

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

**ZİRKONYUM VE TİTANYUM TABANLI BAZI METALİK
CAMLARIN İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNİ ÇAKMAK

FİZİK ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ferdi AKMAN**

BİNGÖL-2024

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZİRKONYUM VE TİTANYUM TABANLI BAZI METALİK CAMLARIN
İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Prof. Dr. Ferdi AKMAN danışmanlığında, İnci ÇAKMAK tarafından hazırlanan bu çalışma 28.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ferdi AKMAN	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. İkram ORAK	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Hasan OĞUL	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tez hazırlık aşamalarında ve yazım sürecinde bana her zaman yardımcı ve destek olan öncelikle değerli hocam Prof. Dr. Ferdi Akman'a çok teşekkür ediyorum. Başarılarının devamını diliyorum.

Tez çalışmalarımda bana çok yardımcı ve destek olan değerli hocalarım Doç. Dr. Hasan Özdoğan'a ve Doç. Dr. Hasan Oğul'a teşekkür ediyorum. Sonraki hayatlarında muvaffakiyetler diliyorum.

Bu süreçte beni yalnız bırakmayan ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Meryem Yılmaz'a da teşekkür ediyorum. Her şey gönlünce olsun diyorum.

Ayrıca bu süreçte imkan dairesinde şartları lehime çevirmeye, gerekli imkanı ve ortamı oluşturmaya çalışan değerli okul müdürüme ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Bana destek olan ve her zaman yanımda olan değerli aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

İnci ÇAKMAK

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. KURAMSAL TEMELLER	17
3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	17
3.2. Gama Işınları	21
3.2.1. Alfa Parçacığı (Helyum Çekirdeği) Bozunumu	22
3.2.2. Beta Bozunması	22
3.2.3. Gama Emisyonu	24
3.3. Nötron Kaynakları	25
3.4. Foton Azaltma ve Soğurma	25
3.5. Nötron Zayıflatma ve Soğurma	27
3.6. Radyasyondan Korunma Yolları	28
3.7. Nötron Zırhlama Malzemeleri	28
3.8. Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri	30
3.9. Fotonların/Nötronların Madde ile Etkileşimi	32
3.9.1. Fotonların Madde ile Etkileşimi	32
3.9.1.1. Fotoelektrik Etki	33
3.9.1.2. Compton Saçılması	33
3.9.1.3. Çift Üretimi	34
3.10. Nötronların Madde ile Etkileşimi	35
4. MATERYAL VE YÖNTEM	38
4.1. GEANT4 Simülasyon Kodu Süreci	38

4.2. FLUKA Simülasyon Kodu Süreci	40
4.3. MCNP6 Simülasyon Kodu Süreci	41
4.4. WinXCOM Uygulama Süreci	44
4.5. İyonlaştırıcı Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Hesaplanma Süreci	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. Kütle Azalma Katsayısına Ait Araştırma Bulguları.....	49
5.2. Lineer Azaltma Katsayısına Ait Araştırma Bulguları	52
5.3. Yarı Kalınlık Değerine (YKD) Ait Araştırma Bulguları	55
5.4. Onda-bir Kalınlık Değerine (OKD) Ait Araştırma Bulguları	58
5.5. Ortalama Serbest Yol (OSY) Parametresine Ait Araştırma Bulguları.....	61
5.6. Etkin Atom Numarası Parametresine Ait Araştırma Bulguları.....	64
5.7. Etkin Elektron Yoğunluğu Parametresine Ait Araştırma Bulguları	67
5.8. Etkin İletkenlik Parametresine Ait Araştırma Bulguları	70
5.9. Nötron Zırhlama Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları	73
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	90

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

TEK	: Toz enjeksiyon kalıplama
T/M	: Toz metalurjisi
PM	: Parafin mum
PP	: Polipropilen
BM	: Brezilya mumu
SA	: Stearik asit
TGA	: Termogravimetrik analiz
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
XRD	: X-ışınları difraksiyon analizi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Geçirgen elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılımı spektrometresi
YMK	: Yüzey merkezli kübik
TCP	: Topolojik sıkı paket fazlar
SADP	: Seçili alan difraksiyon paterni
γ	: Gama
γ'	: Birincil gama
γ''	: İkincil gama
δ	: Delta
σ	: Sigma
α	: Alfa
β	: Beta

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Radyasyon türlerini gösteren elektromanyetik spektrum ve özellikleri.	17
Şekil 3.2. Elektromanyetik dalga çeşitlerini gösteren elektromanyetik spektrum ve özellikleri.	18
Şekil 3.3. Kullanılan röntgen tüplerinin şematik gösterimi	19
Şekil 3.4. Sağlık alanlarında kullanılan röntgen cihazının gösterimi.....	19
Şekil 3.5. Bremsstrahlung ışıması sonucu oluşan X-ışınlarının gösterimi.....	20
Şekil 3.6. Karakteristik X-ışınlarının gösterimi	20
Şekil 3.7. Alfa veya beta parçacığının atom çekirdeğinden ayrılması ile oluşan gama ışınlarının gösterimi	21
Şekil 3.8. Alfa bozunumu.....	22
Şekil 3.9. β^- bozunumu.....	23
Şekil 3.10. β^+ bozunumu	23
Şekil 3.11. Elektron yakalama	24
Şekil 3.12. Gama emisyonunu	24
Şekil 3.13. Tüm etkileşimlerin olduğu “dar ışın geometrisinde” bir foton ışınının zayıflaması	26
Şekil 3.14. x kalınlığında bir soğurucunun etkileşim şeması	27
Şekil 3.15. Radyasyondan korunma yolları	28
Şekil 3.16. Fotoelektrik Etki	33
Şekil 3.17. Compton Saçılması	34
Şekil 3.18. Çift üretim süreci	34
Şekil 3.19. Nötronla bombardıman edilen ana çekirdeğin nükleer parçalanma etkileşimi	36
Şekil 3.20. ^{235}U aracılığı ile nötron üretimi.....	37
Şekil 3.21. Filyon olayı ile nötron üretimi.....	37
Şekil 3.22. Füzyon olayı ile nötron üretimi.....	37
Şekil 4.1. GEANT4 ile gama zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek	39

Şekil 4.2. GEANT4 ile nötron zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “numune tanımlama” ve “input” dosyası ekranı için bir örnek.....	40
Şekil 4.3. FLUKA ile radyasyon zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek	41
Şekil 4.4. MCNP6 uygulamalarının gerçekleştirildiği simülasyon geometrisi.....	43
Şekil 4.5. MCNP6 ile gama zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası için bir örnek.....	43
Şekil 4.6. WinXCOM ara yüzüne ait bir görsel	44
Şekil 5.1. İncelenen metalik camların WinXCOM, GEANT4, FLUKA, MCNP6 metotları yardımı ile elde edilen kütle azaltma katsayılarının karşılaştırması.....	51
Şekil 5.2. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların kütle azaltma katsayılarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.3. İncelenen metalik camların WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımı ile elde edilen lineer azaltma katsayılarının karşılaştırılması.....	54
Şekil 5.4. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların lineer azaltma katsayılarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 5.5. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı yarı kalınlık değerlerinin grafiği	57
Şekil 5.6. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların yarı kalınlık değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.7. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı onda-bir kalınlık değerlerinin grafiği	60
Şekil 5.8. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların onda-bir kalınlık değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
Şekil 5.9. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı ortalama serbest yol değerlerinin grafiği	63

Şekil 5.10. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların ortalama serbest yollarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması	64
Şekil 5.11. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin atom numarası değerlerinin grafiği	66
Şekil 5.12. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin atom numarası değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması	67
Şekil 5.13. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin elektron yoğunluğu değerlerinin grafiği	69
Şekil 5.14. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin elektron yoğunluğu değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması	70
Şekil 5.15. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin iletkenlik değerlerinin grafiği	72
Şekil 5.16. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin iletkenlik değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması	73
Şekil 5.17. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları	75
Şekil 5.18. İncelenen metalik camlara ait toplam makroskobik tesir kesiti grafiği	76
Şekil 5.19. İncelenen metalik camlara ait ortalama serbest yol grafiği.....	77
Şekil 5.20. FLUKA ile belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının kalınlık ile değişimi	78
Şekil 5.21. GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen farklı kalınlıklarda metalik camlardan geçen nötron sayılarının karşılaştırmalı gösterimi.....	79
Şekil 5.22. FLUKA ile belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının enerji ile değişimi	80
Şekil 5.23. GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen farklı enerjilerde metalik camlardan geçen nötron sayılarının karşılaştırmalı gösterimi.....	81

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Radyasyon zırlama karakteristikleri incelenecek metalik camların kodları, kimyasal içerikleri ve yoğunlukları	45
Tablo 5.1. Metalik camlara ait kütle azaltma katsayısı (cm^2/g) sonuçları	50
Tablo 5.2. Metalik camlara ait lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}) sonuçları	53
Tablo 5.3. Metalik camlara ait yarı kalınlık değeri (cm) sonuçları.....	56
Tablo 5.4. İncelenen metalik camlara ait onda-bir kalınlık değeri (cm) sonuçları	59
Tablo 5.5. Metalik camlara ait ortalama serbest yol değeri (cm) sonuçları	62
Tablo 5.6. Metalik camlara ait etkin atom numarası sonuçları	65
Tablo 5.7. Metalik camlara ait etkin elektron yoğunluğu ($\times 10^{23}$) (elektron/g) sonuçları .	68
Tablo 5.8. Metalik camlara ait etkin iletkenlik değeri ($\times 10^6$) (S/m) sonuçları	71
Tablo 5.9. Metalik camlara ait hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti değeri (cm^{-1}) sonuçları	74
Tablo 5.10. GEANT4 ile belirlenmiş 10 mm numune kalınlığında ve 4,5 MeV nötron enerjisinde toplam makroskobik tesir kesiti (cm^{-1}), ortalama serbest yol (mm) ve numuneden geçen nötron sayısı sonuçları.....	76
Tablo 5.11. Farklı numune kalınlıklarında incelenen metalik camlardan geçen nötron sayısı	78
Tablo 5.12. Farklı nötron enerjilerinde incelenen metalik camlardan geçen nötron sayısı.....	80

ZİRKONYUM VE TİTANYUM TABANLI BAZI METALİK CAMLARIN İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Sunulan tez çalışması zirkonyum ve titanyum tabanlı bazı metalik camların gama ve nötron radyasyonu zırhlama karakteristiklerini kapsamaktadır. İncelenen zirkonyum tabanlı metalik camlar $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$, $Zr_{52,5}Ti_{5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$ ve $Zr_{57}Nb_{5}Al_{10}Cu_{15,4}Ni_{12,6}$ ve titanyum tabanlı metalik camlar ise $Ti_{32,8}Zr_{30,2}Ni_{5,3}Cu_{9}Be_{22,7}$, $Ti_{55}Zr_{10}Cu_{9}Ni_{8}Be_{18}$ ve $Ti_{40}Zr_{25}Ni_{3}Cu_{12}Be_{20}$ şeklindedir. İncelenen metalik camların gama ve nötron zırhlama kapasitelerini belirlemek için WinXCOM programı, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 simülasyon kodları kullanılmıştır. Gama ışını zırhlama kapasitelerini incelemek için kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametreleri 0,04 ila 10 MeV gama ışını enerji aralığında belirlenmiştir. Nötron radyasyonu zırhlama kapasitelerini incelemek için teorik yol ile etkin uzaklaştırma tesir kesiti parametresi hesaplanmıştır. FLUKA ve GEANT4 simülasyon kodları kullanılarak 4,5 MeV nötron enerjisinde ve 1 cm numune kalınlığında metalik camlardan geçen nötron sayıları ve aynı şartlarda on farklı metalik cam kalınlığında (2 mm ila 20 mm aralığında) numunelerden geçen nötron sayıları tespit edilmiştir. 1 cm metalik cam kalınlığında yedi farklı nötron enerjisinde (0,1 ila 10 MeV enerji aralığında) numuneden geçen nötron sayıları GEANT4 ile FLUKA simülasyon kodları ile belirlenmiştir. Son olarak, GEANT4 simülasyonu kullanılarak 1 cm numune kalınlığında ve 4,5 MeV nötron enerjisinde metalik camların nötron zırhlama kapasitelerini incelemek için ortalama serbest yol ve toplam makroskopik tesir kesitleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak incelenen metalik camların gama ve nötron radyasyonları zırhlama parametreleri sonuçları dikkate alındığında Zr-3 kodlu metalik camın en iyi gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu ve Ti-2 kodlu metalik camın ise en iyi nötron radyasyonu zırh malzemesi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan metotların hepsinin birbiri ile genellikle iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu veriler öncelikle gama ve nötron zırhlama çalışmalarında metot tercihi için kullanılabilir. Bunun dışında hastanelerin radyolojik bölümlerinde, nükleer santrallerde, radyasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği araştırma laboratuvarlarında ve uzay araştırmalarında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Metalik Camlar, Gama Zırhlama, Nötron Zırhlama, WinXCOM, GEANT4, FLUKA, MCNP6.

DETERMINATION OF THE IONIZING RADIATION SHIELDING CHARACTERISTICS OF SOME METALLIC GLASSES BASED ON ZIRCONIUM AND TITANIUM

ABSTRACT

The presented thesis covers the gamma and neutron radiation shielding characteristics of some zirconium and titanium based metallic glasses. The investigated zirconium-based metallic glasses were Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5}, Zr_{52.5}Ti₅Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al₁₀ and Zr₅₇Nb₅Al₁₀Cu_{15.4}Ni_{12.6}, and the titanium-based metallic glasses were Ti_{32.8}Zr_{30.2}Ni_{5.3}Cu₉Be_{22.7}, Ti₅₅Zr₁₀Cu₉Ni₈Be₁₈ and Ti₄₀Zr₂₅Ni₃Cu₁₂Be₂₀. WinXCOM program, GEANT4, FLUKA and MCNP6 simulation codes were used to determine the gamma and neutron shielding capacities of the investigated metallic glasses. To investigate gamma ray shielding capacities, mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, half value layer, one-tenth value layer, mean free path, effective atomic number, effective electron density and effective conductivity parameters were determined in the 0.04 to 10 MeV gamma ray energy range. To investigate the neutron radiation shielding capacities, the effective removal cross section parameter was calculated theoretically. Using FLUKA and GEANT4 simulation codes, the number of neutrons passing through metallic glasses at 4.5 MeV neutron energy and 1 cm sample thickness, and the number of neutrons passing through samples of ten different metallic glass thicknesses (range 2 mm to 20 mm) under the same conditions, were determined. The number of neutrons passing through the sample at seven different neutron energies (energy range from 0.1 to 10 MeV) at a thickness of 1 cm metallic glass was determined with GEANT4 and FLUKA simulation codes. Finally, using GEANT4 simulation, mean free path and total macroscopic cross sections were calculated to investigate the neutron shielding capacities of metallic glasses at 1 cm sample thickness and 4.5 MeV neutron energy. As a result, considering the results of gamma and neutron radiation shielding parameters of the investigated metallic glasses, it was determined that Zr-3 coded metallic glass was the best gamma radiation shielding material and Ti-2 coded metallic glass was the best neutron radiation shielding material. It has also been observed that all of the used methods are generally in good agreement with each other. These obtained data can primarily be used in method selection in gamma and neutron shielding studies. Apart from this, they can be used in radiological departments of hospitals, nuclear power plants, research laboratories where radiation studies are carried out and space research.

Keywords: Metallic Glasses, Gamma Shielding, Neutron Shielding, WinXCOM, GEANT4, FLUKA, MCNP6.

1. GİRİŞ

Radyasyon uzayda veya ortamda enerji ileten dalgaların veya parçacıkların yayılması olarak bilinir. Elektronlar, nötronlar, protonlar, alfa parçacıkları, yüksek enerjili fotonlar veya bunların karışımı radyasyona örnek olarak gösterilebilir. Görünür ışık, ısı, radyo dalgaları ve beta parçacıkları da ayrıca radyasyona örnek olarak verilebilir. Havadaki radon, su ve yiyeceklerdeki potasyum ve yer kabuğundaki uranyum, toryum ve radyum doğal radyasyon kaynaklarıdır.

Radyasyon atom veya molekülden elektron koparabilme kabiliyetine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırılabilir. Bir atomun eşit sayıda protonu ve elektronu bulunmaktadır. İyonlaşma süresinde atom elektron kaybeder. Yeterli enerjiye sahip yani elektronun atoma bağlanma enerjisinden daha büyük enerjiye sahip bir radyasyon elektronu atomdan uzaklaştırabilir. Gama-ışını, X-ışını, beta, nötron ve alfa radyasyonları gibi radyasyonlar bu tip radyasyonlara örnek olarak gösterilebilir. İyonlaştırıcı radyasyon ile maddenin kimyasal yapısı değişebilir. Eğer iyonlaştırıcı radyasyon canlı bir yapıya nüfuz ederse kalıcı hasarlara neden olma yeteneğine sahiptir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonda ise radyasyon elektronları atomdan sökemez, elektronda titreşime sebep olabilir ve ısının artmasına neden olur. Görünür ışık ve radyo dalgaları bu tip radyasyonlara örnektir.

