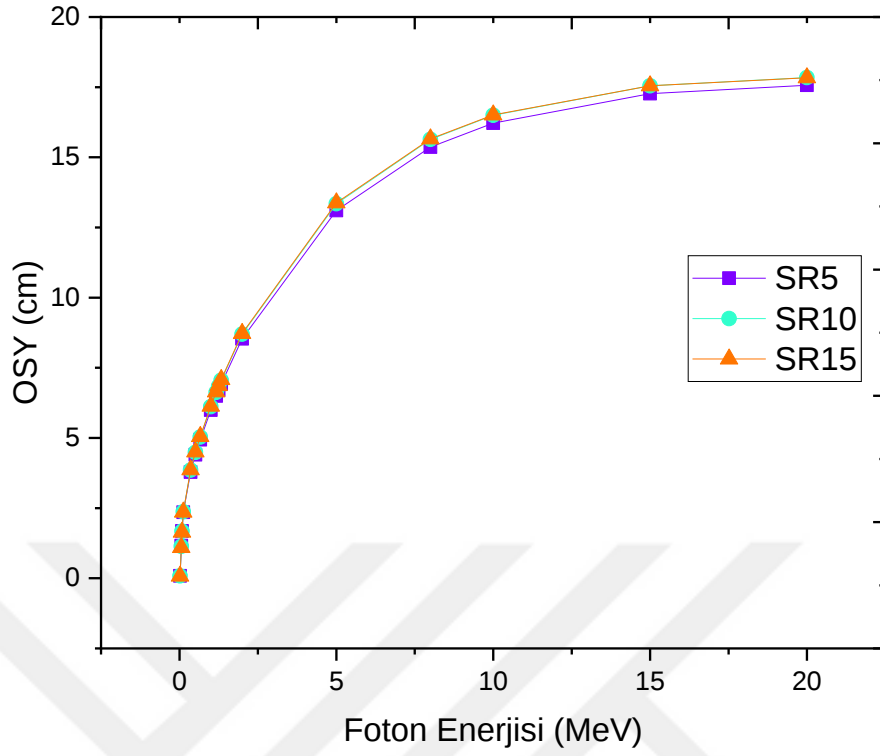
Şekil 4.8: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri



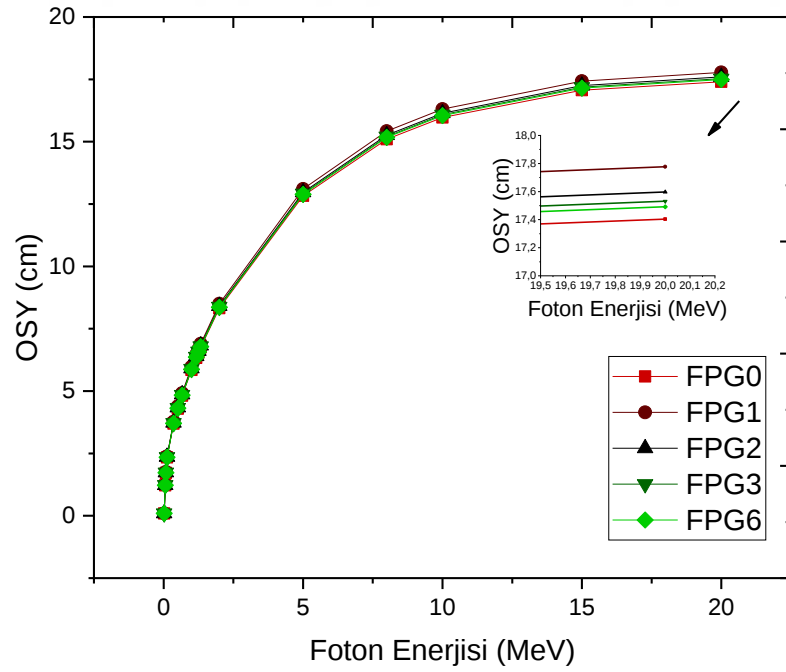
Şekil 4.9: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için ODK değerleri



Şekil 4.10: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri



Şekil 4.11: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri



Şekil 4.12: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için OSY değerleri

Şekil 4.4'den şekil 4.12'ye kadar tüm şekillerin analizinde düşük enerjili gama ışınlarının 0,02 MeV ile 0,6 MeV tüm cam gruplarını içeren malzemelerde YDK, ODK ve OSY değerleri neredeyse benzerdir. Bu enerji aralığında tüm malzemelerin YDK, ODK ve OSY değerleri $\pm 0,1$ değişmektedir. Maruz kalınan gama ışının enerjisi arttıkça YDK, ODK ve OSY değerleri de artmaktadır. Bu artış düşük enerji bölgesinde yavaş gerçekleşmektedir. BGXB grubu malzemelerin düşük enerjili gama ışınlarında BG4B malzemesi en yüksek YDK değerine, BG0B ve BG1B malzemeleri en düşük YDK değerine sahiptir. Bunun sebebi BG0B malzemesinde Silisyum Dioksit (SiO_2) molar kesitinin yani Si katkısının baskın olması ve toplam malzeme yoğunluğunun fazla olmasıdır. SRY grubu malzemelerin fotoelektrik etkinin baskın olduğu enerji değerlerinde SR5 malzemesinin en yüksek YDK değerine, SR15 malzemesinin ise en düşük YDK değerine sahip olduğu gözlenmiştir. FPGZ grubu malzemelerin düşük enerjili gama ışınlarında FPG1 malzemesi en yüksek YDK değerine, FPG6 malzemesinin en düşük YDK değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi FPG1 malzemesinde Fosfor Pentaoksit (P_2O_5) molar kesitinin yani P katkısının baskın olması ve toplam malzeme yoğunluğunun fazla olmasıdır. Tüm bu durumlar ODK ve OSY değerleri içinde paraleldir.

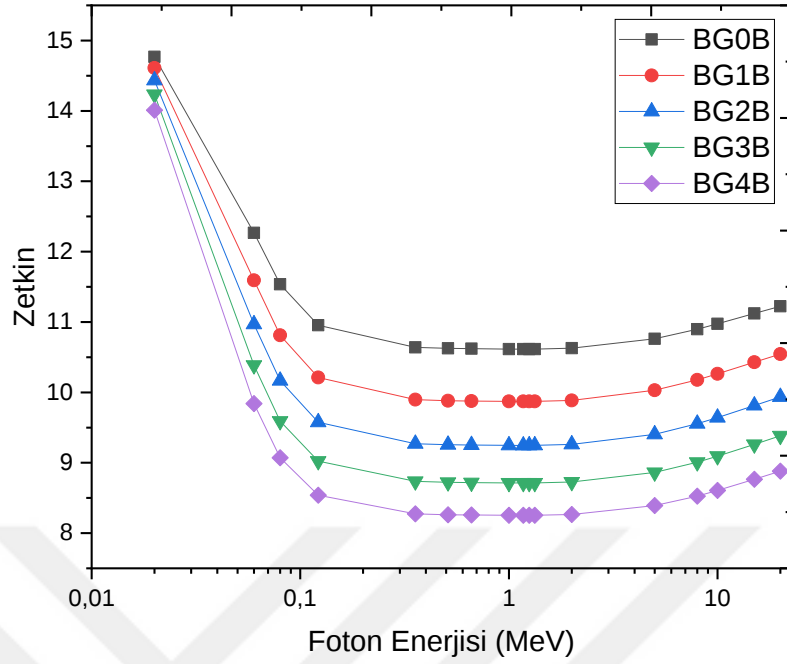
Orta enerjiye sahip gama ışınları için tüm malzemelerde YDK, ODK ve OSY değeri artan enerji değerine göre artmakta olduğu gözlemlenmiştir. 0,6 MeV ile 5 MeV aralığında YDK, ODK ve OSY değerlerinin artması gelen gama ışınının malzeme içinde soğurulmadan daha fazla yol alacağını göstermektedir. Bu sebeple malzeme kalınlığı arttırılmalıdır. 5 MeV gama ışını referans olarak alınır, BGXB grubu cam malzemelerinde BG4B malzemesi en yüksek YDK değerine sahiptir. BG0B en düşük YDK değerine sahiptir. Bu da BG0B malzemenin en iyi zırhlayıcı malzeme olduğunu göstermektedir. SRY grubu cam malzemeler aynı enerji için incelendiğinde SR5 en yüksek YDK değerine sahiptir. SR15 en düşük YDK değerine sahiptir. FPGZ grubu cam malzemeler incelendiğinde tüm cam malzemelerin YDK değerleri birbirine çok yakındır. Bu durum cam malzeme yoğunluklarının birbirine çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu durumlar ODK ve OSY değerleri içinde paraleldir.

Yüksek enerjili gama ışınlarının YDK, ODK ve OSY değerleri incelendiğinde diğer enerji aralıklarına göre malzeme karakterizasyonu daha rahat yapılmaktadır. Yüksek enerjiye sahip yani 5 MeV'den yüksek gama ışınlarının malzeme içinde nüfuz etme özellikleri çok fazladır.

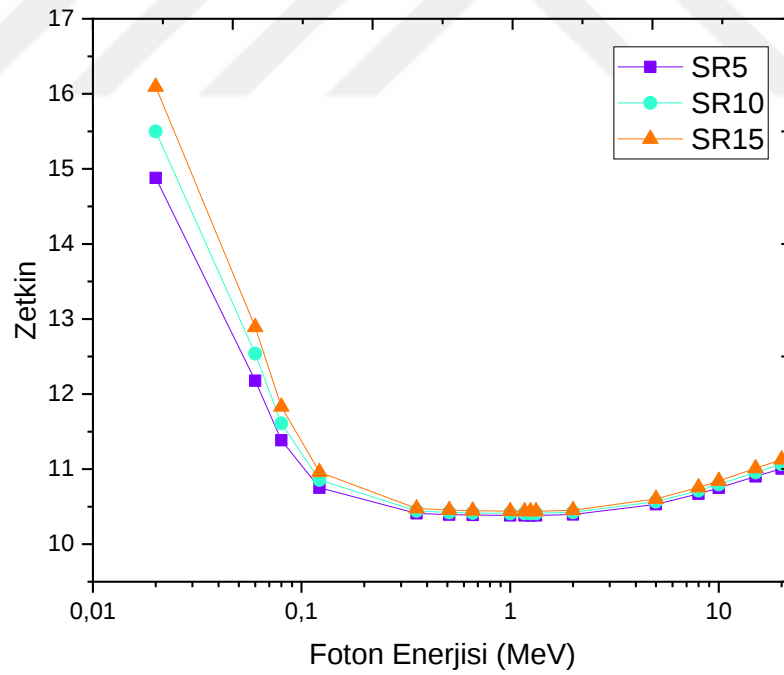
Bu enerji aralığında tüm malzemelerin YDK, ODK ve OSY değerleri çok hızlı bir şekilde artmaktadır. BGXB grubu cam malzemelerinde BG4B malzemesi en yüksek YDK değerine sahiptir. BG0B en düşük YDK değerine sahiptir. Bu da BG0B malzemenin en iyi zırhlayıcı malzeme olduğunu göstermektedir. SRY grubu cam malzemeler aynı enerji için incelendiğinde SR5 en yüksek YDK değerine sahiptir. SR15 en düşük YDK değerine sahiptir. FPGZ grubu cam malzemeler incelendiğinde tüm cam malzemelerin YDK değerleri birbirine çok yakındır. Bu durum cam malzeme yoğunluklarının birbirine çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu durumlar ODK ve OSY değerleri içinde paraleldir.

4.3 TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK Z_{ETKİN} VE N_{ETKİN} DEĞERLERİNİN TAYİNİ

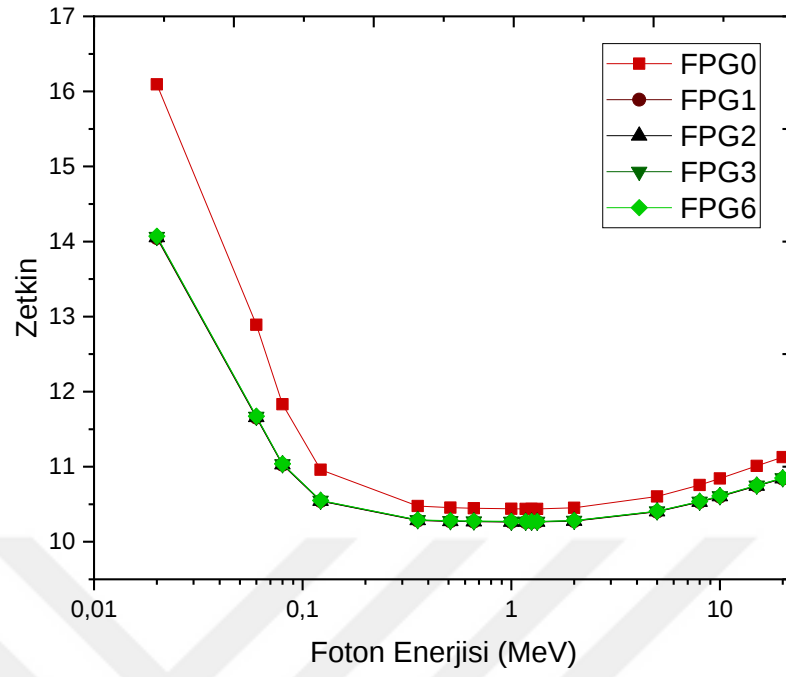
Bu bölümde KAK, YDK, ODK ve OSY değerleri incelenen tüm biyoaktif cam malzeme gruplarının Etkin atom numarası (Z_{etkin}) ile Etkin elektron yoğunluğu (N_{etkin}) değerleri incelenecektir. Şekil 4.13’de BGXB grubu malzemelerinin Z_{etkin} değerleri verilmiştir. Şekil 4.14’de SRY grubu malzemelerinin Z_{etkin} değerleri verilmiştir. Şekil 4.15’de FPGZ grubu malzemelerinin Z_{etkin} değerleri verilmiştir. Şekil 4.16’da BGXB grubu malzemelerinin N_{etkin} değerleri verilmiştir. Şekil 4.17’de SRY grubu malzemelerinin N_{etkin} değerleri verilmiştir. Şekil 4.18’de FPGZ grubu malzemelerinin N_{etkin} değerleri verilmiştir.