Yüklü parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar madde ile etkileşime girerek enerjilerini veya hızlarını kaybederler ve sonunda dururlar. Alfa parçacıkları büyük miktarda iyonlaşmaya neden olduklarından, bu parçacıkları durdurmak için bir kâğıt sayfası bile yeterlidir. Beta parçacıkları ise sahip olduğu enerjiye bağlı olarak bir santimetre kalınlığında bir plastik levha veya iki-dört milimetre kalınlığında bir alüminyum levha ile durdurulabilirler. Gama ve X-ışınları alfa ve beta parçacıklarına göre daha yüksek nüfuz etme kabiliyetine sahiptirler ve enerjilerine bağlı olarak havada onlarca veya yüzlerce metre yol alabilirler ve havadaki atomlarla çarpışarak kademeli olarak enerjilerini kaybederler. Gama ve X-ışınları yüksek yoğunluğa sahip kurşun veya demir gibi plakalarla durdurulabilirler. Yüksüz nötronlar çarpışma yoluyla enerjilerini kaybederler

ve maddelerle etkileşime girerek soğurulurlar. Yani nötronlar, atomların çekirdekleri ile doğrudan çarpışarak enerjilerini veya hızlarını kaybederler. En etkin şekilde, kütle olarak kendilerine neredeyse eşit olan protonlarla veya hidrojen çekirdeği ile çarpışarak enerjilerini kaybederler.

Radyasyon kaynakları doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılabilir. Doğal radyasyon kaynaklarına topraktan gelen radyasyon, yiyecek ve içeceklerden gelen radyasyon, kozmik radyasyon ve radon gazını gösterebiliriz. Teknolojinin gelişmesiyle sürekli üretimi artan yapay radyasyon kaynaklarına X-ışını tüplerini, parçacık hızlandırıcıları, nükleer güç santrallerini ve medikal uygulamalardan kaynaklanan radyasyonları gösterebiliriz. Günümüzde kullanımı sürekli artan radyasyonun yararlarının yanında insan sağlığına ve ekosistem üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmak yani canlı dokular tarafından emilimi hücrenin yapısında değişikliklere neden olmaktadır. Yüksek düzeyde iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalındığında vücutta yanıklar, saçlarda dökülme, iç kanama, anemi ve bağışıklık sisteminde sorunlar ortaya çıkabilir. Daha ileri düzeydeki maruz kalmaların ise kanser ile sonuçlanması yüksek bir ihtimaldir. İyonlaştırıcı radyasyon bunun yanında dijital devrelerde bit kaymalarına veya analog devrelerde ise voltaj yükselmelerine ve kaçak akımlara neden olabilir. Canlıların ve elektronik devrelerin bu sebeplerden dolayı iyonlaştırıcı radyasyona karşı korunması gerekmektedir. Günümüzde iyonlaştırıcı radyasyondan korunmak için maliyeti ucuz olduğu için kurşun plakalar ve betonlar tercih edilmektedir. Kurşunun maliyeti yanında yoğunluğunun yüksek olması, radyasyon azaltma katsayılarının yüksek olması, korozyona karşı direnci ve dövülerek işlenebilir gibi özelliklerinden dolayı betona göre daha cazip zırhlama malzemesidir. Betonun ise kurşuna göre maliyeti daha düşük, üretilebilirliği daha kolay ve yoğunluğunun daha düşük olması onu cazip kılmaktadır. Ancak bu iki geleneksel radyasyon zırh malzemesinin birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Kurşunun en büyük dezavantajı insan sağlığına olan olumsuz etkisidir. Kurşun kullanılarak radyasyondan korunmaya çalışılırken kurşunun kimyasal etkileri sağlık üzerine büyük riskler taşımaktadır. Kurşun zehirlenmesi temas, yutma veya soluma yoluyla karımıza çıkar. Kurşun maruziyeti çocuklarda büyüme ve gelişmede yavaşlamayı, tüm canlı dokularda sinir sistemi ve beyin yapısında hasara neden olur. Betonun dezavantajları arasında ise iyonlaştırıcı radyasyonu güvenilir seviyelere düşürmek için çok büyük kalınlıklara ihtiyaç olması öncelikli olarak sayılabilir. Ayrıca

deprem gibi doğal afetlerden etkilenme olasılığı da yüksektir. Ayrıca betonun ana bileşenlerinden olan silikaya maruz kalmak da sağlık açısından tehlike arz etmektedir. Geleneksel olarak kullanılan kurşun plakalar ve betonların bu dezavantajlarından dolayı günümüzde bu malzemelere alternatif iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemeleri arayışı devam etmektedir.

Sunulan tez çalışmasında alternatif iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemesi olabilecek potansiyele sahip metalik camlar incelenmiştir. Metal-metal ve metal-metaloid çeşitleri bulunan bu camlar hem metallerin hem de camların bazı özelliklerine sahiptirler. Normal camların aksine kristal bir yapıya sahiptirler ve bunlar genellikle mukavemeti yüksek, opak, dövülebilir ve yumuşak malzemelerdir. Metal-metal içeren camlar isimlerinden de anlaşılacağı gibi nikel-niyobyum, magnezyum-çinko ve bakır-zirkonyum gibi metallere oluşabilir. Metal-metaloid camlar ise demir, kobalt, nikel gibi metallere bor, silisyum, karbon gibi metaloidlerin birleşimiyle üretilebilirler. Bu tür camlar iyi manyetik özelliklere ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. Metalik camlar yüksek elektrik direncine sahip olduklarından elektrik ve elektronikte direnç, bilgisayar hafızası ve manyetik direnç sensörlerinin üretiminde kullanılır. Manyetik özellikleri radyasyondan etkilenmediği için nükleer atık bertaraf kaplarında ve füzyon reaktörleri için mıknatıs üretiminde kullanılmaktadırlar. Ayrıca krom ve fosfor içeren metalik camlar yüksek korozyona sahip olduğundan reaktör kazanının iç yüzeyinin kaplanmasında tercih edilirler. Biyomedikal endüstride cerrahi kesim aletlerinde ve implantasyon için protez malzemesi olarak kullanılırlar. Birçok önemli kullanım alanı olan metalik camların yoğunlukları ve kimyasal içerikleri üretim aşamasında ayarlanabilir olduğundan, metalik camların iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemesi olarak da kullanılabilirliği sunulan bu tez ile irdelenmiştir.

Sunulan tez çalışmasında zirkonyum ve titanyum tabanlı bazı metalik camların gama ve nötron radyasyonlarına karşı zırhlama karakteristikleri incelenmiştir. İncelenen zirkonyum tabanlı metalik camlar Vitroley-1 ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$) (Lu vd., 2003), Vitroley-105 ($Zr_{52,5}Ti_{5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$) (Park vd., 2018) ve Vitroley-106a ($Zr_{57}Nb_{5}Al_{10}Cu_{15,4}Ni_{12,6}$) (Choi-Yim vd., 2002) iken titanyum tabanlı metalik camlar $Ti_{32,8}Zr_{30,2}Ni_{5,3}Cu_{9}Be_{22,7}$ (Tang vd., 2010), $Ti_{55}Zr_{10}Cu_{9}Ni_{8}Be_{18}$ (Park vd., 2011) ve $Ti_{40}Zr_{25}Ni_{3}Cu_{12}Be_{20}$ (Guo vd., 2005) şeklindedir. Gama ve/veya nötron

radasyonları zırlama karakteristiklerini incelemek için WinXCOM programı (Gerward vd., 2004), FLUKA (Böhlen vd., 2014), GEANT4 (Agostinelli vd., 2003) ve MCNP6 (Goorley vd., 2013) simülasyon kodları kullanılmıştır. Gama-ışını zırlama kapasiteleri dört farklı yaklaşımla (teorik, GEANT4, FLUKA ve MCNP6) ile belirlenmiştir. Gama-ışını zırlama kapasiteleri 0,04 ila 10 MeV foton enerjileri aralığında irdelenmiştir. Bu amaçla kütle azaltma katsayıları, lineer azaltma katsayıları, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yolları, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlikleri hesaplanmıştır. Nötron parçacıklarının zırlama kapasitelerini incelemek için ise öncelikle teorik yol ile etkin uzaklaştırma tesir kesiti parametresi hesaplanmıştır. FLUKA ve GEANT4 simülasyon yaklaşımları kullanılarak 4,5 MeV enerjide ve 1 cm numune kalınlığında metalik camlardan geçen nötron sayıları ve aynı şartlarda on farklı metalik cam kalınlığında (2 mm ila 20 mm aralığında) geçen nötron sayıları tespit edilmiştir. 1 cm metalik cam kalınlığında yedi farklı enerjide (0,1 ila 10 MeV enerji aralığında) geçen nötron sayıları GEANT4 ile FLUKA simülasyon kodları ile belirlenmiştir. Son olarak, GEANT4 simülasyonu kullanılarak 1 cm numune kalınlığında ve 4,5 MeV enerjide metalik camların nötron zırlama kapasitelerini incelemek için ortalama serbest yol ve toplam makroskopik tesir kesitleri hesaplanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Amorf metaller olarak da bilinen düşük yoğunluklu dökme metalik camlar (BMG), dayanıklı, elastik ve aşınmaya karşı dirençlidir. Bu metalik camlara Zr, La, Ti, Ni, Pd, Mg, Al, Fe ve Cu bazları eklenerek yeni BMG alaşımları geliştirilebilir. Yeni üretilen dökme metalik camlar, aşınmaya karşı daha dayanıklı, biyouyumlu ve mükemmel yapısal bütünlüğe sahip ince camlardır. Ayrıca bu yeni camlar, yüksek yoğunluk ve yüksek atom numarasına sahip olmalarından dolayı zararlı X-ışınları ve gama ışınlarından korunmak için zırh malzemesi olarak da kullanılabilir. Bu amaçla Tekin vd., (2022), yaptıkları çalışmada cam numunelere ağır metal oksitlerin eklenmesi ile hazırlanan metalik camların zırhlama özelliklerini incelemiştir. Cu_xZr_{100-x} ($x=35-70$) tabanlı sekiz farklı metalik camın gama ışını zırhlama özelliklerini Monte Carlo simülasyon kodu ve Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemiştir. Zırhlama parametresi olarak lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), etkin iletkenlik (C_{etk}), maruz kalma yığılma faktörü ve enerji soğurma yığılma faktörü gibi parametreleri incelemiştir. Yüksek yoğunluğa sahip olan $Cu_{70}Zr_{30}$ kodlu metalik camın incelenen tüm numuneler arasında üstün zırhlama özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Perişanoğlu (2019), nükleer güvenlik uygulamalarında kullanılması amacıyla altı farklı metalik dökme camın alfa, proton, nötron ve gama ışını zırhlama özelliklerini incelemiştir. İncelenen numunelerin kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısı (μ), yarı yakınlık değeri (YKD), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) gibi gama ışını zırhlama parametrelerini WinXCOM programını kullanarak 0,02-20 MeV foton enerji aralığında belirlemiştir. Maruz kalma yığılma faktörü parametresini, geometrik fit yaklaşımını kullanarak 0,015-15 MeV enerji aralığında 1-40 mfp için hesaplamıştır. Son olarak, alfa (He^{+2}) ve proton (H^1) parçacıkları için hızlı nötron uzaklaştırma kesitleri (Σ_R), öngörülen menzil ve kütle durdurma gücü gibi parçacık zırhlama parametrelerini de incelemiştir. Sonuçlara göre yoğunluğu yüksek olan MG3 kodlu numunenin ($Cu_{49}Hf_{42}Al_9$) diğer numunelere kıyasla üstün nükleer zırhlama özelliği gösterdiğini bildirmiştir. Olarino ve Oche (2021), titanyum (Ti) bazlı dökme

metalikcamların ($Ti_{32.8} Zr_{30.2}Ni_{5.3}Cu_9Be_{22.7}$, $Ti_{31.9}Zr_{33.4}Fe_4 Cu_{8.7} Be_{22}$) foton ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca üretilen Ti bazlı dökme metalik camların zırhlama özelliklerini kurşun, ağır beton ve bazı yeni geliştirilen cam zırh malzemeleri ile karşılaştırmışlardır. Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı yakınlık değeri (YKD), etkin atom numarası (Z_{etk}) gibi teorik zırhlama parametrelerini XCOM bilgisayar programını kullanarak 15 keV-15 MeV enerji aralığında hesaplamışlardır. Üretilen dökme metalik camların maruz kalma yığılma faktörünü hesaplamak için ise geometrik fit sistemine dayalı olan EXABCAl bilgisayar kodunu kullanmışlardır. Üretilen Ti bazlı dökme metalik camların foton ve nötron zırhlama özelliklerinin betondan daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Fakat Ti bazlı metalik dökme camlar, kurşun ile kıyaslandığında kurşunun daha iyi bir zırh malzemesi olduğu sonucuna varmışlardır. Tamam vd., (2022) Ge-Se-Te dökme camlarına Cu içeriği eklenmesinin radyasyon zırhlama özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Hazırlanan dökme camların hem X ve gama ışını zırhlama özelliklerini hem de yüklü parçacık ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), gama fotonuna maruz kalma oranı (Γ) gibi zırhlama parametrelerini 0,1-10 MeV enerji aralığında XCOM programı ve FLUKA simülasyon kodunu kullanarak belirlemişlerdir. Hazırlanan numunelerin hepsinin özellikle de yüksek yoğunluğa sahip olan CGST5 kodlu ($Cu_{20}Se_{40}Te_{40}$) numunenin geleneksel zırh malzemelerine kıyasla üstün foton zırhlama özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Cu içeriği eklenerek hazırlanan Ge-Se-Te dökme camların uzayda ve diğer radyasyon ile çalışılan ortamlarda zırh malzemesi olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Khong vd., (2016), yüksek nötron zırhlama özelliği elde edebilmek için Fetabanlı metalik cam alaşımları hazırlamış ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan alaşımların nötron iletim ve makroskobik azaltma katsayılarını 5-1000 MeV nötron enerji aralığında mikro kanal plaka (MCP) dedektörünü kullanılarak incelemişlerdir. Alaşımların kristal veya amorf hallerini incelemek için ise senkrotron X-ışını kırınımı ve çift dağılım fonksiyonu yöntemlerini kullanmışlardır. Fe-B₆-Y₂ kodlu dökme metalik camsı alaşımın daha önce literatürde incelenen tüm Fe tabanlı dökme metalik camlar arasında en yüksek nötron zırhlama özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. AbdelWahab vd., (2019), kurşun borat camını ZrO₂ nanoparçacıkları ile katkılayarak

hazırladıkları cam numunelerin fiziksel ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Fiziksel özelliklerini, XRD, FTIR ve UV-Vis spektroskopisini kullanarak, gama ışını zırhlama özelliklerini ise 356-1332 keV enerji aralığında Na(Tl) sintilasyon detektörünü kullanarak deneysel olarak belirlemişlerdir. Elde edilen deneysel değerleri WinXCOM bilgisayar programı kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmışlardır. Zırhlama parametresi olarak kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) gibi zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. Cam numunelerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerinin düşük enerji seviyelerinde iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Son olarak kurşun borat camlara ZrO_2 nano parçacıklarının ilave edilmesi sayesinde camın kompaktlığının ve bağ kuvvetinin arttığını da ifade etmişlerdir. Akyıldırım vd., (2020), yaptıkları çalışmada (75-X) $SiO_2-15Na_2O-10CaO-XZrO_2$ camlarına ZrO_2 ilavesinin radyasyon zırhlama üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Zirkonolit silikat camların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), maruz kalma yığılma faktörü, enerji soğurma yığılma faktörü, kütle durdurma gücü ve nötron uzaklaştırma kesiti Σ_R gibi zırhlama parametrelerini 0,015-20 MeV foton enerji aralığında XCOM programı ve/veya FLUKA simülasyon kodu yardımıyla hesaplamışlardır. Hazırlanan camlara ZrO_2 eklenmesinin yüklü parçacıklar ve gama radyasyonu zırhlama özelliğini arttırdığını bildirmişlerdir. Rammah vd., (2022), yaptıkları çalışmada zirkonyum/kobalt/nikel/vanadyum/lityum borotellürit camların iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama özelliklerini ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan camların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) ve nötron uzaklaştırma kesiti (Σ_R) gibi foton ve nötron zırhlama parametrelerini 22-1330 keV enerji aralığında XCOM programını kullanarak belirlemişlerdir. İncelenen tüm camların gama ışını zırhlama uygulamaları için uygun olduğunu ve G4-V kodlu numunenin daha iyi bir nötron zırh malzemesi olduğunu bildirmişlerdir. Abdelghany vd., (2022), şeffaf, toksik etkisi olmayan çevre dostu radyasyon zırh malzemeleri geliştirmek amacıyla boro-tellirit camları ZrO_2 ile katkılamışlardır. Hazırlanan cam numunelere ZrO_2 katkı malzemesinin eklenmesinin yapısal, termal ve radyasyon zırhlama özelliklerini nasıl etkilendiğini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Radyasyon zırhlama özelliklerini, Phy-X/PSD arayüzü ve WinXCOM bilgisayar programı kullanılarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. Kütle azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, etkin

atomnumarası gibi zırhlama parametresi sonuçlarını beton ile karşılaştırmışlardır. Hazırlanan numunelerin camsı yapısını XRD testleri ile ve termal özelliklerini ise Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DCS) yardımıyla incelemişlerdir. ZrO_2 katkılı numuneler arasında BTZ5 kodlu numunenin gama ışını ve nötron zırhlama özelliğinin en iyi olduğunu ifade etmişlerdir. ZrO_2 katkılı numunelerin kurşun ve betona kıyasla daha hafif, şeffaf ve çevre dostu olması açısından birçok radyasyon zırhlama uygulamasında zırh malzemesi olarak kullanılabilirliklerini bildirmişlerdir.