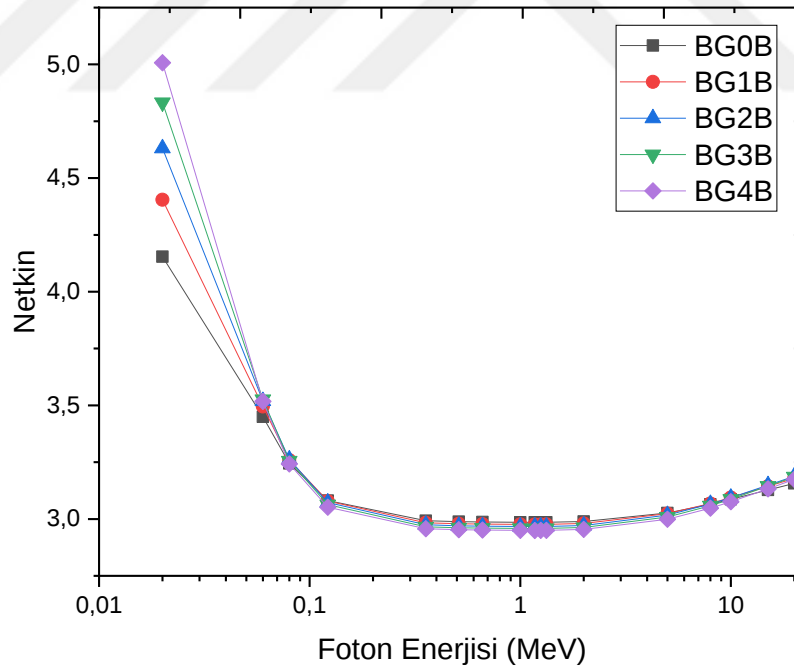
Şekil 4.13: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri



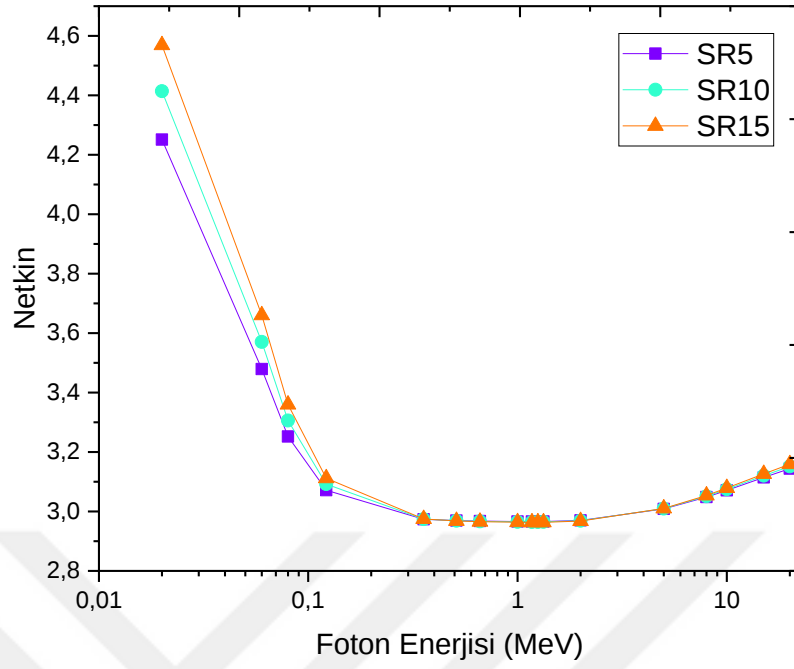
Şekil 4.14: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri



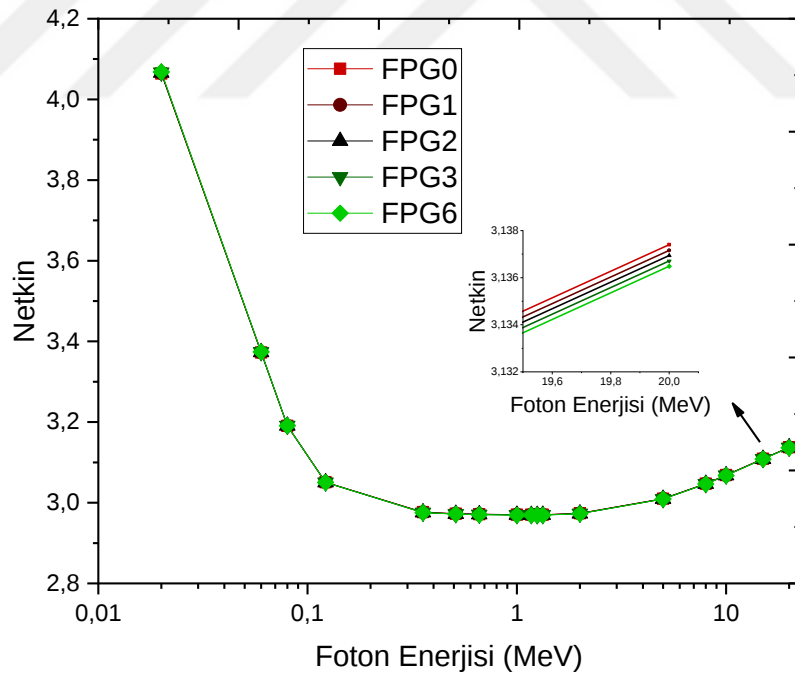
Şekil 4.15: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için Z_{etkin} değerleri



Şekil 4.16: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri



Şekil 4.17: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri



Şekil 4.18: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin logaritmik olarak gösterilmiş 0,02 – 20 MeV enerjili gama ışınları için N_{etkin} değerleri

Gama ışınlarının enerjisine bağlı olarak Z_{etkin} ve N_{etkin} değerlerinin değişimi, tüm cam malzemesi grupları için 0,02 MeV enerjiden 0.6 MeV enerjisine kadar hızla azalmıştır. Düşük enerjili gama ışınlarındaki bu durum, enerji arttıkça azalan KAK değerlerine bağlıdır. Şekil 4.13’de Fotoelektrik etkinin baskın olduğu bu enerji aralığında BGXB grubu cam malzemelerindeki BG0B malzemesi en yüksek Z_{etkin} değerine sahiptir. BG4B en düşük Z_{etkin} değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni fotoelektrik saçılma kesiti atom sayısının Z^4 katına bağlı olmasıdır. Şekil 4.14’de SRY grubu incelendiğinde en yüksek Z_{etkin} değeri SR15 malzemesi için, en düşük Z_{etkin} değeri SR5 için gözlenmiştir. Şekil 4.15’de FPGZ grubunda en yüksek Z_{etkin} değeri FPG0 malzemesi için, en düşük Z_{etkin} değeri için diğer tüm malzemeler hemen hemen yakın değer verdiği gözlenmiştir.

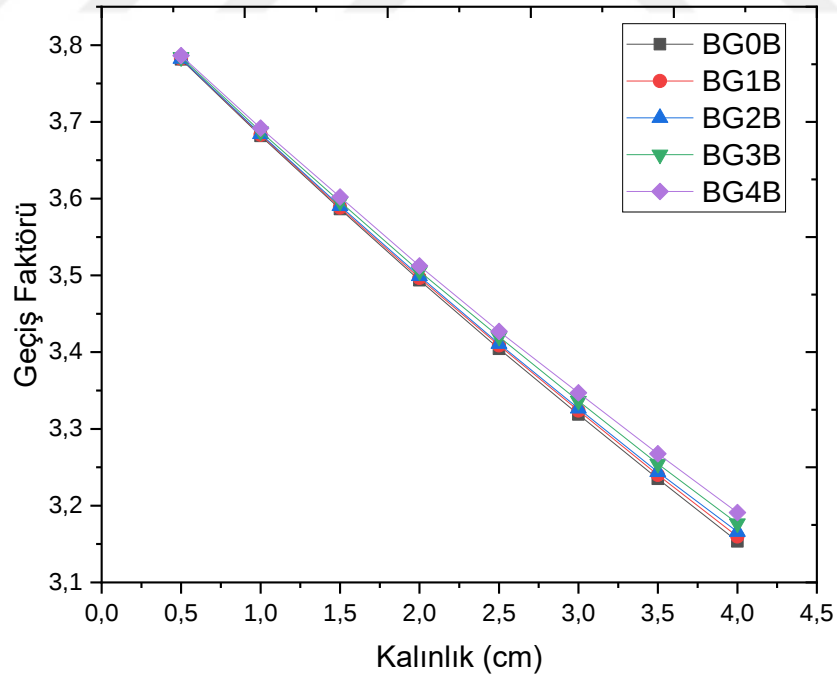
Cam malzemelerin Z_{etkin} değerleri orta enerji seviyesinde neredeyse sabit oranda azalmaktadır. Azalış sonrası 5 MeV enerjiye sahip gama ışınları için sabit şekilde sonuç vermektedir. Çünkü, Compton saçılma kesiti atom numarası katsayısı Z^2 ’ye bağlıdır. BGXB grubu cam malzemeleri tüm malzemeler için 0,6 MeV enerjiden 5 MeV enerjiye kadar düşük bir artış göstermiştir. Bu enerji aralığında BG0B en yüksek Z_{etkin} değerine sahiptir. BG4B en düşük Z_{etkin} değerine sahiptir. SRY grubu cam malzemeleri enerji seviyesi arttıkça Z_{etkin} değerleri birbirlerine yaklaşmıştır. Çok küçük farklarla SR15 malzemesi en yüksek Z_{etkin} değerine, SR5 malzemesi en düşük Z_{etkin} değerine sahip olduğu gözlenmiştir. FPGZ grubu cam malzemelerde FPG0 hariç diğer tüm malzemeler benzer sonuç vermiştir. FPG0 malzemesinin Z_{etkin} değeri en yüksek olandır.

Yüksek enerji seviyelerinde her bir cam malzemesi grubuna ait biyoaktif cam malzeme için Z_{etkin} değerinde bir miktar artış görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek enerjili gama ışınlarının malzeme etkileşiminde baskın olması ve çift oluşum saçılma kesitinin atom numarası Z^2 ’nin karesine yakın olmasıdır. BGXB grubu cam malzemeleri tüm malzemeler için 5 MeV enerjiden daha yüksek enerjilerde küçük bir artış göstermiştir. Bu enerji aralığında BG0B en yüksek Z_{etkin} değerine sahiptir. BG4B en düşük Z_{etkin} değerine sahiptir. SRY grubu cam malzemeleri enerji seviyesi arttıkça Z_{etkin} değerleri birbirlerine yaklaşmıştır. Çok küçük farklarla SR15 malzemesi en yüksek Z_{etkin} değerine, SR5 malzemesi en düşük Z_{etkin} değerine sahip olduğu gözlenmiştir. FPGZ grubu cam malzemelerde FPG0 hariç diğer tüm malzemeler benzer sonuç vermiştir. FPG0 malzemesinin Z_{etkin} değeri en yüksek olandır.

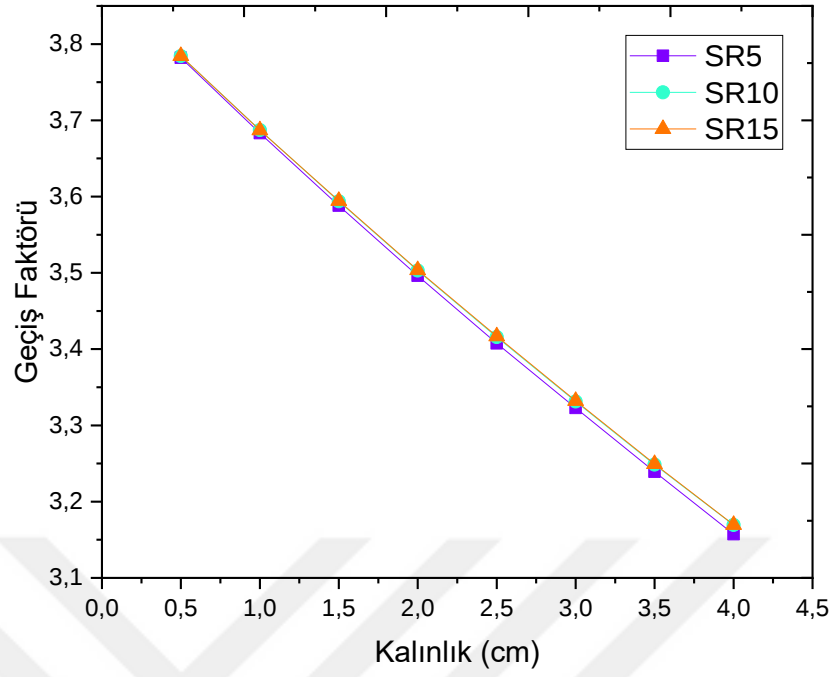
Radyasyon madde etkileşimlerinde, Z_{etkin} ile N_{etkin} değişimleri birbirine benzerdir. Tüm cam malzeme gruplarında düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru N_{etkin} değerleri hızlı bir düşüş arkasından orta enerjilerde sabit bir süreklilik ve yüksek enerjili gama ışınlarında bir miktar artış göstermektedir. Şekil 4.16'da gösterildiği gibi, N_{etkin} değerleri BGXB grubu camlar için ortalama atom ağırlığından bağımsızdır ve en büyük atom ağırlıkları olan BG0B en küçük N_{etkin} değerlerine sahiptir. SRY grubu malzemeleri için N_{etkin} değerleri incelendiğinde SR15 en yüksek, SR5 en düşük N_{etkin} değerlerine sahiptir. FPGZ grubu malzemeler incelendiğinde N_{etkin} değerleri her enerji için birbirilerine çok yakındır.

4.4 TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK GEÇİŞ FAKTÖRLERİNİN MCNP4C PROGRAMIYLA TAYİNİ

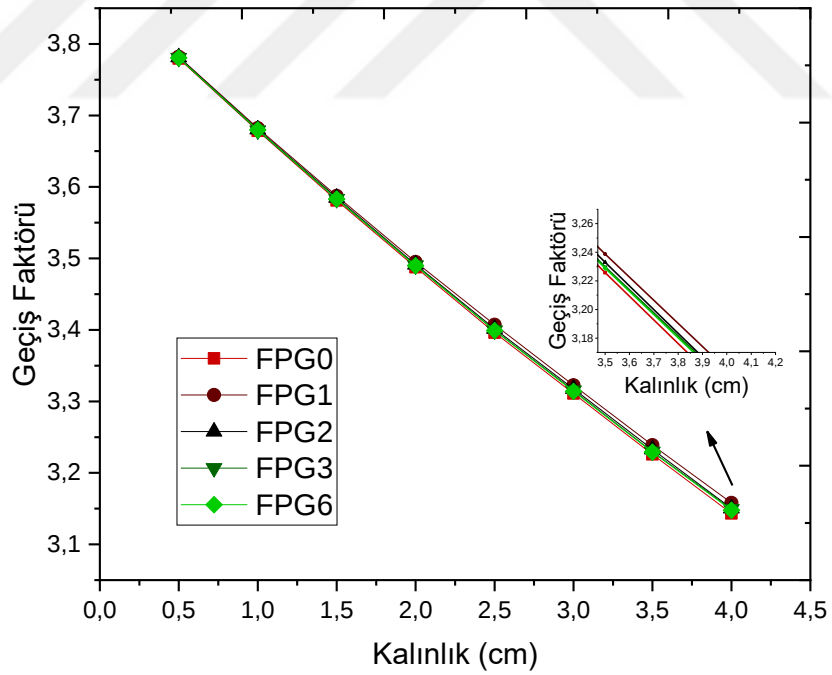
Bu bölümde KAK, LAK, YDK, ODK, OSY, Z_{etkin} ve N_{etkin} değerleri incelenen tüm biyoaktif özellikli cam malzeme gruplarının MCNP4C bilgisayar programı aracılığıyla geçiş faktörü değerleri incelenecektir. Geçiş faktörü zırhlayıcı malzeme kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir. Şekil 4.19'da BGXB grubu malzemelerinin geçiş faktörü değerleri verilmiştir.