AbdelWahab vd., (2021), yaptıkları çalışmada $PbO_2-Na_2B_4O_7$ camlarına ZrO_2 nanoparçacıklarının eklenmesinin gama ışını, nötron zırhlama üzerindeki etkisini ve elektronegatiflik, optik bant aralığı, optik bazlılık gibi bazı fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Na, Pb ve B içeren camlara ZrO_2 nanoparçacıklarının eklenmesi ile elde edilen NPBZ kodlu camların kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), eşdeğer atom numarası ($Z_{eşd}$) gibi zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzü ve XCOM bilgisayar programı kullanılarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. Klasik zırh malzemeleri ile hazırlanan NPBZ camlarının zırhlama özelliklerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca maruz kalma yığılma faktörü, enerji soğurma yığılma faktörü ve nötron uzaklaştırma tesir kesiti Σ_R gibi parametrelerini de incelemişlerdir. Sonuç olarak ZrO_2 nanoparçacıkları içeren NPBZ camların gama ışını ve nötron zırhlama uygulamaları için uygun olduğunu ifade etmişlerdir. NPBZ camların zırhlama özelliğinin hem endüstriyel camlar olan boraks ve kuvarstan hem de klasik zırh malzemeleri olan barit, ferrit, kromat, serpantin ve sıradan betondan daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Almuqrin vd., (2021), yaptıkları çalışmada değişen SrO ve BaO bileşimlerine sahip SrO-SiO₂, B₂O₃, ZrO_2 camların fiziksel, optik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Fiziksel özellik olarak optik bazlılığı, oksijen paketleme yoğunluğunu ve oksijen molar hacmini incelemişlerdir. Hazırlanan cam numunelerin kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD), ortalama serbest yol (OSY) gibi zırhlama parametrelerini 284-1333 keV enerji aralığında EPDL2017 fotoatomik altyapısını kullanarak incelemişlerdir. Hazırlanan cam numunelerinde SrO konsantrasyonu azaltarak, BaO konsantrasyonunun artırılmasının incelenen tüm parametreleri doğrudan olumlu etkilediğini bildirmişlerdir. BaO, SrO'dan daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu için BaO ilavesinin zırhlama

özelliğini arttırdığını ve özellikle düşük gama enerjilerinde (284-826 keV) hazırlanan cam numunelerin zırhlama özelliklerinin daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Ghrib vd., (2021), yaptıkları çalışmada Zirkonyum-Titanyum-Talyum üçlü oksit seramiklerin, yapısal, optik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Zırhlama özelliklerinin deneysel değerlerini 0,184-0,810 MeV enerji aralığında Na(Tl) sintilasyon detektörü yardımıyla belirlemişlerdir. Elde edilen deneysel değerleri XCOM bilgisayar programı kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmışlardır. Yapısal özelliklerini incelemek için ise taramalı elektron mikroskobu (SEM), fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve X-ışını kırınımı (XRD) gibi gelişmiş cihazları kullanmışlardır. Seramik numunelerin kütle azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), radyasyon geçirme oranı (RGO), maruz kalma yığılma faktörü, nötron uzaklaştırma tesir kesiti Σ_R gibi zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. Zirkonyum-Titanyum-Talyum üçlü oksit seramiklerinde talyum oksit içeriğinin artmasının gama ışını zırhlama özelliğini arttırdığını, yüklü parçacık ve nötronların zırhlama özelliğini ise azalttığını bildirmişlerdir. Başka bir ifade ile Zirkonyum-Titanyum-Talyum üçlü oksit seramiklerinin iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemesi olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Kavaz vd., (2022), tıbbi uygulamalar için 5 farklı reçine kompozitin yapısal ve gama ışını zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit numunelerin yapısal özelliklerini taramalı elektron mikroskobu (SEM)/EDS analizi ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisini kullanarak belirlemişlerdir. Reçine kompozitlerin gama ışını zırhlama özelliklerini ise 0,020-20 MeV foton enerji aralığında WinXCOM programı ve Monte Carlo Simülasyon kodu yardımıyla belirlemişlerdir. Zırhlama parametresi olarak lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD) ve ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) parametrelerini incelemişlerdir. 3M, GC ve Tokuyama isimli reçine kompozitlerinin homojen yapıya sahip olduğunu ve Bisco isimli reçine kompozitin ise gama radyasyonunu zırhlama özelliğinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. İncelenen reçine kompozitlerin tıbbi uygulamalarda, özellikle tanısal görüntüleme ve radyasyon tedavisi uygulamalarında zırh malzemesi olarak kullanımının faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir. Sayyed vd., (2021), yaptıkları çalışmada borotellürat camlara (B_2O_3 -SrO- TeO_2 -RO) dört farklı oksit ilave ederek (RO= TiO_2 , ZnO, BaO, PbO) hazırlamış

oldukları tellürit bazlı camların mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik özelliklerini incelemek için Makishima-Mackenzie modelinden yararlanmışlardır. Radyasyon zırhlama özelliklerini belirlemek için ise 0,015-15 MeV enerji aralığında Monte Carlo Simülasyon programını ve XCOM bilgisayar programını kullanmışlardır. Zırhlama parametresi olarak lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), radyasyon geçirme oranı (RGO) ve radyasyon koruma verimi (RKV) parametrelerini belirlemişlerdir. Düşük gama enerjilerinde borotellürit camların PbO ile katkılanmasının zırhlama özelliğini arttırdığını ifade etmişlerdir. AbouHussein vd., (2021), yaptıkları çalışmada $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ camını dört farklı geçiş metal oksiti (TiO_2 , Cr_2O_3 , V_2O_5 ve Fe_2O_3) ile katkılayarak elde edilen bizmut borat camların bazı fiziksel özelliklerini ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Radyasyon zırhlama özelliklerini deneysel olarak belirlemek için ^{137}Cs (662 keV) radyasyon kaynağı ile kullanılacak bizmut borat katkılı zırh malzemesi arasına bir kişi konularak gerçekleştirilen Tıbbi Dahili Radyasyon dozu (MRD) yöntemini kullanmışlardır. Teorik zırhlama parametresi sonuçlarını ise Monte Carlo Simülasyon (MCNP5) programını kullanarak belirlemişlerdir. Zırhlama parametresi olarak lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), radyasyon koruma verimi (RKV) ve nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) parametrelerini incelemişlerdir. Ayrıca eş değer doz miktarı (HT), etkin doz (E), doz iletim faktörü, kırılma indisi, optik geçirgenlik katsayısı (T), statik ve elektrik dielektrik sabiti gibi diğer fiziksel parametreleri de belirlemişlerdir. İncelenen bizmut borat camların yüksek radyasyon zırhlama özelliğine ve ideal fiziksel özelliklere sahip olduğunu bildirmişlerdir. Cr^{3+} içeren bizmut borat camların en iyi radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğunu ve yaşam boyu kanser riskini beş kat azaltmak için zırhlamada kullanılabileceklerini ifade etmişlerdir. Singh vd., (2021), yaptıkları çalışmada seryum bazlı borat camları TiO_2 ile katkılayarak elde edilen camların ($\text{XTiO}_2\text{-XCeO}_2\text{-}(30\text{-X})\text{PbO}\text{-}(70\text{-X})\text{B}_2\text{O}_3$) radyasyon zırhlama özelliklerini, fiziksel ve optik özelliklerini incelemiştir. Borat camların lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), maruz kalma yığılma faktörü ve enerji soğurma yığılma faktörü gibi zırhlama parametrelerini 0,015-15 MeV enerji aralığında Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak belirlemişlerdir. Fiziksel özelliklerini ise XRD, FTIR ve UV-Vis spektroskopisini kullanarak belirlemişlerdir. Borat camların TiO_2 ile katkılanmasının radyasyon zırhlama özelliklerini arttırdığını bildirmişlerdir. Al-Hadeethi vd., (2020),

doku mühendisliği ve diş hekimliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan biyoaktif camların TiO_2 ile katkılanmasının radyasyon zırlama üzerindeki etkilerini incelemiştir. İncelenen biyoaktif camların lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), maruz kalma yığılma faktörü, enerji soğurma yığılma faktörünü ve nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) gibi zırlama parametrelerini 0,015-15 MeV enerji aralığında GEANT4 simülasyon kodu ve WinXCOM programını kullanarak belirlemiştir. Sonuçlar kapsamlı bir şekilde incelendiğinde TiO_2 katkılı biyoaktif camların hem gama ışını hem nötron zırlama özelliklerinin iyi olduğunu bildirmişlerdir. En fazla Ti içeren T1 kodlu biyoaktif camın üstün radyasyon zırlama özelliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Mhareb vd., (2021), farklı baryum oksit konsantrasyonları ile katkılanmış beş borosilikat camın gama ışını, proton, alfa ve nötron zırlama özelliklerini incelemiştir. İncelenen borosilikat camların yarı kalınlık değeri (YKD), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), nötron uzaklaştırma tesir kesiti Σ_R ve kütle durdurma gücü gibi zırlama parametrelerini 0,015-15 MeV enerji aralığında GEANT4 simülasyon kodunu, Phy-X/PSD arayüzünü ve SRIM programlarını kullanarak belirlemiştir. Ayrıca borosilikat camların dayanıklılıklarını da incelemiştir. S5 kodlu (10 TiO_2 -10 SiO_2 -50 B_2O_3 -30 BaO) borosilikat camın foton zırlama özelliklerinin iyi olduğunu, S1 kodlu (10 TiO_2 -10 SiO_2 -70 B_2O_3 -10 BaO) borosilikat camın ise nötron, alfa parçacığı ve proton zırlama özelliklerinin iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca S4 kodlu (10 TiO_2 -10 SiO_2 -55 B_2O_3 -25 BaO) borosilikat camın dayanıklılığının en yüksek olduğunu da bildirmişlerdir.

Hamad vd., (2022), yaptıkları çalışmada boro-tellürit camlara TiO_2 , V_2O_5 , MnO_2 ve Tl_2O_3 gibi farklı oksitlerin eklenmesinin optik, fiziksel ve radyasyon zırlama özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Borotellürit camların ((SrO - B_2O_3 - TeO_2 - MO), ($MO = TiO_2, V_2O_5, MnO_2, Tl_2O_3$)) fiziksel özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisini kullanmışlardır. Borotellürit camlarının deneysel radyasyon zırlama parametrelerini 0,184- 0,810 MeV enerji aralığında ^{137}Cs (0,661 MeV) ve ^{166}Ho (0,184 MeV, 0,280 MeV, 0,710 MeV, 0,810 MeV) radyoaktif kaynaklarını kullanarak NaI(Tl) detektörü ile incelemiştir. Elde edilen deneysel değerleri XCOM bilgisayar programını kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmışlardır. Teorik ve deneysel değerler arasında küçük farklılıklar olduğunu

bulmuşlardır. Lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), radyasyon koruma verimi (RKV) ve radyasyon geçirme oranı (RGO) gibi zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. SrO-B₂O₃-TeO₂-Ti₂O₃ (SBT:TI) borotellürit camının incelenen numuneler içerisinde en iyi radyasyon zırhlama özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Lakshminarayana vd., (2018), yaptıkları çalışmada altı farklı titanat bizmut borotellürit (TeO₂-B₂O₃-Bi₂O₃-TiO₂) camın gama ışını zırhlama özelliklerini 0,015-10 MeV enerji aralığında hem XCOM programını hem de Monte Carlo Simülasyon programını kullanarak incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) ve maruz kalma yığılma faktörü gibi zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. İncelenen bütün cam numunelerin gama ışını zırhlama özelliklerinin betondan daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. İncelenen camlar arasında yoğunluğu en yüksek olan S6 kodlu titanat bizmut borotellürit camın (30TeO₂-30B₂O₃-30Bi₂O₃-10TiO₂) zırhlama özelliğinin en yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Başka bir ifade ile Bi₂O₃ ilavesi ne kadar artarsa zırhlama özelliğinin de o kadar iyi olacağı sonucuna varmışlardır. Al-Hadeethi vd., (2019), yapılan çalışmada boroksilat camlara üç farklı ağır metal oksit eklenmesinin (30B₂O₃-(70-X) SiO₂ -X HMO (HOMO- Bi₂O₃-BaO-TiO₂)) gama radyasyonunu zırhlama üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İncelenen boroksilat camların lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY) ve etkin atom numarasını (Z_{etk}) gibi zırhlama parametrelerini 0,347-2,506 MeV enerji aralığında GEANT4 simülasyon kodu ve WinXCOM programını kullanarak belirlemişlerdir. Üretilen boroksilat camlara üç farklı ağır metal oksit eklenmesinin zırhlama özelliğini artırdığını bildirmişlerdir. Hazırlanan boroksilat camlar arasında Bi₂O₃ eklenerek üretilen boroksilat camın gama ışını zırhlama özelliğinin en iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Hussein vd., (2022), yaptıkları çalışmada TeTaNb cam sistemine ZnO, Na₂O, TiO₂ ve MgO eklenmesi ile elde edilen dört farklı oksit camın (75TeO₂-5Ta₂O₅-15 Nb₂O₅-5X (burada X= ZnO, Na₂O, TiO₂ ve MgO) fiziksel, optik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan oksit camlarının deneysel radyasyon zırhlama parametrelerini 59,5-1330 keV enerji aralığında ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co radyoaktif kaynaklarını kullanarak NaI(Tl) detektörü ile belirlemişlerdir. Elde edilen deneysel değerleri Phy-X/PSD arayüzü ve MIKE yazılımını kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmışlardır. Teorik ve

deneysel değerler arasında küçük farklılıklar olduğunu bildirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre hazırlanan oksit camlarının düşük enerji aralığında zırhlama özelliğinin iyi olduğunu, bu sebeple hazırlanan oksit katkılı camların dış hekimliği uygulamalarında ve X-ışını uygulamalarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Yüksek yoğunluğa sahip TeTaNbZn kodlu $75\text{TeO}_2-5\text{Ta}_2\text{O}_5-15\text{Nb}_2\text{O}_5-5\text{ZnO}$ camının 40-85 keV enerji aralığında fiziksel, optik ve zırhlama özelliklerinin en iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Alzahrani vd., (2021) yaptıkları çalışmada mol yüzdesini (x), 0 ile 20 arasında değiştirilerek üretilen beş farklı cam sisteminin ($80\text{TeO}_2+(20-x)\text{Na}_2\text{O}+x\text{TiO}_2$) radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen bu camları kısaca TNT cam sistemi olarak ifade etmişlerdir. Bu TNT camların lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY) ve etkin atom numarası (Z_{etk}) gibi zırhlama parametrelerini 15 keV ile 15 MeV enerji aralığında PHITS Monte Carlo Simülasyon kodunu ve XCOM bilgisayar programını kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada doz oranı (R/h), nötron uzaklaştırma tesir kesiti Σ_R ve kütle durdurma gücü gibi parametreler de değerlendirilmiştir. TNT camları için hesaplanan zırhlama parametreleri kapsamlı bir şekilde incelendiğinde bu camların beton gibi bazı sıradan ticari zırh malzemelerine kıyasla daha iyi zırhlama özelliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Mahmoud vd., (2021), yaptıkları çalışmada molar yüzdelere değiştirilerek elde ettikleri altı farklı camın ($59\text{B}_2\text{O}_3-29\text{SiO}_2-2\text{LiF}-(10-x)\text{ZnO}-x\text{TiO}_2$ ($0 \leq x \leq 10$)) fiziksel özelliklerini ve gama ışını zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Camların fiziksel özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisini kullanmışlardır. Üretilen camların kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol ve etkin atom numarası gibi zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzü ve XCOM bilgisayar programı kullanılarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarına göre TiO_2 konsantrasyonu arttıkça fiziksel özelliklerinin ve zırhlama özelliklerinin arttığını bildirmişlerdir. Bu sebeple üretilen camların uçak gövdelerinde, röntgen merkezlerinde ve ev cephelerine zırh malzemesi olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

El-Rehim vd., (2021), yaptıkları çalışmada farklı miktarlarda itriyum oksit (Y_2O_3) içeren altı farklı titanyum lantan sodyum silikat camın ($50\text{SiO}_2-25\text{TiO}_2-5\text{La}_2\text{O}_3-(20-x)\text{Na}_2\text{O}-x\text{Y}_2\text{O}_3$ ($x:0 \leq x \leq 10$)) fiziksel özelliklerini ve radyasyon zırhlama özelliklerini

incelemişlerdir. Camların fiziksel özelliklerini incelemek için X-ışını kırınımı (XRD) ve fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisini kullanmışlardır. Üretilen camların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), eşdeğer atom numarası (Z_{esd}), nötron uzaklaştırma tesir kesiti Σ_R , maruz kalma yığılma faktörü ve enerji soğurma yığılma faktörü gibi zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. Hazırlanan camlarda Y_2O_3 konsantrasyonunun artmasının fiziksel ve gama ışını zırhlama özelliklerini olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Shaaban vd., (2021), yaptıkları çalışmada titanyum dioksit (TiO_2) konsantrasyonunu değiştirerek hazırlanan altı farklı lityum florür çinko titanatborosilikat camın ($59B_2O_3-29SiO_2-2LiF-(10-x) ZnO-xTiO_2$ ($0 \leq x \leq 10$)) spektroskopik ve nükleer zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca nükleer zırhlama özelliklerini geleneksel zırh malzemeleri ile karşılaştırmışlardır. Üretilen camların ortalama serbest yol (OSY), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) ve nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) gibi nükleer zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. TiO_2 konsantrasyonu arttıkça gama radyasyonunu zırhlama özelliğinin arttığını bildirmişlerdir.

Khobkham vd., (2018), yaptıkları çalışmada zirkonyum alaşımlı iki malzemenin (Zr_2 - (Fe,Ni) , Zr_2 - $5Nb$) radyasyon zırhlama özelliklerini 1 keV ile 100 MeV enerji aralığında WinXCOM programını kullanarak incelemişlerdir. Üretilen alaşımların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), etkin atom numarası (Z_{etk}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) gibi zırhlama parametrelerini belirlemişlerdir. İncelenen her iki alaşımında radyasyon zırhlama özelliklerinin iyi olduğunu bildirmişlerdir. Seenappa vd., (2018), yaptıkları çalışmada dokuz farklı Mg-Gd-Y-Zn-Zr içerikli alaşımın X-ışınları, gama ışınları ve nötron zırhlama özelliklerini 1 keV ile 100 GeV enerji aralığında WinXCOM programını kullanarak araştırmışlardır. Üretilen alaşımların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), onda-bir kalınlık değeri (OKD), etkin atom numarası (Z_{etk}), nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R), maruz kalma yığılma faktörü ve doz oranı gibi zırhlama parametrelerini incelemişlerdir. İncelenen dokuz farklı alaşım içerisinde Mg bazlı Mg-8,2Gd-7,8Y-1,0Zn-0,4Zr alaşımının hem X-ışını ve gama ışını zırhlama özelliğinin hem de nötron zırhlama özelliğinin iyi olduğunu bildirmişlerdir. Medjahed vd., (2018), yaptıkları çalışmada Al-Cu-Li-Mg-X ($X=Mn, Zr$ ve Zn) alaşımlarını

hazırlamışlar ve istenilen forma getirebilmek için 0° , 45° ve 90° haddeleme yönelimlerinde mekanik, anizotropi ve gama ışını zırhlama özelliklerini kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Gama ışını zırhlama özelliklerini ^{60}Co radyoaktif kaynağını kullanarak NaI(Tl) detektörü ile incelemişlerdir. İncelenen alaşımların zırhlama özelliğini haddeleme yönünün ciddi manada etkilendiğini ve alaşımların 90° haddeleme yönünde iken zırhlama özelliği ve mekanik özelliklerinin en iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Sirin (2020), yaptığı çalışmada Al₂₅Zn alaşımlarını belirli oranlarda titanyum (Ti) ile katkılayarak (75-x) Al-25Zn-xTi (x=%0, %0,01, %0,1 ve %1) alaşımlarının gama ışını ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Gama ışını zırhlama özelliklerini 59,54-1332 keV enerji aralığında ^{241}Am , ^{137}Cs ve ^{60}Co radyoaktif kaynaklarını kullanarak HPGe detektörü ile incelemiştir. Elde edilen deneysel değerleri WinXCOM bilgisayar programı kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmıştır. Teorik ve deneysel değerler arasında çok küçük farklılıklar olduğunu bulmuştur. Zırhlama parametresi olarak kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), radyasyon koruma verimi (RKV), etkin atom numarası (Z_{etk}), nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) ve kerma (K) gibi parametreleri hesaplamıştır. İncelenen alaşımlar arasında yoğunluğu en yüksek olan ve %1 Ti içeren Ti1 kodlu alaşımın gama ışını ve nötron zırhlama özelliklerinin en iyi olduğunu bildirmiştir. Taşgın (2021), yaptığı çalışmada endüstriyel ve biyomedikal implant malzemesi olarak kullanılan ve farklı miktarlarda Al, V, Sn, Ni, Pb, Mo, Cr, Zr, Fe, Nb, Co elementleri kullanılarak üretilen titanyum (Ti) alaşımların mikroyapısal, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemiştir. Üretilen camların kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD) ve etkin atom numarası (Z_{etk}) gibi zırhlama parametrelerini Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 0,001-100 MeV enerji aralığında belirlemiştir. Özellikle yapısında yüksek atom numarasına sahip olan Mo ve Nb gibi elementlerin bulunduğu Ti alaşımlarının zırhlama özelliğinin daha iyi olduğunu bildirmiştir. Kassab (2022), yaptıkları çalışmada ağırlıkça %2 ile %18 oranında krom ile katkılanarak üretilen çelik alaşımların nötron ve gama ışını zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Çelik alaşımların gama ışını özelliklerini deneysel olarak 0,2-2,750 MeV enerji aralığında ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{232}Th ve ^{133}Ba radyoaktif kaynaklarını kullanarak HPGe detektörü ile belirlemişlerdir. Üretilen camların teorik zırhlama özelliklerini ise Phy-X/PSD arayüzünü kullanarak 0,015 ile 15 MeV enerji aralığında belirlemişlerdir. Zırhlama parametresi olarak lineer azaltma katsayısı (μ), kütle azaltma

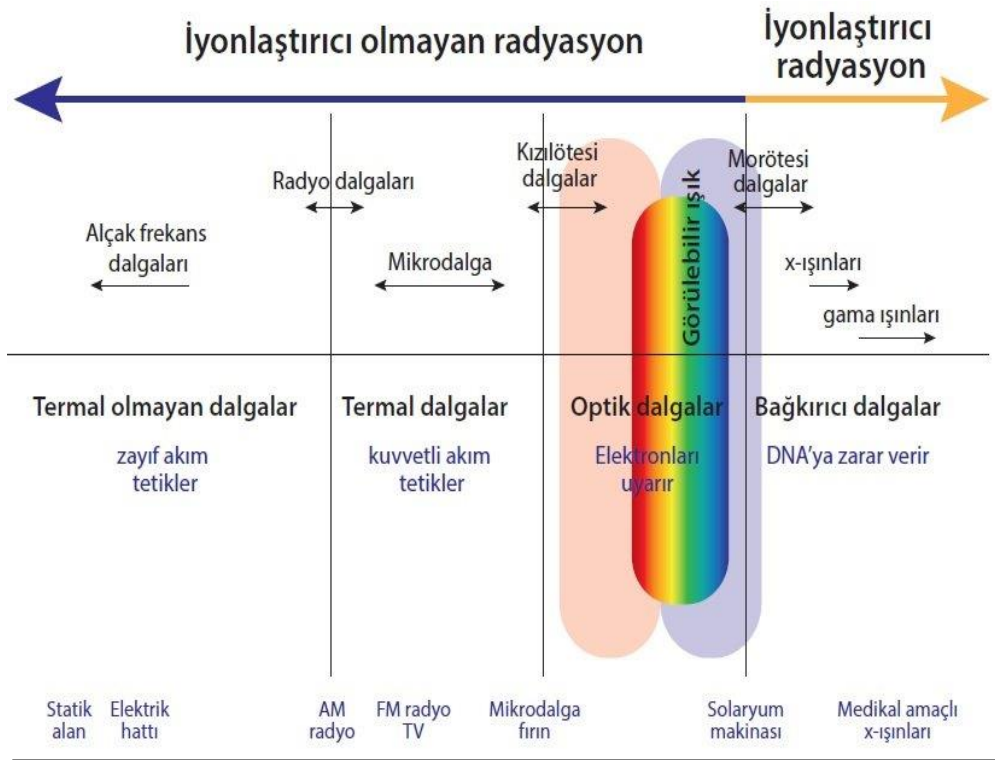
katsayısı (μ/ρ), yarı kalınlık değeri (YKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}), maruz kalma yığılma faktörü, enerji soğurma yığılma faktörü ve nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) gibi parametreleri incelemişlerdir. Çelik alaşımların zırlama özelliklerini paslanmaz çelik ve karbon çelik ile karşılaştırmışlardır. Çelik alaşımlarda krom yüzdesi arttırıldıkça zırlama özelliğinin de arttığını ve en yüksek krom içeriğine sahip olan S5 kodlu numunenin gama ışını ve nötron zırlama özelliklerinin daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Han ve Demir (2009), yaptıkları çalışmada Ti ve Ni içeren beş farklı alaşımın zırlama özelliklerini 22,1-88 keV enerji aralığında ^{241}Am ve ^{109}Cd radyoaktif kaynaklarını kullanarak Si(Li) detektörü ile incelemişlerdir. Elde edilen deneysel değerleri WinXCOM bilgisayar programı kullanarak elde edilen teorik değerler ile karşılaştırmışlardır. Teorik ve deneysel değerler arasında çok küçük farklılıklar olduğunu ifade etmişlerdir. Zırlama parametresi olarak kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), etkin atom numarası (Z_{etk}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) gibi parametreleri incelemişlerdir. Ti ve Ni içeren alaşımların düşük enerji aralıklarında zırlama özelliklerinin iyi olduğunu bildirmişlerdir.

Literatür incelemesinden de görüldüğü gibi metalik camların iyonlaştırıcı radyasyon zırlama kapasitelerinin incelendiği çalışma sayısı oldukça azdır. Ancak, zirkonyum ve titanyum elementleri veya oksitleri ile üretilmiş normal camlara ve alaşımlara ait birçok çalışma bulunmaktadır. Sunulan bu tez çalışması ile literatürdeki bu eksikliğe önemli katkı sunulmuştur.

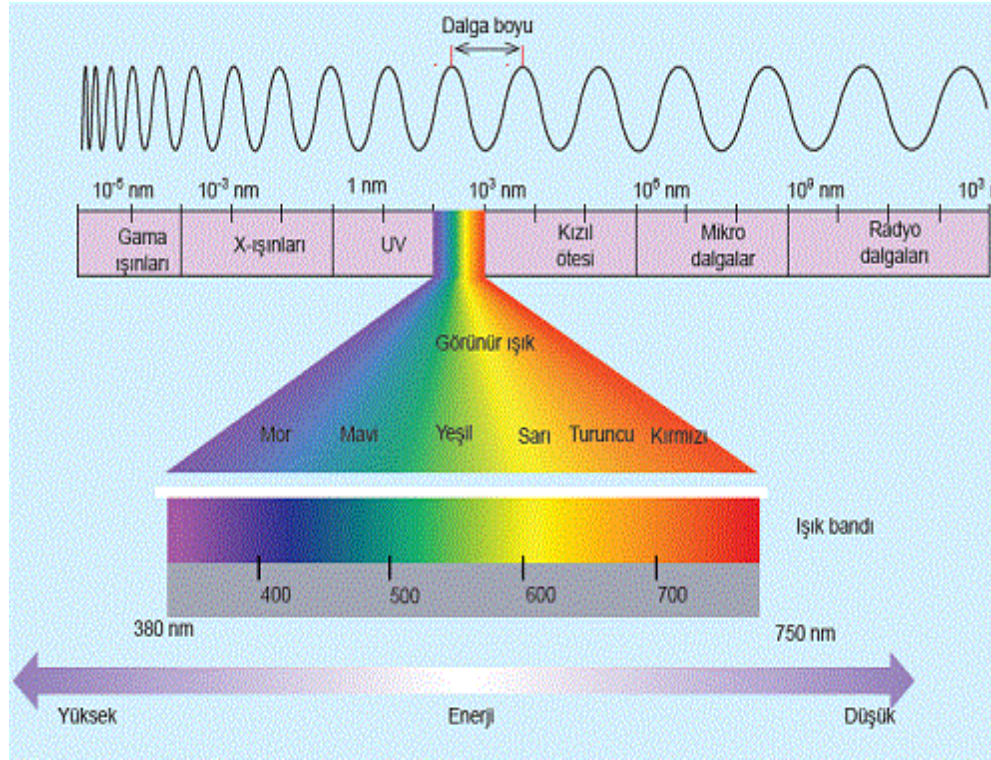
3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Radyasyon, enerjinin dalgalar veya parçacıklar şeklinde yayımı veya iletimi olarak tanımlanır. Bir nokta radyoaktif kaynaktan gelen her tür radyasyonun şiddeti, uzaklık ile ters orantılıdır (Weisstein, 2014). İyonlaştırıcı (yüksek enerjili) radyasyon, atomun elektronlarını uzaklaştırma yeteneğine sahiptir; yani atomları iyonlaştırabilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon elektromanyetik radyasyon veya parçacık radyasyonu şeklinde olabilmektedir.



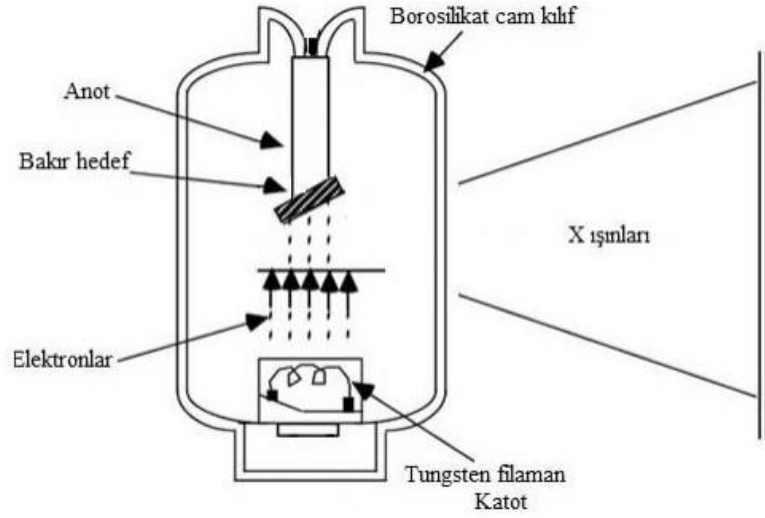
Şekil 3.1. Radyasyon türlerini gösteren elektromanyetik spektrum ve özellikleri



Şekil 3.2. Elektromanyetik dalga çeşitlerini gösteren elektromanyetik spektrum ve özellikleri

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere elektromanyetik dalgaların enerjisi artıça dalga boyu azalmaktadır. Radyo dalgalarından (düşük enerji, uzun dalga boyu, düşük frekans) iyonlaştırıcı radyasyonlara (yüksek enerji, kısa dalga boyu, yüksek frekans) yüksek enerjili radyasyon madde ile etkileşime girdiğinde elektronlar, atomik ve moleküler yörüngelerinden çıkarılırlar. Bu elektronlar malzeme içinden geçişleri sırasında ortalama 33.85 eV’lik enerji üretilir ve iyonizasyon işlemi sırasında ikincil elektronlara aktarılır. Bu oldukça önemli bir enerji miktarıdır. Yüksek enerjili fotonlar klinik olaylarda kullanıldığında, ortalama 60 eV enerjiye sahip olan ikincil elektronlar hücrel molekülere aktarılabilir.

Görünür ışık dışında kalan dalga boylarının elektromanyetik radyasyon barındırdığı 19. yüzyılın başlarında keşfedildi. X-ışınları ise 1913 yılında Alman fizikçi Wilhelm Conrad Roentgen tarafından keşfedildi. 1913 yılında William David Coolidge tarafından geliştirilen Röntgen tüpü, anot ve katot katmanlarından oluşan basınçlı (10^{-3} mm Hg’ye kadar) bir cam tüptür. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de röntgen tüpünün görselleri verilmiştir.



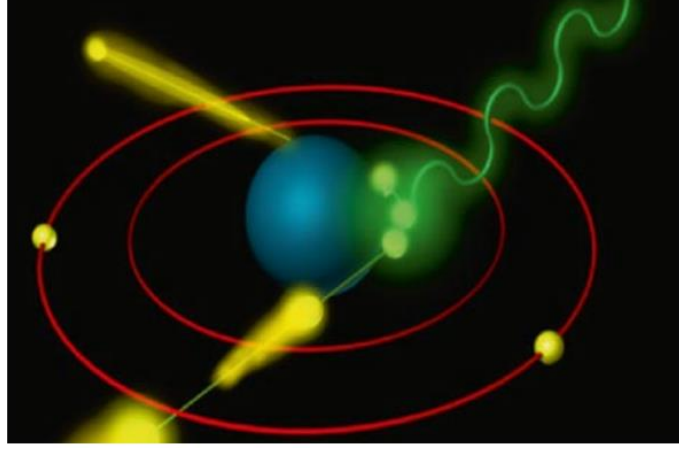
Şekil 3.3. Kullanılan röntgen tüplerinin şematik gösterimi



Şekil 3.4. Sağlık alanlarında kullanılan röntgen cihazının gösterimi

Röntgen cihazlarında yüksek sayılabilecek (106–108V) bir potansiyel uygulanır. Katottaki termiyonik emisyon tarafından üretilen elektronlar anoda doğru hızlandırılır. Böylece elektronlar erime sıcaklığı yüksek bir metal olan anoda çarparlar. X-ışınları, Coulomb etkileşimleri nedeniyle bu elektronların ani yavaşlaması ile üretilir (hızlı hareket eden elektronların bu ani yavaşlaması, yani bremsstrahlung ışınması); X-ışınlarının enerjisi ve dalga boyu hedef (anot) metalinin atom numarası ve ayrıca metalin elektronlarının hızı ve kinetik enerjisine bağlıdır. Bu işlem, tanısal X-ışını ünitelerinde tıbbi radyasyon üretmek için kullanılmaktadır.