Şekil 4.19: BGXB grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri



Şekil 4.20: SRY grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri

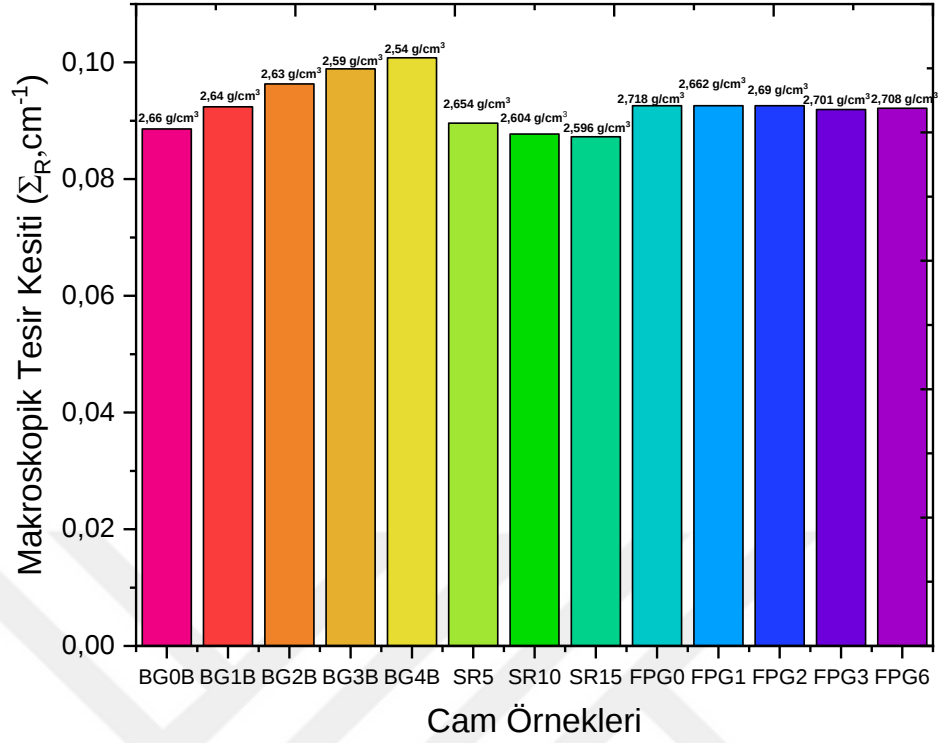


Şekil 4.21: FPGZ grubu biyoaktif özellikli amorf cam malzemelerin kalınlığına bağlı olarak geçiş faktörünün değerleri

2 MeV sabit enerjide gama ışını yayınlayan noktasal bir foton kaynağı simule edilerek malzeme kalınlığı 0,5 cm'den 4 cm'ye kadar arttırılarak yapılan geçiş faktörü simülasyonunda tüm cam malzeme grupları için düşük kalınlıktaki malzemelerin benzer geçiş faktörünü değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Malzeme kalınlığı arttırıldığında tüm malzemeler için geçiş faktörü değeri azalmaktadır. Şekil 4.19'da BGXB malzeme grubu incelendiğinde en düşük geçiş faktörüne sahip malzemenin BG0B olduğu en yüksek geçiş faktörüne sahip malzemenin BG4B olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, BG0B malzemesi kalınlıklar arttırıldığında en iyi zırhlayıcı malzeme olduğu söylenebilir. SRY grubu cam malzemeler içinde SR5 en düşük, SR15 en yüksek geçiş faktörüne sahip olduğu gözlenmiştir. FPGZ grubu incelemesinde FPG0 cam malzemesinin en düşük geçiş faktörüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Daha önce WinXCOM programı ile yapılan KAK, LAK, YDK, ODK ve OSY ile Z_{etkin} ve N_{etkin} değerleriyle mukayese edildiğinde, simülasyon beklenen davranışı sergilemiştir. Düşük geçiş faktörü, radyasyon zırhlamasında daha fazla fotonun malzemedede soğurulduğu göstermektedir.

4.5 TÜM İNCELENEN CAM MALZEME GRUPLARININ TEORİK OLARAK MAKROSKOBİK TESİR KESİTİNİN TAYİNİ

Düşük, orta ve yüksek enerjili gama ışınlarına karşı radyasyon zırhlama davranışları incelenen üç gruba ayrılmış biyoaktif özellikli amorf camların. Nötron parçacığını zırhlama davranışı bu bölümde incelenecektir. Şekil 4.22'de tüm cam malzemelere karşılık makroskopik tesir kesiti verilmiştir.



Şekil 4.22: Tüm cam örneklerine karşılık makroskopik tesir kesitleri.

Şekil 4.22 incelendiğinde ilk malzeme grup olan BGXB malzemelerinde sabit bir artış göstermektedir. BG0B malzemesi makroskopik tesir kesiti en yüksek olan malzemedir. Buna karşılık BG4B malzemesi en düşük makroskopik tesir kesitine sahip olan malzemedir. Makroskopik tesir kesiti düşük olan malzeme nötron zırhlamasında daha verimli olduğu söylenebilir. İkinci cam malzeme grubu olan SRY grubunda makroskopik tesir kesiti değerleri hemen hemen değişmemiştir. Ufak bir azalış göstermektedir. SR5 malzemesi en yüksek, SR15 malzemesi en düşük makroskopik tesir kesiti değerine sahiptir. Üçüncü ve son grup olan FPGZ grubu malzemeleri incelendiğinde tüm cam malzemelerin makroskopik tesir kesiti birbirilerine çok yakındır. FPG0 en yüksek makroskopik tesir kesitine sahiptir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında, farklı malzemelerin gama ve nötron radyasyonu karşısında davranışlarının incelenmesi ve yorumlanmasına yönelik olarak teorik bir çalışma yapılması hedeflenmiştir. Farklı radyasyon tipleri bulunmasına karşın, radyasyon zırhlaması açısından malzemeye nüfuz edebilen iyonlaştırıcı radyasyon daha büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, öncelikle, malzemeye nüfuz etme özelliği fazla olan gama ışınlarıyla çalışılması benimsenmiştir. Buna karşın nötronların madde ile etkileşimi farklı olup ayrıca değerlendirilmeleri gerekli görülmektedir. Dolayısı ile de bu yüksek lisans tez çalışmasında malzemelerin gama ve nötron parçacığı radyasyonu karşısındaki davranışlarının incelenmesi, simüle edilerek radyasyon zırhlaması çerçevesinde irdelenmesi yapılmıştır.

Gama ışını radyasyonu ile çalışmayı simüle etmek için nükleer teknolojide önemli bir program olan MCNP Monte Carlo N Particle programıyla çalışılmıştır. Monte Carlo simülasyon metoduna bağlı olarak 1940 yılından itibaren nükleer güç ve enerji için kullanılan bir simülasyon uygulamasıdır. Ayrıca kullanılan malzemelerin KAK değerlerini tayin etmek için WinXCOM programı kullanılmıştır.

Malzeme olarak biyoaktif özellikli amorf cam malzemeler tercih edilmiştir. Fosfor, kalsiyum ve sodyum içeren biyoaktif cam malzemeler. Bor, silisyum, stronsiyum, potasyum ve florür gibi elementler ile katkılanmıştır. Zira nükleer teknolojide zırhlama önemli bir konu olup, malzeme özellikleri ile yakından ilişkilidir. Son dönemlerde, gama zırhlamasına ilişkin günümüze kadar yaygın olarak kullanılmış olan kurşunun toksik etkisi ve yaratabileceği çevre sorunları ile ilişkili olarak kullanılmaması AB'nin RoHS uygulamasında kısıtlanması ve kullanımının terk edilmesi hususunda bulunmaktadır. Bu çerçevede, bu yüksek lisans çalışmasında, gama radyasyon zırhlamasında kurşuna alternatif olabilecek biyoaktif özellikli cam malzemeler ile çalışılması benimsenmiştir. Öte yandan, nükleer reaktör teknolojisinde nötronlar da büyük önem taşımaktadır. Bu hususta da bor katkılı biyoaktif özellikli amorf cam malzemeler büyük önem taşımaktadır.