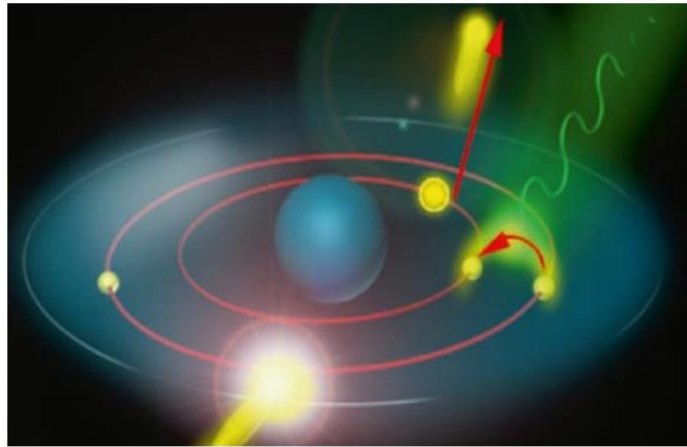
X-ışınları ekstra nükleer süreçlerle de üretilebilmektedir. Bu süreçler sonunda iki tür X-ışını oluşturulabilir. İlk tip, bahsedilen bremsstrahlung X-ışınlarına karşılık gelir. İkinci tip, bir iç atomik yörüngedeki bir elektronun çarpması nedeniyle oluşur (karakteristik X-ışınları). Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 bu iki tür X-ışını üretimlerini ifade etmektedir.



Şekil 3.5. Bremsstrahlung ışıması sonucu oluşan X-ışınlarının gösterimi

Bremsstrahlung ışıması tarafından üretilen hızlandırılmış ışınlar geniş bir enerji spektrumuna sahiptir.

Karakteristik X-ışınlarında ise farklı bir süreçten söz etmek gerekir. Burada metal üzerine gelen bir yüksek enerjili bir elektron, atomdan elektron koparılmasına neden olur ve orbitalde ortaya çıkan boşluk bir dış atomik yörüngeden hareket eden başka bir elektron tarafından doldurulur. Şekil 3.6'da bu süreç gösterilmektedir.

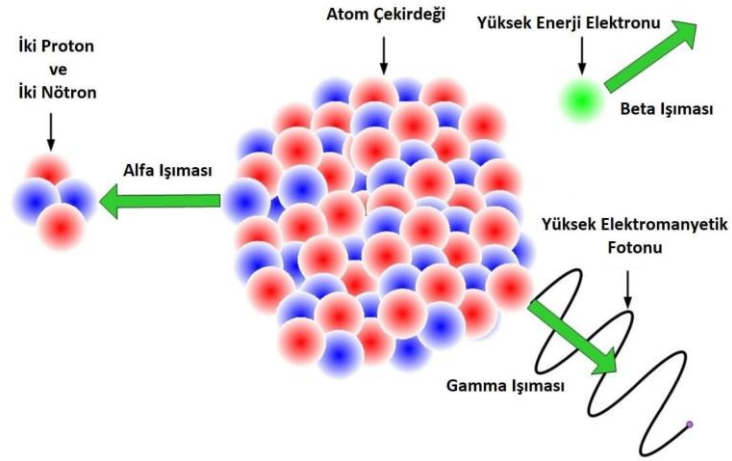


Şekil 3.6. Karakteristik X-ışınlarının gösterimi

Bu elektronun hareket etmesi için enerji ortaya çıkması gerekir. Bu şekilde açığa çıkan enerji, karakteristik X-ışınları olarak yayılır. Bunlar enerjilerinin hedef metale bağlı olması nedeniyle karakteristiktir. Karakteristik X-ışınları tek (mono) enerjilidir.

3.2. Gama Işınları

Gama ışınları fiziksel olarak X ışınlarıyla aynıdır ancak atom çekirdeğinden yayılırlar (nükleer olarak). Kararsız bir atom çekirdeği, fazla enerjisini ya bir çekirdek içi elektron (e^-) (beta parçacığı) veya bir helyum çekirdeği ("alfa parçacığı") yayımlayarak kararlı hale geçmektedir. Bundan sonra hala fazla enerjiye sahipse, gama ışınları salınır ve kararlı duruma ulaşmaktadır(Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Alfa veya beta parçacığının atom çekirdeğinden ayrılması ile oluşan gama ışınlarının gösterimi

Bir radyoizotopun yarı ömrü, aktivitesinin yarıya inmesi için geçen süredir. Bir radyoizotopun enerjisi, saniyedeki bozunma sayısıdır ve Becquerel veya Curie ile ifade edilir.

- Becquerel (Bq): Standart radyoaktivite birimidir ve 1 saniyedeki parçalanma olarak tanımlanır (bozunma).
- Curie (Ci): Saniyedeki $3,7 \times 10^{10}$ parçalanmaya karşılık gelen daha eski bir radyoaktivite birimi olarak bilinir.

Radyoaktif bir çekirdeğin bozunması kendiliğinden gerçekleşen bir süreçtir. Radyoaktif bozunmanın üç şekli vardır. Alfa veya beta parçacıkları, alfa ve beta bozunmaları

sırasında yayılır. Kararsız bir çekirdek kararlı bir çekirdeğe ulaşmak için herhangi bir bozunması olmadan da gama ışınması meydana gelir.

3.2.1. Alfa Parçacığı (Helyum Çekirdeği) Bozunumu

Bir çekirdek aşırı sayıda hem proton hem de nötronlar içerdiğinde kararsız olabilir. Çekirdek kararlı hale geçebilmek için iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlamaktadır.

Alfa bozunmasından sonra, momentumun korunumu ve alfa parçacığının çekirdekten çok daha az kütleli olması nedeniyle alfa parçacığı enerjinin çoğuna sahip olur.

${}^4\text{He}$ olmasına rağmen çekirdeği çok enerjiktir. Atomun çekirdeğine kıyasla çok uzağa gitmez. Nispeten ağır kütlesi nedeniyle çoğu radyasyon biçimi (genellikle kütle sayıları 190'dan fazla olan çekirdeklerde) alfa bozunması olarak gözlenir. Alfabozunmasının enerji spektrumu sürekli ve 4 ile 10 MeV arasında değişir. Alfa parçacıkları yüklü parçacıklar oldukları için içinden geçtikleri maddenin elektronları ile yoğun etkileşime girebilmektedirler.



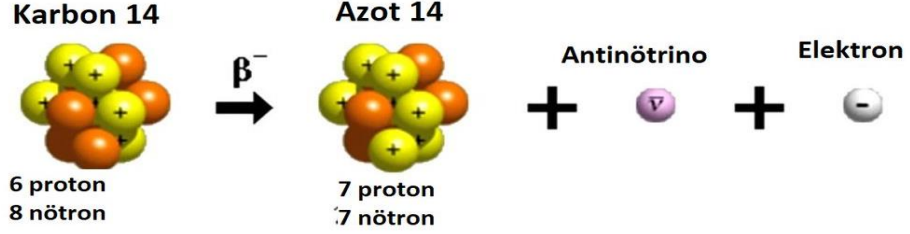
Şekil 3.8. Alfa bozunumu

3.2.2. Beta Bozunması

Üç tür beta bozunması vardır.

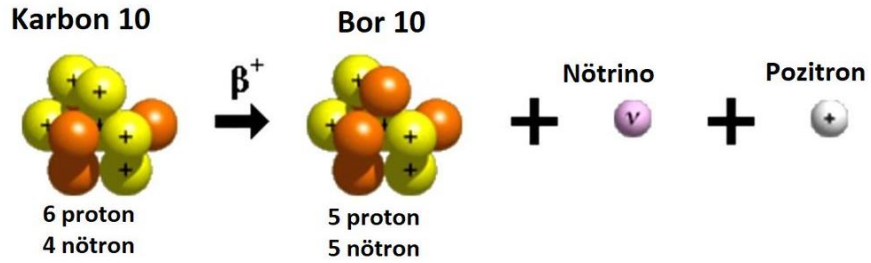
β^- bozunumu: Bir radyonüklid, çekirdeğinde fazla nötron bulunduğu zaman kararsızsa, azaltmak için nötronlardan birini bir protona ve bir elektrona dönüştürür. Çekirdeğindeki enerji miktarı ile elektron hızla dışarı itilir. Çekirdekte proton kalırken bu yüksek hızlı elektron parçacığı negatron veya β^- olarak adlandırılır (Şekil 3.9). Radyonüklidin atom

numarası bir artar ve böylece periyodik tablodaki bir sonraki elemente dönüşür. Kütle numarasının değişmediği “izobarik” bir bozunmadır (Şekil 3.9).



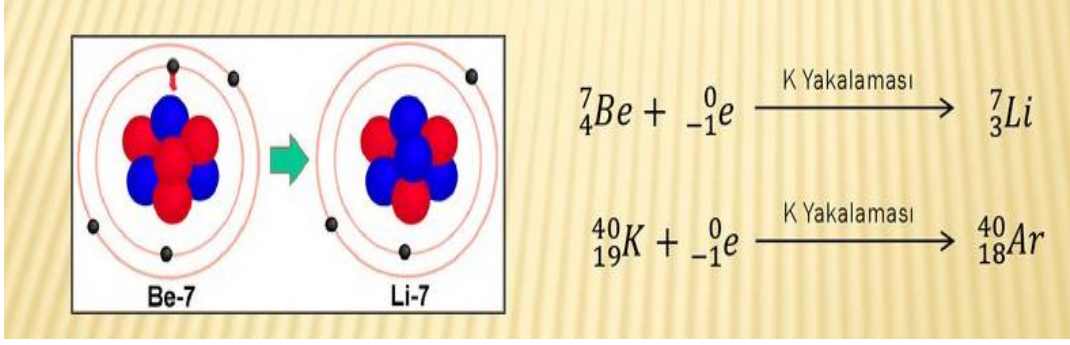
Şekil 3.9. β^- bozunumu

β^+ bozunumu: Bir radyonüklid, fazla miktarda proton veya nötron eksikliği nedeniyle kararsızsa, protonlardan biri bir nötrona ve pozitif yüklü küçük bir parçacığa dönüşür. β^+ bozunması olarak adlandırılan bu süreçte pozitif yüklü küçük bu parçacık pozitron olarak adlandırılır. Nötron çekirdekte kalırken pozitron ise çekirdek dışına itilir (Şekil 3.10). Pozitron yayan radyonüklidin atom numarası bir azalır ve böylece periyodik tablodaki bir öncekine elemente dönüşür. Yine elementin kütle numarası değişmez (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. β^+ bozunumu

Elektron Yakalama: Çekirdek, fazla miktarda proton nedeniyle kararsızsa, K ve L yörüngesindeki bir elektron gibi çekirdeğe yakın bir elektron atom çekirdeği tarafından yakalanır. (Şekil 3.11).

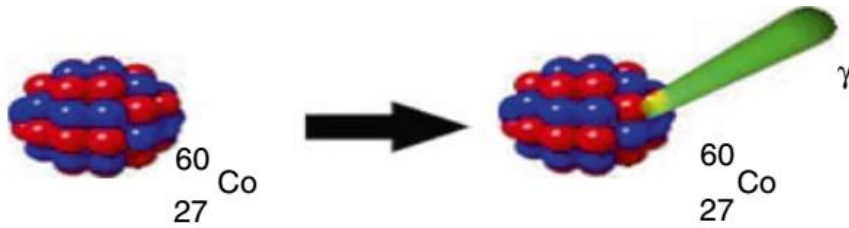


Şekil 3.11. Elektron yakalama

Bu elektron daha sonra bir protonla birleşerek bir nötron oluşturur. Bu sürece elektron yakalama denir. Bu süreçte hiçbir parçacık yayınlanmaz. Çekirdeğin atom numarası, pozitron bozunmasında olduğu gibi azalır. Ancak kütle numarası değişmez. İç yörüngedeki boşluk bir elektron tarafından doldurulur. Dış yörüngeden, karakteristik X-ışınlarının emisyonuyla sonuçlanır. Ayrıca, nötrino adı verilen kütsüz, yüksüz parçacıkların emisyonu her beta bozunma sürecinde gözlenir. Bu parçacıkların varlığı ilk olarak 1930'da Pauli tarafından öne sürüldü. Ancak adını “nötrino” olarak Fermi vermiştir.

3.2.3. Gama Emisyonu

Bir çekirdek her zaman tamamen kararlı değildir. Bozunduktan hemen sonra (bazen), çekirdek yarı kararlı bir durumda olabilmektedir. Çekirdek tarafından taşınan fazla enerji daha sonra gama radyasyonu olarak yayılır. Bundan sonra çekirdeğin atom veya kütle numarasında bir değişiklik olmaz. Bu nedenle bu bozunmalara “izomerik” bozunma denir (Şekil 3.12). Gama radyasyon kaynaklarının yarı ömürleri diğer tip kaynaklara göre çok daha kısadır. Bozunma süresi genellikle 10^{-9} saniyeden azdır. Bununla birlikte, bazı gama radyasyonu yarılanma ömrü saat hatta yıl olan kaynaklar vardır.



Şekil 3.12. Gama emisyonunu

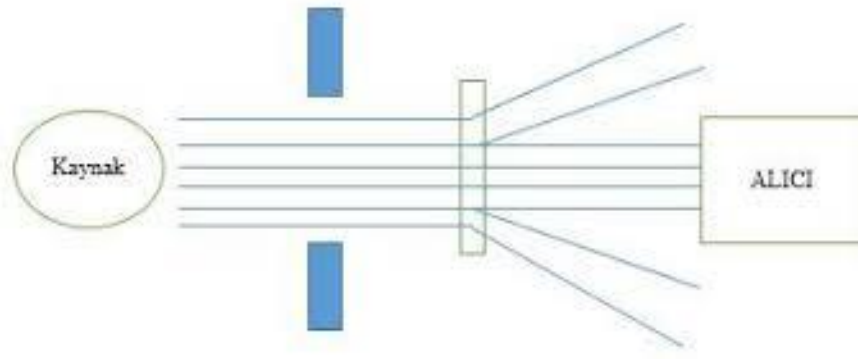
3.3. Nötron Kaynakları

Nötronlar doğal olarak yayılmazlar. Atomdan nötron sayısı protondan fazla olup atom kararsızsa nötron protona dönüşür ve beta emisyonu gerçekleşir. Radyonükleotidler nötron yaymak için ise yapay olarak üretilir ve yarı ömürleri çok kısadır. Nötron yayan nüklitlerden biri olan kaliforniyum (^{252}Cf) transuranyum bir elementtir. Bu elementin yarılanma ömrü 2,62 yıldır. Her ^{252}Cf 'nin bir fisyon olayında ortalama 3,76 nötron yayımlar. ^{252}Cf 'nin bölünmesi dışında, nötron üretmenin diğer bir yolu da nükleer reaksiyonlardır. Yani çekirdeklerin uygun parçacıklarla bombardımanı yoluyla gerçekleşir. Nötronlar radyasyon yayan sistemlerle veya radyonükleotidlerden elde edilir. Radyonüklidlerin kullanıldığı en yaygın reaksiyon, berilyumun reaksiyonu başlatmak için 3.7 MeV'den daha büyük bir enerjili alfa parçacıklarıyla bombardıman edilmesidir. Nötronların en güçlü kaynakları nükleer fisyon reaktörleridir. Uranyum-235'in bölünmesi ile parçalanma başına yaklaşık olarak 2,5 nötron yayımlanır ve bunlar daha fazla bölünmeye neden olabilir. Sonuç olarak, kendi kendine devam eden bir fisyon reaksiyonu elde edilebilir. Fisyon işleminde muazzam miktarda serbest enerji bırakılır. Fisyon başına yaklaşık 200 MeV enerji üretilir ve bu olağanüstü enerji salınımı nedeniyle nükleer enerji santralleri için çok değerli bir yakıt olarak kullanılır. Güçlü nötron kaynaklarının bir diğeri ise nötron jeneratörleridir. Yaklaşık 150 keV enerjiye sahip döteronlarla (döteryum çekirdekleri) hedef trityumun bombardıman edildiği bir reaksiyon bu jeneratörlerde kullanılır. Üretilen nötronların enerjileri yaklaşık 14 MeV'dir.

Nötron üretebilen reaksiyonların çeşitliliği bombardıman eden parçacıkların enerjisi arttıkça artar. Nötronlar birincil parçacıkların koruyucu ve diğer parçacıklarla etkileşimlerinden kaynaklanan ikincil radyasyonlar nedeniyle, yüksek enerjili hızlandırıcıların çevresinde bol miktarda üretilir. Bu nötronlar çalışan personeli sağlık açısından etkilemesi ve ortamdaki malzemenin etkilenmesi açısından önlem alınması gereken sorunlardan biridir.

3.4. Foton Azaltma ve Soğurma

Fotonların madde ile etkileşimleri yüklü parçacıklardan çok farklıdır. X veya gama ışınları maddeden geçerken bazıları emilir, bazıları etkileşim olmaksızın, bazıları ise daha düşük enerjili fotonlar olarak maddeden geçebilir. Bir fotonun bir soğurucu tarafından yavaşlatılması aşağıdaki Şekil 3.13'de görüldüğü gibi dar ışın geometrisi iyi sağlanabilir.



Şekil 3.13. Tüm etkileşimlerin olduğu “dar ışın geometrisinde” bir foton ışınının zayıflaması

Dar ışın geometrisi fotonlar ya soğurulduğunda yada birincil ışın belirli bir mesafede küçük bir alıcıya (detektöre) çarpmayacak şekilde saçıldığında gerçekleştirilir. Dar ışın geometrisinde, soğurulan fotonlar dışındakiler, etkileşime girmeden geçecek ve her biri orijinal enerjisine sahip olarak karşıdaki alıcıya ulaşacaktır. Bu geometride birincil fotonlar dar bir ışınla sınırlandırılır ve alıcı tarafından geçen fotonların çoğunluğu sayılır. Saçılan fotonların bazıları ise alıcıya ulaşamaz. Geniş veya dar ışın geometrisindeki saçılan fotonların önemli bir kısmı etkileşim olmadan alıcıya ulaşacaktır. Şekil 3.13’deki geometride bulunan kaynak ve alıcı kurşun gibi iyi bir zırh malzeme ile kaplanmıştır.

Belirli enerjideki fotonlar için zayıflatma katsayıları, dar ışın geometrisi kullanılarak belirlenir. Bir fotonun şiddetindeki değişim matematiksel olarak zırhlama malzemesinin kalınlığı ile azalan bir fonksiyon olarak ifade edilir.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

Buradaki orantı sabiti olan μ lineer azaltma katsayısıdır. Bu eşitlik tüm fotonlar mono-enerjili ve paralel bir şua ise geçerlidir. Eşitlikte I ve I_0 sırasıyla soğurucunun varlığındaki ve yokluğundaki radyasyon şiddetini ifade ederken x ise soğurucunun kalınlığını göstermektedir. Matematiksel işlemlerle μ çekilirse (3.2) eşitliği elde edilir.

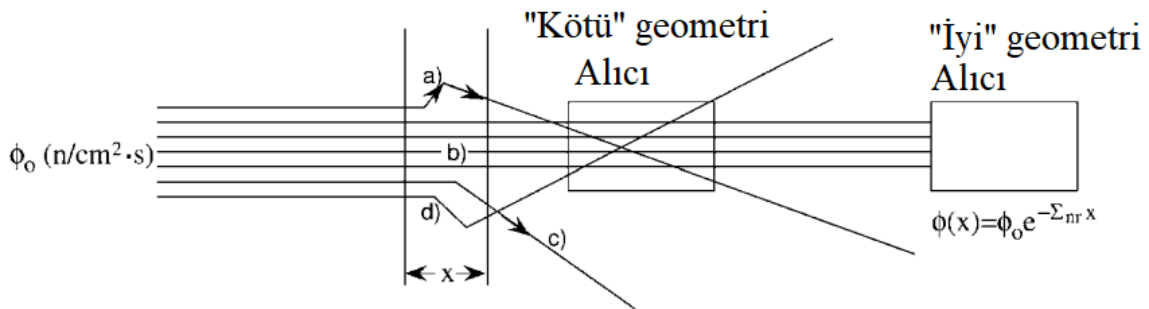
$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{x} \quad (3.2)$$

3.5. Nötron Zayıflatma ve Soğurma

Nötron şiddetini birim alandaki sayı cinsinden ifade etmek kolay, kullanışlı ve pratiktir. Akıcılık nötron/cm² veya akıcılık oranı yada akı olarak birim alan başına düşen nötron sayısı (cm².s) olarak ifade edilir. Nötronları yavaşlatan etkileşim ve onları nihayetinde bir demetten uzaklaştırılması bir olasılıktır. Yani, gerçekleşip veya gerçekleşmeyeceği kesin değildir. I₀ yoğunluğundaki nötron akısı, x kalınlığındaki zırhlama malzemesinden geçerken azalır. Nötron kaynağının şiddeti ve soğurucu maddenin nötronları uzaklaştırma katsayısı Σ_{nt} arasında bir ilişki vardır. Foton zayıflatmasına benzer olarak (3.3) eşitliği yazılabilir.

$$I = I_0 e^{-\Sigma_{nt} x} \quad (3.3)$$

Burada I₀ başlangıçtaki nötron şiddetini, malzeme azaltılan nötronların şiddetini gösterir. Bu nedenle e^{-Σ_{nt}x} bir nötronun bir etkileşim olmaksızın bir malzeme, x mesafesini kat etme olasılığını vermektedir. Deneysel ölçümlerde kullanılan iyi (dar ışın) ve kötü (geniş ışın) geometrilerin gösterimi Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Σ_{nt} soğurulan ve saçılan bütün nötronların etkileşimini kapsar. Yanı sıra demetten saçılan nötronların başka nötronlara maruz kalması, saçılma etkileşimleri ve ışının geri saptırılarak alıcıya ulaşması süreçlerini kapsar.



Şekil 3.14. x kalınlığında bir soğurucunun etkileşim şeması

Nötron uzaklaştırma tesir kesiti, Σ_{nt} mikroskobik tesir kesiti ile belirlenir, yani Σ = Nσ ifade edilir, burada N soğurucunun birim hacmindeki çekirdek sayısıdır ve Σ_{nt} cm⁻¹ birimine sahiptir.

3.6. Radyasyondan Korunma Yolları

Zaman, mesafe ve zırhlama bu üç anahtar kelime gama fotonlarından korunmak için önemlidir. Kısa çalışma süreleri ve uzun mesafeler gama fotonlarından kaynaklanan beta parçacıklarından maruziyeti azaltmada etkilidir. Beta parçacıklarında olduğu gibi küçük bir kaynaktan gelen, şiddetin artan mesafelerde azalma derecesi ters-kare yasasıyla ifade edilir. Gama fotonları beta parçacıklarına göre daha nüfuz edicidir. Bundan dolayı kaynağın büyüklüğüne bağlı olarak daha fazla zırhlama gerekir. Gama kaynakları büyükse kalın zırhlamalar gerekir. Bu amaçla özel malzemeler veya kurşun bloklar kullanılır. Gama ve beta için temel fark zırhlama değildir. Beta parçacıkları yüklü iyonlaştırıcı parçacıklardır ve bunları durdurmak için alüminyum gibi düşük atom numaralı elementler bile yeterlidir. Öte yandan bir gama zırhlama malzemesi olarak genellikle kurşun gibi atom numarası büyük elementler tercih edilir. Ancak yine de gama ışınlarının bir kısmı zırh malzemesini geçer. Çünkü gama ışınları yüksüzdür. Gama ışını geçirme oranı zırh malzemesinin kalınlığının artmasıyla üstel olarak azalır. Gama ışınlarına karşı kullanılan zırh malzemesi her zaman kaynak dikkate alınarak değerlendirilmeli ve gama ışınlarının şiddeti güvenilir seviyeye düştüğünden emin olunmalıdır. Radyasyondan korunmanın en basit kuralları Şekil 3.15'te sunulmuştur.



Şekil 3.15. Radyasyondan korunma yolları

3.7. Nötron Zırhlama Malzemeleri

Nötron zırhlama malzemelerinde hidrojen gibi atom numarası düşük elementleri içeren malzemeler tercih edilir. Hızlı nötronlar için nötronları yavaşlatan malzemeler, elastik ve elastik olmayan saçılma yoluyla, nötronların termal enerjilere ulaşmaları ve daha sonra

termal nötronları tutan malzemeler kullanılır. Hidrojenler özellikle yüksek enerjili nötronları uzaklaştırmada çok etkilidir. Çünkü nötron ve hidrojen büyüklük olarak birbirine yakın olduklarından çarpışma sonucunda nötronun enerjisi yaklaşık yarı yarıya azaltılır. Saçılan nötronların tesir kesiti enerjileri az olduğundan dolayı daha büyüktür ve ortalama serbest yol uzunluğu azalır.

Birçok nötron zırhlayıcı madde saçılma etkileşimlerinden oluşan fotonlarını veya gama ışınlarını yakalar. Bu tür maddelere bor ve lityum eklenerek en aza indirilebilir. Lityum-6, nötron emilimi yaparak gama ışınlarını yakalar. Helyum ve trityumdan oluşan atomlar kolayca emilir. Doğal borun içeriği %20 ^{10}B 'dir. B ve Li reaksiyonları yoluyla hızlı nötronlar termal nötronların sahip olduğu enerji seviyesine indirilebilir. Dolayısıyla bu tür malzemeler çok etkili zırhlama malzemesidir.

Parafin ve su (H_2O) gibi hidrojenli malzemeler elastik saçılmanın tesir kesitinin yüksek olması nedeniyle potansiyel sorunlar olmadan nötron zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir. H_2O nötron zırh malzemesi olarak kullanıldığında, sızıntıyı önlemek, korezyonu en aza indirmek gerekir ve kirleticileri sudan uzak tutmak gerekir. Bu genellikle bu demineralizasyon aracılığı ile yapılır. Kurşun, demir, tungsten ve tükenmiş uranyum gibi metaller nötron zırhlama açısından zayıf zırhlama malzemesi olabilecek malzemelerdir. Demir, tungsten ve kullanılmış uranyumlu malzemeler özellikle nükleer reaktörlerde gama zırhlaması olarak kullanılmaktadır.

Tungsten yoğun bir elementtir ve nötron zırhlamada neredeyse kurşun kadar etkilidir. Nötron yakalama tesir kesiti kurşundan etkilidir, ancak yakalama reaksiyonlarından dolayı ikincil gama radyasyonu üretilir. Tükenmiş uranyum nükleer yakıt işlemlerinden kolayca elde edilebilen ve gama ışınları için iyi bir zayıflatıcıdır. Uranyumun nötron zırhlama kapasitesi hemen hemen kurşunla aynıdır. Tükenmiş uranyum fisyon reaksiyonları sırasında gama yayan ürünler üretebilir.

Boraks (sodyum borat) kristal toz halindedir. Çeşitli zırhlama konfigürasyonlarına göre şekillendirilmiş olup sızıntısız, ucuz ve etkilidir. Bor oksit, borik asit ve bor karbür gibi boratlı su ve boratlı polietilen de nötron zırhlamada faydalıdır. Boral adı verilen ve alüminyum kaplı $\text{Al-B}_4\text{C}$ sandviç malzeme de bu amaçla kullanılabilir. Boraksa ayrıca tercih edilen nötronları soğurmak ve aktivasyon ürünlerini ve gama ışınlarını azaltmak için çelik eklenebilmektedir.

Beton ve toprak nötron kaynakları için tercih edilen zırhlama malzemelerdir. Özellikle nükleer reaktörlerin ve hızlandırıcıların etrafında yoğun oldukları için hidrojen ve nötron yakalamayı destekleyen ve kolayca şekillendirebilen hafif malzemelerdir. Baritler, demir porland ve kolemanit agregası bunlardan bazılarıdır. Nötron zırhlamalarında kullanılan pek çok beton çeşidi vardır. Barit beton nötron emilimi için bor ve hızlı nötron ılımlılaştırılması için hidrojen içerir. İyi bir gama zırh malzemesidir. Kolemanit agrega olarak kullanılır ve içerdiği bor nedeniyle nötron yakalamayı artıran hidratlı kalsiyum borat içerir. Nötron yakalamayı kolaylaştıran katkı maddeleri konstrüksiyona dahil edilebilir.

Boraksa ayrıca polietilen de eklenebilir. Hidrojen etkileşimlerinden kaynaklanan termal nötronları soğurmak için kullanılır. Su ile genişletilmiş polietilen (WEP), özellikle tercih edilen etkili bir nötron zırhlama formülasyonudur. Bir diğer zırhlama malzemesi lityum hidrürdür. Lityum hidrür ağırlıkça yaklaşık %12,6 hidrojen içerir ve çok etkili bir nötron zayıflatma malzemesidir. Aktif olarak su ile birleşen zırhlama malzemelerinin kapsülleme veya başka yollarla sudan korunması gerekmektedir. Lityum hidroksit ise termal nötronları soğurmak için çoğunlukla su ile karıştırılır ve nükleer reaktörlerde tercih edilir.

3.8. Radyasyonun Canlılar Üzerindeki Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyon DNA hasarı yoluyla hücrelere zarar verir. DNA'daki hasarlar kanser yada genetik bozukluğa neden olur. Ayrıca hücre ölümüne de neden olabilir. Kanser ve genetik etkiler stokastik etkiler olarak adlandırılır.

Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) stokastik etkiler için doz limitini çalışanlar için 20 mSv/y ve halk için 1 mSv/y olarak belirlemiştir. Yüksek dozlarda, çoklu hücre ölümü ve organların işlevini tehlikeye atabilir ve bu hayati tehlike oluşturabilir. Bu etkilere deterministik etki denir. Aşağıda zararlı etkilerin gözlenmediği eşik değerleri verilmiştir. Bu eşğin üzerinde olasılığın ve etkinin şiddeti doza bağlı olarak artar.

Deterministik etkilerde yüksek doz nedeniyle ölüm, katarakt indüksiyonu, ciltte eritem, cilt ülseri, akciğer fibrosisi yer alır. ICRP deterministik etkinin doz oranlarını işçiler için 500mSV/y ve halk için 50 mSv/y olarak belirlerken, ve gözlerde işçiler için 150 mSv/y

ve halk için 15 mSv/y olarak belirlemiştir. Diğer organlar için 20 mSv/y stokastik etkiler sınırı, organlar üzerindeki deterministik etkileri kendiliğinden önler. Radyasyonun diğer etkisi de mutasyonlardır. Büyük hasarlar hücreyi öldürürken küçük hasarlar genleri veya gen kümesini değiştirir. Büyük organizmalarda (memelilerde) hücresel mekanizma çok karışıktır. Radyasyonun rutin hasarları bunlar tarafından onarılır. Memelilerde hücre zarı hücreyi hücre bölünmesi sırası dışında her zaman korur. Hidrojen peroksit etkili penetre oluşturmadığından bu membran hücre sıvısında kiradiyasyon etkisini azaltır. Hücre bölünmeye uğradığında bu membran çözülür ve çekirdek toksinlere maruz kalır. Hızlı bölünenler ise radyasyon hasarına duyarlıdır. Hücreler bölünme oranlarına göre sıralandığında gonadlar uterus, mide ve bağırsak astarı, kemik iliği şeklinde olur. Kas ve sinir hücreleri de bölünür lakin yavaştır. Bundan dolayı zarar görmezler.

Akciğer hücreleri doğrudan çevresel maddeler maruz kaldıkları için bir dizi risk altındadır. Fetüs hızla bölünen bir hücrelere sahiptir. Bu yüzden hamile kadınlar dikkatli olmalıdır. Yüksek dozda maruziyet ölüme ve kalıcı hasarlara yol açar. Bu etkiler radyasyon dozunu ne kadar ve nasıl bir hızla alındığına bağlı olarak değişir. Radyasyon dozları akut ve kronik doz olarak iki kategoride incelenir.

Akut doz tanımlanabilen semptomlar modeli yani akut radyasyon sendromu olarak adlandırılır. Radyasyon hasarı ≥ 1 Gy akut dozlarında ve $\geq 4,5$ Gy'lik tüm vücut dozlarına maruz kalan kişilerin %50'sinin radyasyondan etkilendiği gibi istatistiksel bir beklentiye yol açar. Bu miktarlarda radyasyona maruz kalan kişiye tıbbi müdahale olmazsa 60 gün içinde ölebilir. Çoğu hastalıkta önerilen tedavi ve iyileşme beklentileri kişiden kişiye değişir ve bireyin yaşına ve genel sağlık durumuna bağlıdır. Kemik iliği sendromunda kullanılan doz miktarı (>1 Gy) en hızlı bölünen hücrelere zarar verir. Belirtileri arasında iç kanama, yorgunluk, bakteriyel enfeksiyonlar ve ateş yer alır. Daha yavaş bölünen hücrelerin (mide ve bağırsak astarı) radyasyona maruz kalması gastrointestinal sistem sendromu (>10 Gy) olarak tanımlanır. Semptomları, bulantı kusma, ishal, elektrolitik dengesizlik, sindirim yeteneğinin kaybı, ülser kanaması, kan yapıcı organ semptomlarıdır. Merkezi sinir sistemi 50 Gy'den fazla radyasyona maruz kalırsa çoğalamayan bu hücrelerde, koordinasyon kaybı, konfüzyon, koma, konvülsiyon şok ve kan zehirlenmesi belirtileri görülebilir. Bilim insanları bu koşullar altında ölümün temel sebebinin radyasyon olmadığını daha çok iç kanamadan kaynaklandığını, ayrıca beyinde sıvı ve basınç artması olduğunu belirtmektedir. Akut dozun diğer etkileri ise 2

veya 3 Gy'in cilde uygulanması durumunda ciltte kızarma, yanıklar, saç tellerinde hasar, ve saç dökülmesi durumları görülebilir. Troid bezine 0,5 Gy radyasyon uygulanması ise iyi huylu tümörlere sebep olur.

Kronik doz, uzun süre alınan doz demektir. Kronik doz akut doza göre daha iyi tolere edilebilir. Vücut kronik dozun sebep olduğu hasarı onarmak için gerekli zamana sahiptir. Vücut ayrıca ölü ve işlevsiz hücreleri bu süreçte sağlıklı hücrelere dönüştürür. Mesleki maruziyet limitleri geleneksel dozimetreler, rozetler ve termoluminesans (TLD) tabanlı detektörler ile belirlenir. İç dozlar metabolik modeller kullanılarak hesaplanmalıdır. Alım (inhalasyon, sindirim veya deri alımı) hava örneklemeyle değerlendirilir. Vücut etrafındaki taşınanlar modellenebilir ve maruz kalınan radyasyon dozimetrisi için emilen ve eşdeğerleri hesaplanabilir.