Yapılan literatür çalışması sonucunda daha önce farklı fiziksel, kimyasal özellikleri incelenen biyoaktif cam malzemeler tercih edilmiştir. Bu balamda Bölüm 3.1'de verilen Tablo 3: Tablo 4: ve Tablo 5'de ayrıntılı olarak bileşenlerin molar kesitleri ve yoğunlukları verilmiştir.

Üç gruba ayrılan biyoaktif cam malzemelerin ilk grup BGXB olarak adlandırılmıştır. BGXB grubunda beş malzeme örneği mevcuttur. SiO_2 ve B_2O_3 katkılandırılması ile değişen yapıya göre cam malzemelerin kimlikleri literatürden alınmıştır. SRY olarak adlandırılan ikinci grupta üç adet cam malzeme mevcuttur. K_2O ve SrO katkılandırılmasıyla malzemelerin kimlikleri literatürden alınmıştır. FPGZ olarak adlandırılan son grupta beş adet cam malzeme mevcuttur. CaF_2 katkılandırılmasıyla oluşan grupta malzemenin kimlikleri literatürden alınmıştır.

KAK değerleri WinXCOM programı aracılığıyla hesaplanan tüm cam malzemelerin bilinen yoğunluklarına göre teorik olarak bu çalışmaya özgü LAK, YDK ve ODK değerleri hesaplanmıştır. YDK, malzemelerin zırhlama özelliğini betimleyen önemli parametre olduğundan hareketle malzemelerin radyasyon zırhlama etkinliğinin değerlendirilmesi için esas itibarıyla YDK değerleri göz önüne alınmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, çalışılan biyoaktif özellikli amorf cam malzemeler ile ilgili elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. YDK değeri artan enerjiye göre ne kadar düşük olursa, malzemenin radyasyon zırhlama özelliği o kadar iyi olduğu bilinmektedir.

BGXB grubu cam malzemelerin YDK değerleri (Bölüm 4.2- şekil 4.4) incelendiğinde BG0B malzemesi en düşük YDK değerine sahip olduğu, bu bağlamda yapılan bu tez çalışmasına özgü olarak BGXB grubunda en iyi zırhlayıcı malzeme olduğu gözlemlenmiştir. BG0B malzemesi biyoaktif cam özelliğine SiO_2 katkılandırılması B_2O_3 katkılı yapıya göre daha iyi zırhlayıcı özellik göstermiştir. Malzeme yoğunluğu daha fazla olan SiO_2 katkılı malzemenin, enerjiye göre madde etkileşimlerinde fotoelektrik, Compton ve çift oluşum tesir kesitlerinde atom numarasına bağlı olarak da daha iyi bir zırhlayıcı olduğu söylenebilir.

SRY grubu cam malzemeler YDK değerleri (Bölüm 4.2- şekil 4.5) incelendiğinde K_2O ve SrO bileşenleri ile katkılandırılmış olduğu ve P_2O_5 molar kesitinin oranında değişimler yapıldığı için, enerji değerlerine ve yoğunluklarına göre farklı davranışlar gözlemlenmiştir. Hacimsel yoğunluğu en fazla olan SR5 malzemesi fotoelektrik etkinin baskın olduğu 0,02 MeV ile 0,356 MeV enerji seviyelerinde beklenenin aksine diğer malzemelere göre yüksek YDK değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu enerji seviyesinde tüm cam malzeme değerleri hemen hemen birbirlerine yakındır. Bunun sebebi WinXCOM uygulamasında bileşiğin %100 saflıkla hazırlanması sonucu bileşik yoğunluklarının en hassas şekilde hazırlanması ve referans alınan biyoaktif cam malzemelerin yoğunluklarında belli bir hata payı olmasıdır. Ayrıca, fotoelektrik etkinin baskın olduğu enerji bölgesinde radyasyon madde etkileşiminde tesir kesitinin atom

numarasının Z^5 mertebesinde olmasıdır. SrO katkısı yüksek olan SR15 malzemesi düşük enerjilerde daha iyi zırhlayıcı özellik göstermiştir. Uygulanan enerji arttıkça Compton saçılması ve çift oluşum etkileşimleri baskın olmakta ve beklenildiği gibi SR5 malzemesinin YDK değeri en düşük bu sebeple de bu çalışmaya özgü en iyi zırhlayıcı malzeme olduğu söylenebilir.

FPGZ grubu cam malzemeler YDK değerleri (Bölüm 4.2 - şekil 4.6) incelendiğinde biyoaktif cam bileşenlerine CaF_2 ile katkılanılmıştır. Bileşen yüzdeleri çok küçük farklarla değişken olan tüm cam malzemeler için YDK değerleri hemen hemen birbirlerine yakın değerdedir. En yüksek yoğunluğa ve en yüksek P_2O_5 katkısı olan FPG0 malzemesi en düşük YDK değerine sahiptir. Bu çalışmaya özgü olarak en iyi zırhlayıcı malzemedir. YDK kalınlıklarına göre CaF_2 katkılanılmasının cam malzeme zırhlayıcı özelliğinde olumlu bir etkisi gözlemlenmemiştir.

Bu çalışmaya özgü YDK değerleri incelenen tüm cam malzemeler için 2 MeV enerji seviyesinde en iyi zırhlayıcı malzeme FPG0 malzemesidir.

YDK değerlerine benzer sonuçlar, ODK ve OSY parametreleri için de gözlemlenmiştir.

YDK değerlerine göre zırhlama özellikleri incelenen bu çalışmaya özgü tüm cam malzemelerin Z_{etkin} ve N_{etkin} parametrelerinde incelenmiştir. Z_{etkin} parametresi gama ışını ve nötron parçacığına karşılık malzemenin radyasyonu soğurma kesitidir. N_{etkin} değeri ise elektron yoğunluğuna bağlı olarak çekirdekten bağımsız tüm cam malzemeler incelenmiştir. Z_{etkin} değeri hesaplamasında kullanılan yöntemlerden direkt metot ile hesaplamalar yapılmıştır. Direkt metot, atomik soğurma kesitinin, elektron soğurma kesitine oranlanmasıyla elde edilir. Yüksek Z_{etkin} değerine sahip malzemenin, yüksek radyasyon zırhlama özelliği olduğu söylenebilir. N_{etkin} değerlerini hesaplamak için hesaplanan Z_{etkin} değerleri N_A oranında genişletilmiş ve ortalama atom numarasına oranlanmıştır. Bu sebeple düşük N_{etkin} değerine sahip malzemeler iyi radyasyon zırhlayıcılardır.

BGXB grubu cam malzemelerin Z_{etkin} değerleri (Bölüm 4.3 – şekil 4.13) verilmiştir. Tüm gama ışını değerlerinde BG0B malzemesi en yüksek Z_{etkin} değerine, BG4B malzemesi en düşük Z_{etkin} değerine sahiptir. Bu sonuçlar YDK değerleriyle karşılaştırıldığında benzer sonuç göstermektedir. N_{etkin} değerleri incelendiğinde (Bölüm 4.3 – şekil 4.16) BG0B malzemesi en düşük N_{etkin} değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Z_{etkin} ve YDK değerlerine benzer şekilde BG0B malzemesi bu cam malzeme grubu için en iyi radyasyon zırhlayıcı malzemedir.