3.9. Fotonların/Nötronların Madde ile Etkileşimi

Dolaylı yollardan iyonize olan yüksüz tüm parçacıklar arasında fotonlar ve nötronlar en önemlileridir. Radyasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılırlar. Nötronların buraya dahil sebebi radyasyon onkolojisinde uygulama alanı olması ve aynı zamanda endüstride fizikçiler mühendisler ve teknoloji uzmanları için zırlama açısından büyük bir endişe taşımasıdır.

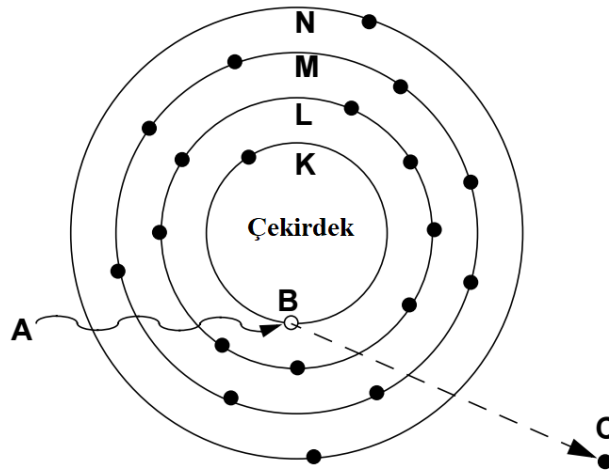
3.9.1. Fotonların Madde ile Etkileşimi

Elektromanyetik radyasyonu, radyo ve televizyon dalgaları, mikrodalgalar, görünür ışık ultraviyole, X ve gama ışını fotonları oluşturur. Fotonlarda dikkate alınan enerji aralığı kabaca 10 ile 50000 keV (0,01 ile 50 MeV) arasındadır.

X ve gama-ışını fotonları arasındaki fark oluşum mekanizmalarıdır. X ışınları hızlı bir parçacığın adım adım durdurulmasından veya elektronik seviyeler arasındaki geçişlerden oluşurken gama ışınları çekirdekteki bazı olaylardan dolayı oluşur. Bu süreçlerde oluşan en küçük enerji paketine foton denir. Fotonların madde ile etkileşiminden bunların neden zararlı olduğunun ve radyasyondan korunmada nasıl bir yol izleneceğinin tespiti yapılır. Fotonlar madde ile baskın olarak üç yolla etkileşime girmektedir. Bunlar fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift üretilimidir.

3.9.1.1. Fotoelektrik Etki

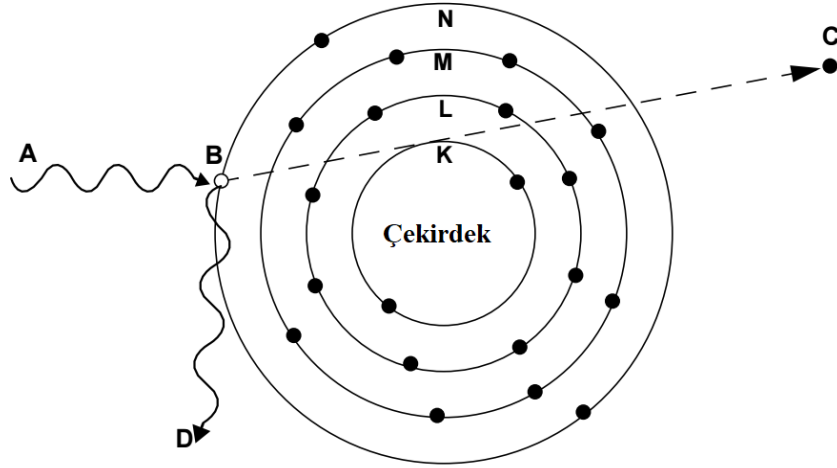
X ve gama ışını fotonlarının madde ile etkileşime girdiği olaylardan biri fotoelektrik etkidir. Bu etkileşimde foton atomik bir elektronla çarpışarak enerjisini elektrona aktarır. Eğer aktarılan enerji yeterliyse elektronu yörüngesinden çıkarır ve atom iyonize olur. Elektronun enerjisi fotonun enerjisi ve serbest bırakılan elektronun bağlanma enerjisinin arasındaki fark kadardır. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi gelen A fotonu bir elektrona eşit veya daha büyük enerjiye sahipse K kabuğundaki B fotonu yayımlanır ve kalan enerji C elektronuna aktarılır.



Şekil 3.16. Fotoelektrik Etki

3.9.1.2. Compton Saçılması

X ve gama ışınlarının madde ile etkileşime girdiği bir diğer olay Compton olayıdır (Şekil 3.17). Bu olayda foton serbest kabul edilen dış tabaka elektronu ile çarpışır ve elektrona enerjisinin bir kısmını aktarır. Enerjisinin geri kalanı ise daha düşük enerjili bir foton olarak yayılır. İkinci foton birinciden genellikle farklı bir yönde hareket eder. Bu olaya saçılma denir. Compton olayında elektronun bağlanma enerjisi atomik yörüngede etkileşen fotona göre önemsizdir. Orjinal fotonun enerjisi elektron ve ikinci foton arasında sabit bir kurallar dizisine göre paylaşılır.

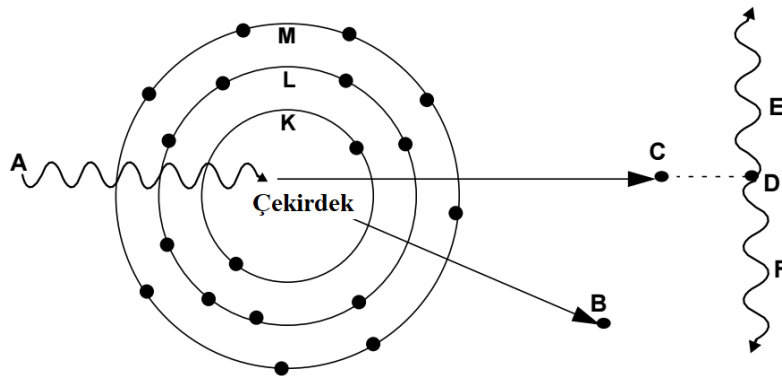


Şekil 3.17. Compton Saçılması

Şekil 3.17'ye göre gelen A fotonu, bağlanma enerjisinden çok büyük enerjilidir. Foton, B elektronuyla etkileşerek enerjisini B elektronuna aktarır. C elektronuna aktarılan enerji ile atomdan ayrılır ve geri kalan enerji düşük enerjili D fotonu olarak yayılır.

3.9.1.3. Çift Üretimi

X- ve gama ışını fotonlarının etkileşime girdiği bir diğer olay ise çift üretimi olarak bilinir (Şekil 3.18). Fotonun bütün enerjisini çekirdeğin Coulomb alanında maddeye dönüştürülerek elektron ve pozitron olarak bilinen parçacığa dönüşür. Bu etkileşim için fotonun enerjisi en az 1,02 MeV olmalıdır, yani fotonun enerjisi durgun elektron kütlesinin iki katı olmalıdır. Kalan enerjisi ise elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Bu iki parçacığın tekrar birleşme ihtimaliyeti vardır. Bu olaya yeniden birleşme adı verilir. Bu olay sonucunda ise madde tekrar enerjiye dönüşür.



Şekil 3.18. Çift üretim süreci

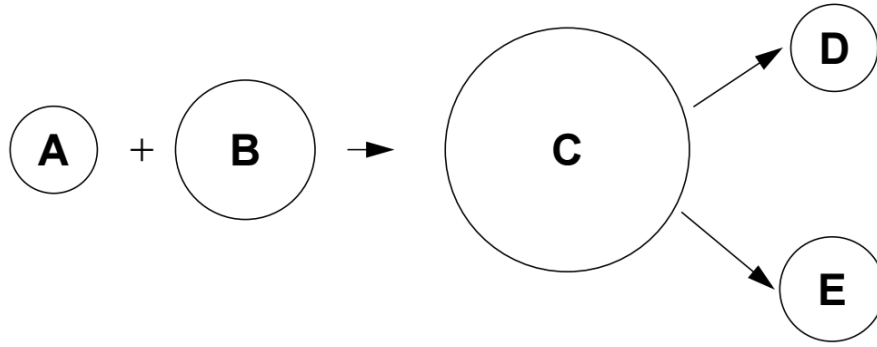
Enerjisi 1,02 MeV'eeşit veya daha büyük olan Afotonu, bir çekirdeğin Coulombalanında B elektronu ve C pozitronuna dönüşür. Eğer B elektronu ve C pozitronu tekrardan birleşirse yok olma (yeniden birleşme) süreci ile E ve F fotonlarına dönüşür. Bu yok olma fotonları birbirinin tam tersi yönlerinde hareket eder.

Fotonlar madde ile birçok şekilde etkileşime girebilse de çoğu bilim adamı tarafından yukarıda saydığımız üç etkileşim en önemlileridir. Fotonun hangi etkileşime girebileceğini fotonun enerjisi ve geçtiği malzeme belirler. Genel olarak enerjisi 100 keV'den daha düşük olanlar için fotoelektrik olayı, enerjisi 100 keV'den büyük ise Compton olayı ve enerjisi 1,02 MeV veya daha büyük ise çift oluşum olayı meydana gelir.

Enerji 7 MeV veya daha fazla ise foton direkt çekirdekle etkileşime girebilir. Fotodisintegrasyon olarak bilinen bu olayda nötronlar üretilir. Her bir etkileşimin enerji aralıkları fotonun içinden geçtiği malzemeye göre belirlenir. Örneğin çift oluşumda foton enerjisi 4 ile 5 MeV aralığındaki foton enerjileri kurşun içinde baskındır. Foton malzeme ile etkileştiğinde soğulur veya saçılır. Bu olayların oluşma tesir kesitlerinin toplamı azaltma olarak adlandırılır.

3.10. Nötronların Madde ile Etkileşimi

Nötron protona yakın bir kütleyle sahiptir ve yüksüzdür bu yüzden protondan farklı davranır. Nötronlar fotodisintegrasyon, nükleer etkileşim veya fisyon olaylarıyla oluşabilir. Nötronlar sahip oldukları enerji miktarına göre kabaca hızlı ve yavaş olarak bilinen kategorilerde ikiye ayrılırlar. Çok geniş bir enerji aralığı olduğundan 0,5 eV'un altındaki nötronlar yavaş nötronlar olarak adlandırılır. Bu değer altında bulunan enerjilerdeki nötronların soğurulması için çoğunlukla kadmiyum kullanılır. Fisyon olayı çok ağır bir çekirdeğin ikiye ayrılmasıyla oluşur. Bazen kendiliğinden oluşur bazen de çok düşük enerjili bir nötron tarafından tetiklenebilir. Örneğin nötron ^{92}U çekirdeği ile etkileşerek kararsız duruma getirilir ve bir süre sonra iki büyük çekirdeğe parçalanır. Fisyon olayında bir veya daha fazla nötron oluşabilir ve genellikle bu nötronların enerjileri büyüktür ve hızlı nötronlar olarak bilinirler. Çekirdeğin bölünmesiyle oluşan ürün çekirdeklerin neler olacağı olasılıksal bir sonuçtur. Bu süreç Şekil 3.19'da temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Nötronla bombardıman edilen ana çekirdeğin nükleer parçalanma etkileşimi

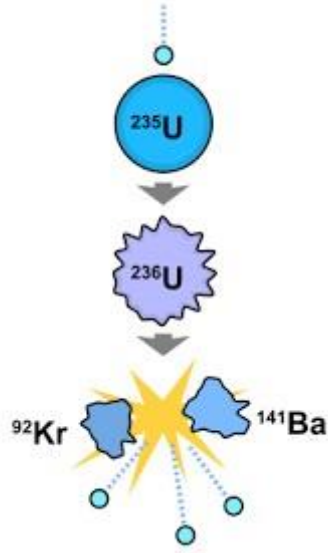
Şekil 3.19'da A nötronu B çekirdeği ile etkileşime girer ve C bileşik çekirdeği oluşur.

10^{-12} s veya daha az sürede D parçacığı dışarı atılır ve E çekirdeği oluşur.

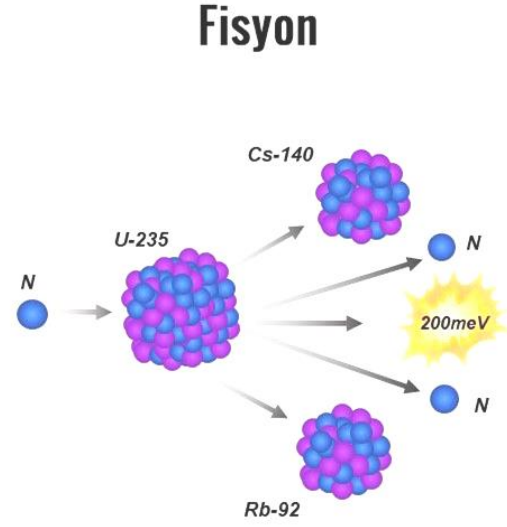
Nötronlar yüksüz oldukları için malzemelerin çekirdekleri ile etkileşime girerler. Elastik saçılmada nötron enerjisini çekirdekle paylaşır ve çekirdek uyarılmış durumda kalmaz. Etkileşen çekirdeğin kütlesi ne kadar büyükse oluşan nötronun enerjisi de o kadar büyük olur ve çekirdeğe aktarılır. Bu da çekirdeği yavaşlatan yegâne yöntemdir. Burada kullanılan malzemelere moderatör denir. Hidrojen en iyi moderatörlerdendir. Bunun nedeni, su ve parafin gibi yapısında çok hidrojen bulduran malzemeler genellikle moderatör olarak kullanılır. Diğer bir moderatör maddelere örnek olarak berilyum ve karbon verilebilir. Hızlı nötronlar elastik olmayan saçılma sürecinde çekirdeği uyarılmış halde bırakır. Bu durumda çekirdek gama ışını fotonu yayımlayarak kararlı hale geçer.

Nötron enerjisi 10 MeV veya daha büyük olduğunda, ikinci bir nötron çekirdek tarafından yayımlanır. Böylece elastik olmayan etkileşimlerden önceki nötron ile beraber iki nötron elde edilir. Sonra bir foton ya da etkileşim fotonu olmadan (n,n) veya (n,2n) reaksiyonları ile nötronlar üretilir ve çekirdek yarı uyarılmış halde olur. Nötronların madde ile en çok etkileşiminde en çok görülen olay, basit yakalamadır. Bazı çekirdeklerde termal aralığın üzerinde, belirli nötron enerjilerinde gerçekleşme olasılığı daha yüksektir ve buna rezonans yakalama denmektedir. Kadmiyumun, 0,5 eV'den daha düşük enerjili nötronlarla etkileşiminde basit yakalama (n, γ) olayının olma olasılığı yüksektir. Kadmiyum bu yüzden nükleer santrallerde kontrol çubuklarında yaygın kullanılır. Fakat etkileşimden sonra foton üretildiğinden zırh malzemesi olarak kullanımı uygun değildir.

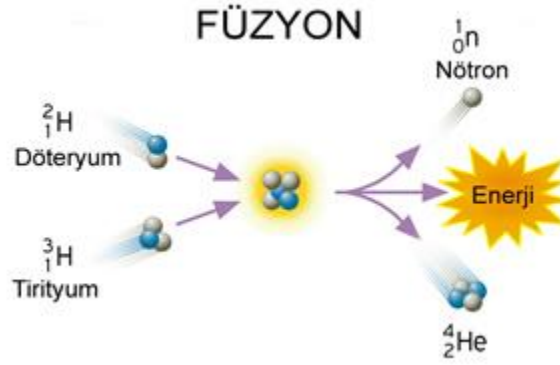
Son olarak 100 MeV veya daha fazla enerjiye sahip nötronların çekirdek tarafından yakalanması farklı parçacık türlerininemisyona neden olmaktadır. Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de nötronların madde ile etkileşimine çeşitli örnekler sunulmuştur.



Şekil 3.20. ^{235}U aracılığı ile nötron üretimi



Şekil 3.21. Filyon olayı ile nötron üretimi



Şekil 3.22. Füzyon olayı ile nötron üretimi

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında WinXCOM bilgisayar programı, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 simülasyon kodları aracılığı ile Vitroley-1 ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$), Vitroley-105 ($Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$) ve Vitroley-106a ($Zr_{57}Nb_5Al_{10}Cu_{15,4}Ni_{12,6}$) ve titanyum tabanlı metalik camlardan $Ti_{32,8}Zr_{30,2}Ni_{5,3}Cu_9Be_{22,7}$, $Ti_{55}Zr_{10}Cu_9Ni_8Be_{18}$ ve $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$ numuneleriningama ve nötron radyasyonları zırhlama parametreleri incelenmiştir.