SRY grubu cam malzemeler incelendiğine (Bölüm 4.3 – şekil 4.14) YDK değerlerine benzer şekilde düşük enerjili gama ışını bölgesinde fotoelektrik etkinin baskın olması sebebiyle SR15 malzemesi yüksek Z_{etkin} değerine sahiptir. Compton saçılmasının etkin olduğu orta enerji bölgesinde Z_{etkin} değerleri bu çalışmaya ait her üç malzeme için benzer değerler göstermektedir. Enerji arttıkça Z_{etkin} değerleri düştüğü gözlemlenmiştir. Yüksek enerji seviyesi yani çift oluşumun baskın olduğu gama ışınlarında Z_{etkin} değerleri tüm malzemeler için bir miktar artmaktadır. Bunun sebebi çift oluşum tesir kesitinin Z^2 ile olan ilişkisidir. Tüm enerji değerleri incelendiğinde Z_{etkin} değerine göre SR15 en iyi radyasyon zırhlayıcı malzemedir. N_{etkin} değerleri incelendiğinde (Bölüm 4.3 – şekil 4.17) SR5 malzemesi en düşük N_{etkin} değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

FPGZ cam malzemeleri incelendiğinde (Bölüm 4.3 – şekil 4.16) tüm enerji değerleri için en yüksek Z_{etkin} değeri FPG0 malzemesi olduğu Z_{etkin} değeri en düşük olan malzemenin ise FPG2 malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. FPG0 malzemesi bu cam malzeme grubunda en iyi zırhlayıcı malzemedir. YDK değerleriyle karşılaştırıldığında Z_{etkin} değeri benzer sonuç elde edilmiştir. N_{etkin} değerleri incelendiğinde (Bölüm 4.3 – şekil 4.18) FPGZ malzemeleri için tüm N_{etkin} değerlerinin tüm enerjiler için birbirine hemen hemen yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan teorik çalışmanın doğruluğunu göstermek için bu çalışmaya özgü tüm cam malzemeler MCNP simülasyonu ile simule edilmiştir. MCNP4C bilgisayar programı kullanılmıştır. MCNP4C programına özgü olarak cam malzemeler tanımlanmıştır. 2 MeV enerjiye sahip bir noktasal foton kaynak, 2 adet sayaç ve malzemenin 0,5 cm kalıktan başlayarak 4 cm kalınlığa kadar her ölçüm sonrası malzeme kalınlığı 0,5 cm arttırılacak şekilde benzetim ortamı hazırlanmıştır.

Simülasyonda oluşturulan sayaçların arasına malzemenin yerleştirilmesine bağlı olarak noktasal foton kaynağından çıkan 2 MeV enerjiye sahip fotonların malzeme etkileşiminden önce ve sonra sayılması ile geçiş faktörleri analiz edilmiştir. Malzeme sonrası geçiş faktörü düşük olan malzemeler en iyi zırhlayıcı yapılardır.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde (Bölüm 4.4 – şekil 4.19) BGXB gurubunda 0,5 cm kalınlığında cam malzeme grubu için BG0B malzemesi en düşük sayaç değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığı arttırıldığında tüm malzemelerin ölçülen değerleri düşüş göstermiştir. 4 cm kalınlığında cam malzeme benzetimi incelendiğinde BG0B en düşük sayaç

değerine sahiptir. Bu da BG0B'nin bu grup içinde en iyi zırhlayıcı malzeme olduğunu göstermektedir.

Simülasyon sonuçları SRY cam malzeme grubu için incelendiğinde (Bölüm 4.4 – şekil 4.20) 0,5 cm kalınlığında cam malzeme grubu için SR5 malzemesi en düşük sayaç değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığı arttırıldığında tüm malzemelerin ölçülen değerleri düşüş göstermiştir. 4 cm kalınlığında cam malzeme benzetimi incelendiğinde SR5 en düşük sayaç değerine sahiptir. Bu da SR5 malzemesinin bu grup içinde en iyi zırhlayıcı malzeme olduğunu göstermektedir.

Simülasyon sonuçları FPGZ cam malzeme grubu için incelendiğinde (Bölüm 4.4 – şekil 4.21) 0,5 cm kalınlığında cam malzeme grubu için FPG0 malzemesi en düşük sayaç değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığı arttırıldığında tüm malzemelerin ölçülen değerleri düşüş göstermiştir. 4 cm kalınlığında cam malzeme benzetimi incelendiğinde FPG0 en düşük sayaç değerine sahiptir. Bu da FPG0 malzemesinin bu grup içinde en iyi zırhlayıcı malzeme olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmaya özgü tüm cam malzemeler MCNP4C programında benzetildiğinde 0,5 cm kalınlıkta ve 4 cm kalınlıkta FPG0 malzemesi en düşük geçiş faktörü sonuçlarını vermiştir. Bu da YDK değerlerine benzer şekilde FPG0 malzemesinin en iyi zırhlayıcı cam malzeme olduğunu göstermektedir.

Gama ışınlarından korunmaya karşı yapılan çalışmalar nötron parçacığı içinde tekrarlanmıştır. Makroskopik tesir kesitleri incelenen cam malzemeler için BG0B cam malzemesi en düşük makroskopik tesir kesitine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Agar, O. ve diğ. 2019, An investigation on shielding properties of BaO, MoO₃ and P₂O₅ based glasses using MCNPX code, *Results in Physics*, 12, 629-634.
- Akıllı, V. 2019, Bizmut Oksit-Kurşun Klorür-Tellür Oksit Sisteminin Isıl, Optik Ve Yapısal Açılardan İncelenerek Camlaşma Davranışlarının Belirlenmesi Ve Camların Radyasyon Zırlama Özelliklerinin İncelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Akkaş, A. 2015, Alüminyum-Bor-Karbür Kompozit Malzemelerin Radyasyon Karşısındaki Davranışının Belirlenmesi, XCOM Bilgisayar Programı İle İncelenmesi Ve Yeni Bir Hibrit Kompozit Radyasyon Zırh Malzemesi Önerisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Doktora Tezi*, İstanbul.
- Akyıldırım, H. 2011, Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırlama Özelliklerinin Araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Isparta.
- Allahmoradi, N. ve diğ. 2018, Theoretical and experimental study of PbO-SiO₂-Sb₂O₃ glasses as gamma ray shielding materials, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 54, 459-465.
- Bagheri, R. ve diğ. 2018, Determination of gamma-ray shielding properties for silicate glasses containing Bi₂O₃, PbO, and BaO, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 479, 62-71.
- Berger, M. J. ve diğ. 2013, *XCOM: Photon Cross Section Database*, <http://www.nist.gov>, <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>, [Ziyaret tarihi: 24 Kasım 2019].
- Bilge, A. N. ve Tuğrul, B. 1990, *Endüstriyel Radyografinin Esasları*, İstanbul, İTÜ.
- Birgör, U. 2009, RoHS Nedir? Yönetmeliği ve Uygulamaları-I, *Güncel*, s.31.
- Britannica, E. 2019, *Proton Subatomic Particle*, *ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA*: <https://www.britannica.com/science/proton-subatomic-particle> [Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2019].

- Büyükyıldız, M. 2016, Calculation of effective atomic numbers and electron densities of different types of material for total photon interaction in the continuous energy region via different methods, *Sakarya University of Science*, 2147-835X.
- Byrne, J. 2011, *Neutrons, Nuclei and Matter: An Exploration of the Physics of Slow Neutrons*, Mineola, New York, Dover Publications.
- Chandra, R. 2004, *Nuclear Medicine Physics*, Philadelphia, Lippincott Williams & Wilkins.
- Chanthima, N. ve Kaewkhao, J. 2013, Investigation on radiation shielding parameters of bismuth borosilicate glass from 1keV to 100GeV, *Annals of Nuclear Energy*, 55, 23-28.
- Dogra, M. ve diğ. 2018, Investigation of gamma ray shielding, structural and dissolution rate properties of Bi₂O₃-BaO-B₂O₃-Na₂O glass system, *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 171-179.
- Dong, M. G. ve diğ. 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.
- Elalaily, N. A. ve diğ. 2016, Bismuth silicate glass containing heavy metal oxide as a promising radiation shielding material, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 171, 840-854.
- Elmahroug, Y. ve diğ. 2018, Investigation of radiation shielding properties for Bi₂O₃- V₂O₅-TeO₂ glass system using MCNP5 code, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 32-40.
- Faw, R. E. ve Kenneth Shultis, J. 2002, *Fundamentals Of Nuclear Science And Engineering*, New York, Basel, Marcel Dekker.
- Fukuda, A. ve diğ. 2004, Shielding effect of clinical X- 114 ray protector and lead glass against annihilation radiation and gamma rays of ^{99m}Tc, *Nippon Hoshasen Gijutsu Gakkai zasshi*, 60, 1723-1729.
- Güngör, N. 1991, Sağlık Fiziği, *İ.T.Ü Matbaası*.

- Hench, L. L. ve Ethridge, E. C. 1982, *Biomaterials – An Interfacial Approach*, New York, Academic Press.
- IAEA. 1971, *Radiation Quantities and Units*, <http://www.iaea.org>, [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=primarysubject:%22RADIATION%20PROTECTION%20AND%20DOSIMETRY%20\(C5300\)%22](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=primarysubject:%22RADIATION%20PROTECTION%20AND%20DOSIMETRY%20(C5300)%22), [Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2019].
- Issa, S. M. ve diğ. 2018, Determining the gamma-ray parameters for BaO–ZnO–B₂O₃ glasses using MCNP5 code: a comparison study. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 173, 510-525.
- Kaewjaeng , S. ve diğ. 2012, Effect of BaO on Optical, Physical and Radiation Shielding Properties of SiO₂-B₂O₃- Al₂O₃-CaO-Na₂O Glasses System, *Procedia Engineering*, 32, 1080-1086.
- Karasu, B. ve diğ. 2017, Bioactive Glasses, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:4, No: 3, s.436-471.
- Knoll, G. F. 1999, *Radiation Detection and Measurement Third Edition*, Michigan, John Wiley & Sons.
- Krane, S. K. 1988, *Nuclear Physics*, New York, John Wiley & Sons.
- Kükürtcü, B. 2008, Biyoaktif Cam Ve Cam-Seramik Malzemelerin Üretimi Ve Yapay Vücut Sıvısı İçerisindeki Davranımlarının İncelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- L'Annunziata, M. F. 2012, *Handbook of Radioactivity Analysis*, USA, Elsevier.
- Law, A., ve Kelton, W. 1991, *Simulation Modelling & Analysis*, 2th. Ed, New York, Mc Graw Hill.
- Martin, J. E. 2013, *Physics for Radiation Protection*, Singapur, Wiley-VCH.
- MCNP. 2005, *Los Alamos National Laboratory Giriş Sayfası*, www.mcnp.lanl.gov, <https://mcnp.lanl.gov/>, [Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2019].

- Nolan, P. 2014, *Fundamental of Modern Physics*, New York, State University.
- Özalpan, A. 2001, Temel Radyobioloji 1. Basım, İstanbul, Haliç Üniversitesi Yayınları, 1. Basım, s.1-218.
- Prasad, S. 2018, Effect of boron oxide addition on structural, thermal, in vitro bioactivity and antibacterial properties of bioactive glasses in the base S53P4 composition, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 22-3093.
- Profio, A. 1979, *Radiation Shielding and Dosimetry*, New York, John Wiles & Sons.
- Raith, W. ve Mulvey, T. 2001, *Constituents of Matter: Atoms, Molecules, Nuclei and Particles*, Berlin, New York, CRC Press.
- Rajkumar, I. 2018, Influence of fluoride for enhancing bioactivity onto phosphate based glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 0022-3093.
- Sarachai , S. ve diğ. 2015, A study of photon interaction and radiation shielding properties of BaO:Na₂O:SiO₂:B₂O₃ glasses, *4th International Conference on Instrumentation*, s. 268-271.
- Satyanarayana, T. 2017, Structural investigations on P₂O₅-CaO-Na₂O-K₂O: SrO bioactive glass ceramics, *Ceramics International*, 0272-8842.
- Singh , V. ve diğ. 2014, Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: Comparative study, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 404, 167-173.
- Singh, N. ve diğ. 2004, Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Methods*, 225, 305-309.
- Steel, G. G. 1997, The Significance of Radiobiology for Radiotherapy, In; Steel GG (Ed.). Basic Clinical Radiobiology, New York, Co-published in the USA by Oxford University Pres, 1-7.

- TAEK. 2017, *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Bilgi Köşesi*, Radyasyon ve Yaşam, <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1083-radyasyon-ve-yasam.html> [Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2019].
- TAEK. 2017b, *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyonla Birlikte Yaşıyoruz Sayfası*, Doğal Radyasyon Kaynakları, <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>, [Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2019].
- TAEK. 2017c, *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyonla Birlikte Yaşıyoruz Sayfası*, Yapay Radyasyon Kaynakları, <https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1084-yapay-radyasyon-kaynaklari.html>, [Ziyaret tarihi: 13 Kasım 2019].
- Taha, A. H. 1989, *Operations Research An Introduction, 4th Ed.* New York, Mac Millan Publishing Company.
- Tekin, H. O. ve diğ. 2018, Photon shielding characterizations of bismuth modified borate – silicate–tellurite glasses using MCNPX Monte Carlo code, *Materials Chemistry and Physics*, 211, 9-16.
- Tekin, H. O. ve diğ. 2019a, Photon and neutron shielding performance of boron phosphate glasses for diagnostic radiology facilities, *Results in Physics*, 12, 1457-1464.
- Tekin, H. O. ve diğ. 2019b, The investigation of gamma-ray and neutron shielding parameters of Na₂O-CaO-P₂O₅-SiO₂ bioactive glasses using MCNPX code, *Results in Physics*, 12, 1797-1804.
- Tuscharoen , S. ve diğ. 2012, Improvement of BaO:B₂O₃:Fly ash glasses: Radiation shielding, physical and optical properties, *Annals of Nuclear Energy*, 49, 109-113.
- Wikizeroo, 2008, *Wikizeroo Elektromanyetik Spekturum Sayfası*. Wikizeroo.com: <https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvRWxla3Ryb21hbnlldGlhX3NwZWt0cnVt>, [Ziyaret tarihi: 14 Kasım 2019].
- Wikizeroo, 2008, *Wikizeroo X-Işını sayfası*, Wikizeroo.com: https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvWF_EscWfxLFuxLE, [Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2019].

Wikizeroo, 2019, *Wikizeroo Beta Decay*, Wikizeroo.org:
<https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lb3VkaWEub3JnL3dpa2kvQmV0YV9kZWNeSPOsitfZGVjYXk>, [Ziyaret tarihi: 14 Kasım 2019].



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı Hasipcan AYDIN
 Doğum Yeri Altındağ
 Doğum Tarihi 15.12.1986
 Uyruğu ☒ T.C. ☐ Diğer:
 Telefon +90 535 848 2372
 E-Posta Adresi hasipcanaydin@gmail.com
 Web Adresi



Eğitim Bilgileri

Lisans

Üniversite Gaziantep Üniversitesi
 Fakülte Mühendislik Fakültesi
 Bölümü Fizik Mühendisliği
 Mezuniyet Yılı 31.05.2016

Yüksek Lisans

Üniversite İstanbul Üniversitesi
 Enstitü Adı Fen Bilimleri Enstitüsü
 Anabilim Dalı Fizik Anabilim Dalı
 Programı Nükleer Fizik