4.1. GEANT4 Simülasyon Kodu Süreci

GEANT4, parçacıkların maddeden geçişini simüle etmeye yönelik bir kod setidir. İzleme, geometri, fizik modelleri ve isabetler dâhil olmak üzere eksiksiz bir işlevsellik yelpazesi içerir. Sunulan fiziksel süreçleri, bazı durumlarda <1 keV'den başlayan ve TeV mertebesine kadar geniş bir enerji aralığında, elektromanyetik, hadronik ve optik süreçlerin yanı sıra çok sayıda uzun ömürlü parçacık, malzeme ve element içeren kapsamlı bir aralığı kapsar. Kullanılan fizik modellerini ortaya çıkarmak, karmaşık geometrileri ele almak ve farklı uygulama gruplarında optimum kullanım için kolay adaptasyonu sağlamak üzere tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Bu kod dizisi, dünya çapındaki fizikçiler ve yazılım mühendislerinin işbirliğinin sonucudur. Yazılım mühendisliği ve nesne yönelimli teknoloji kullanılarak oluşturulmuş ve C^{++} programlama dilinde uygulanmıştır. Parçacık fiziği, nükleer fizik, hızlandırıcı tasarımı, uzay mühendisliği ve tıbbi fizik alanlarındaki uygulamalarda kullanılmaktadır. Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların GEANT4 simülasyon çalışmaları sürecinde GEANT4/TestEm13 paketi, seçilen metalik camların gama ışını zırhlama parametrelerini elde edecek şekilde dizayn edilmiştir. Öncelikle simülasyon paketinde her metalik cam tanımlanmış ve modellenmiştir. Bu kapsamda metalik camların element bileşenleri ve şekilleri tanımlanmıştır. Daha sonra modellenen metalik camların üzerine tek enerjili 10.000.000 gama ışını gönderilmiştir. Son olarak kütle ve lineerazaltma katsayıları doğrudan simülasyon çıktısından elde edilmiştir. Bu prosedür seçilen her gama ışını enerjisi için tekrarlanmıştır.

Metalik camların nötron zırlama yeteneklerinin değerlendirilmesi amacıyla GEANT4/Hadr03 paketi kullanılmıştır. Gama ışını zırlama kısmında yapıldığı için her metalik camınsimülasyon paketinde tanımlanmasına tekrar ihtiyaç duyulmamıştır. Bu kez modellenen metalik camlar 4,5 MeV mono-enerjili 10.000.000 nötron ile bombardıman edilerek metalik camlardan geçen nötronların sayısı elde edilmiştir. Geçen nötron sayılarına göre incelemeler yapılmıştır. Daha kapsamlı nötron zırlama karakteristiklerini incelemek için benzer süreç farklı enerjilerde ve farklı numune kalınlıklarında tekrar edilmiştir. Şekil 4.1’de GEANT4 ile gama zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek sunulurken, Şekil 4.2’de ise nötron zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “numune tanımlama” ve “input” dosyası ekranı için bir örnek sunulmuştur.

```

/run/initialize
/testem/det/setMat Ti3
/testem/det/setSize 0.01 cm
/gun/particle gamma
/gun/energy 0.015 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

/gun/energy 0.02 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

/gun/energy 0.03 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

/gun/energy 0.04 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

/gun/energy 0.05 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

/gun/energy 0.06 MeV
/run/reinitializeGeometry
/run/initialize
/run/beamOn 1000000

^G Get Help      ^O WriteOut     ^R Read File    ^Y Prev Page    ^K Cut Text     ^C Cur Pos
^X Exit          ^J Justify      ^W Where Is    ^V Next Page    ^U UnCut Text   ^T To Spell

```

```

===== run summary =====

The run is: 1000000 gamma of 15 keV through 100 um of Ti3 (density: 5.4 g/cm3 )

Process calls frequency ----> Transportation = 148409 compt = 2546 phot = 849045

Nb of incident particles unaltered after 100 um of Ti3 : 148409 over 1000000 incident particles. Ratio = 14.841 %
----> CrossSection per volume: 190.78 cm^-1 CrossSection per mass: 35.329 cm2/g

Verification from G4EmCalculator:
compt= 10.154 mm2/g phot= 35.281 cm2/g total= 35.383 cm2/g
Expected ratio of transmitted particles= 14.798 %

----- Ranecu engine status -----
Initial seed (index) = 0
Current couple of seeds = 1874018055, 793872338
-----

```

Şekil 4.1. GEANT4 ile gama zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek

```

G4Material* Zr1 =
new G4Material("Zr1", density=6.9g/cm3, ncomponents=5);
Zr1->AddElement(Be, fractionmass=3.378*perCent);
Zr1->AddElement(Ti, fractionmass=1.804*perCent);
Zr1->AddElement(Ni, fractionmass=9.777*perCent);
Zr1->AddElement(Cu, fractionmass=13.2324*perCent);
Zr1->AddElement(Zr, fractionmass=62.609*perCent);

G4Material* Zr2 =
new G4Material("Zr2", density=6.57g/cm3, ncomponents=5);
Zr2->AddElement(A, fractionmass=3.7*perCent);
Zr2->AddElement(Ti, fractionmass=3.282*perCent);
Zr2->AddElement(Ni, fractionmass=11.75*perCent);
Zr2->AddElement(Cu, fractionmass=15.597*perCent);
Zr2->AddElement(Zr, fractionmass=65.671*perCent);

G4Material* Zr3 =
new G4Material("Zr3", density=6.8g/cm3, ncomponents=5);
Zr3->AddElement(A, fractionmass=3.526*perCent);
Zr3->AddElement(Ni, fractionmass=9.664*perCent);
Zr3->AddElement(Cu, fractionmass=12.788*perCent);
Zr3->AddElement(Zr, fractionmass=67.951*perCent);
Zr3->AddElement(Nb, fractionmass=6.071*perCent);

G4Material* Ti1 =
new G4Material("Ti1", density=5.541g/cm3, ncomponents=5);
Ti1->AddElement(Be, fractionmass=3.78*perCent);
Ti1->AddElement(Ti, fractionmass=29.807*perCent);
Ti1->AddElement(Ni, fractionmass=5.74*perCent);
Ti1->AddElement(Cu, fractionmass=18.566*perCent);
Ti1->AddElement(Zr, fractionmass=58.899*perCent);

G4Material* Ti2 =
new G4Material("Ti2", density=5.03g/cm3, ncomponents=5);

/run/initialize
/testhadr/det/setSize 10 mm
/testhadr/det/setMat Ti3
/gun/particle neutron
/gun/energy 4.5 MeV
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat A690
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat A308
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat A286
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat X750
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat Zirca
/run/beamOn 10000000

/run/initialize
/testhadr/det/setMat Zr1
/run/beamOn 10000000

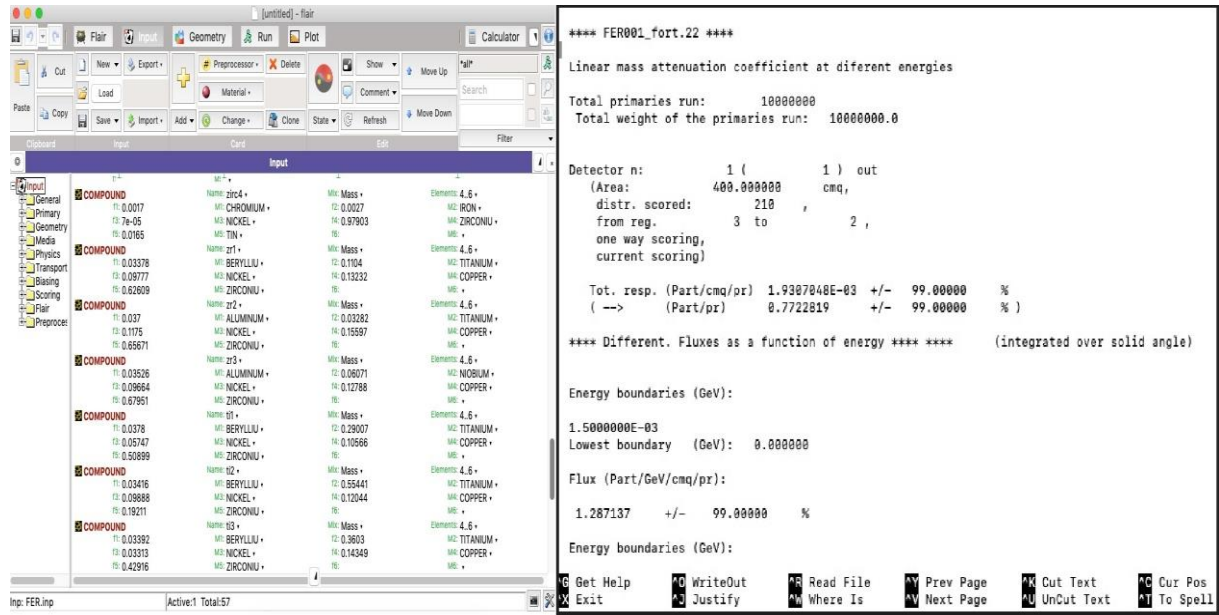
```

Şekil 4.2. GEANT4 ile nötron zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “numune tanımlama” ve “input” dosyası ekranı için bir örnek

4.2. FLUKA Simülasyon Kodu Süreci

FLUKA kodu, hadronların, leptonların ve fotonların 1 keV'den başlayarak (termal enerjilere kadar takip edilen nötronlar hariç) TeV mertebesine kadar herhangi bir malzemedeki parçacıkların etkileşimi ve taşınması için hazırlanmış genel amaçlı bir Monte Carlo kodudur. Her adımın sağlam fizik temellerine sahip olduğu mikroskobik bir yaklaşımla, bütünlük ve hassasiyet açısından en iyi fizik modellerini dahil etmek amacıyla inşa edilmiştir. Güvenilirlik, tek etkileşim düzeyinde parçacık üretim verileriyle karşılaştırılarak aranır. Kalorimetre çözünürlükleri, yoğun hedef verimleri gibi integral veriler üzerinde ayarlama yapılmamaktadır. Bu nedenle, tüm enerjiler ve hedef/mermi kombinasyonları için sabitlenmiş minimum serbest parametrelerle nihai tahminler elde edilebilir. Karmaşık problemlerin sonuçlarının yanı sıra ölçeklendirme yasaları ve özellikleri de temeldeki fizik modellerinden doğal olarak ortaya çıkar ve temel korunum yasaları öncelikli olarak yerine getirilir. Üstelik mikroskobik yaklaşım, etkileşimler içindeki ve parçacık yağmuru bileşenleri arasındaki korelasyonları korur ve hiçbir deneysel verinin bulunmadığı durumlarda tahminler sağlar. Gerektiğinde hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaya olanak tanıyan güçlü önyargı teknikleri yerleşiktir. Manyetik alanda da çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. FLUKA kodu ile çalışma sürecinde de GEANT4 çalışmalarına benzer şekilde öncelikle metalik camlar

tanımlanmıştır ve daha sonra tek enerjili 10.000.000 gama ışınları numune üzerine gönderilmiştir ve sonuçlar elde edilmiştir. Aynı süreçler her bir gama ışını enerjisi için ve nötron zırlama çalışmaları için tekrarlanmıştır. Şekil 4.3’de FLUKA ile radyasyon zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek sunulmuştur.



Şekil 4.3. FLUKA ile radyasyon zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası ve “sonuç” ekranı için bir örnek

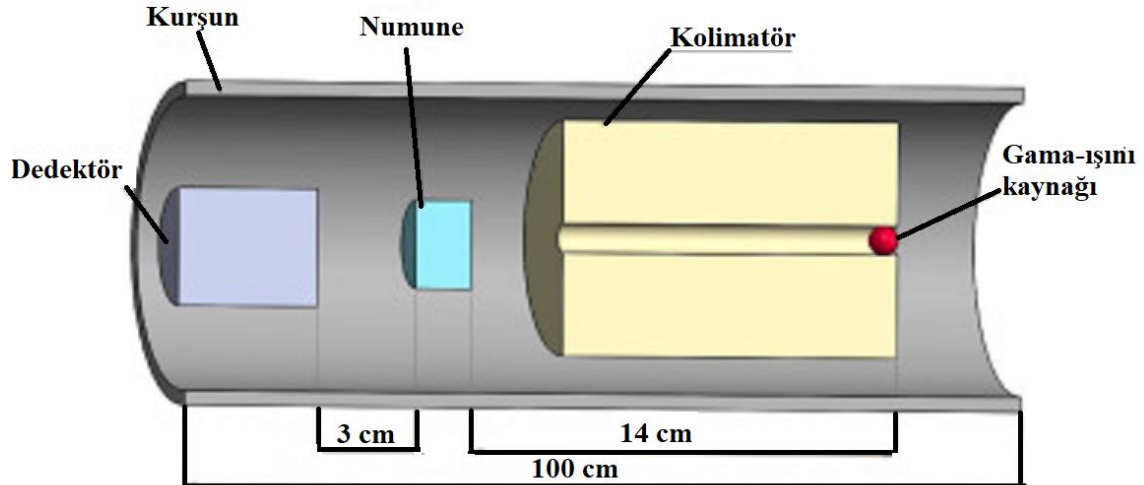
4.3. MCNP6 Simülasyon Kodu Süreci

Monte Carlo N-Parçacığı anlamına gelen parçacık radyasyon taşıma kodu MCNP, kritiklik, koruma, dozimetri, dedektör tepkisi ve diğer birçok uygulama için 37 farklı parçacık tipini taşıyan genel amaçlı üç boyutlu bir simülasyon kodudur. MCNP, Monte Carlo N-Parçacığı kodu, nötronlar, fotonlar, elektronlar, iyonlar ve diğer birçok temel parçacık dahil olmak üzere 1 TeV/nükleona kadar birçok parçacığın genel amaçlı taşınması için kullanılabilir. Bu parçacıkların taşınması, birinci, ikinci ve dördüncü derece kullanıcı tanımlı yüzeylerle sınırlanan, yapıcı bir katı geometride tanımlanan malzemelerin üç boyutlu bir temsili yoluyla gerçekleştirilir. Ek olarak, karmaşık geometriyi tanımlamak için alternatif bir yol sağlayarak, yapıcı bir katı geometri hücresi içine bir ağ yerleştirerek problem geometrisini hibrit modda tanımlamak için harici yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağlar kullanılabilir.

Tablolaştırılmış nükleer ve atom verileri ve/veya fizik modelleri, bir parçacığın taşıma işlemi sırasında maruz kaldığı her çarpışma olayını simüle etmek için kullanılır. Tipik olarak, düşük enerji bölgesinde, mermi parçacıklarının (örneğin, nötronlar, fotonlar, hafif iyonlar) ve hedef çekirdeklerin bir alt kümesi için tablo halindeki nükleer ve atomik veriler kullanılır. MCNP kodu, yüzey akımı ve akısı, hacim akışı (iz uzunluğu), nokta veya halka dedektörleri, parçacık ısıtması, fisyon ısıtması, parçacık sayımları ve enerji veya yük birikimi için darbe yüksekliği hesaplaması, örgü hesaplamaları, radyografi hesaplamaları, pertürbasyon/duyarlılık verilerini ve özel çetele tedavilerinden oluşan bir koleksiyon gibi çok sayıda hesaplamaları içerir. Bu veriler ve bunların istatistiksel belirsizlikleri, bağımsız geçmiş veri katkıları topluluğu genelinde hesaplanabilmektedir.

MCNP kodundaki tüm özellikler Windows, Linux ve macOS platformlarında kullanılabilir. MCNP kodunun tahminlerini kullanan uygulama alanları arasında radyasyondan korunma ve dozimetri, radyasyon kalkanı, radyografi, tıbbi fizik, nükleer kritiklik güvenliği, kritik ve kritik altı deney tasarımı ve analizi, dedektör tasarımı ve analizi, nükleer petrol kuyusu kaydı, hızlandırıcı hedef tasarımı, fisyon ve füzyon reaktörü tasarımı, dekontaminasyon ve hizmetten çıkarma ve nükleer korumalar ve nükleer silahların yayılmasının önlenmesi gibi konular bulunmaktadır.

Şekil 4.4'te MCNP6 uygulamalarının gerçekleştirildiği simülasyon geometrisi sunulmuştur. Bu geometride kurşun bir zırh içine yerleştirilmiş dedektör, metalik cam numunesi ve bir kolimatör içine yerleştirilmiş nokta radyoaktif kaynak bulunmaktadır. Dedektör numune arası 3cm ve numune kaynak arası 14 cm ayarlanmıştır. Kaynaktan çıkan foton şuasının paralel olması için kaynak ve ışın yolu boyunca kolimatör kullanılmıştır. Ayrıca dıştaki kurşun kolimatörün iç kısmı vakumda tutulmuştur. "F4" çetelesi dedektör alanı içindeki ortalama foton miktarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu simülasyon kodunda da diğerlerinde olduğu gibi tek enerjili 10.000.000 gama ışınları numune üzerine gönderilmiştir ve sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.5'da MCNP6 ile gama zırhlama çalışmalarının gerçekleştirildiği "input" dosyasının bir örneği sunulmuştur.



Şekil 4.4. MCNP6 uygulamalarının gerçekleştirildiği simülasyon geometrisi

```

Soğurulma Katsayısı Metalik Cam
c x: sample thickness in cm }
c I: intensity w/sample;    }=> mu/rho = (-1/(x*rho))*ln(I/I_0)
c I_0: intensity w/o sample }    in cm2/g
c ... cell cards section ...
1 0 -1 2 -3 imp:p=1 $ source
C 10 0 -10 11 -12 imp:p=1 $ no sample, for I_0
10 1 -6.800 -10 11 -12 imp:p=1 $ sample, for I
20 0 -20 21 -22 imp:p=1 $ detector
98 0 -99 #1 #10 #20 imp:p=1 $ inner void
99 0 99 imp:p=0 $ outer void

c ... surface cards section ...
c -* source
1 cy 0.5
2 py -50.5
3 py -49.5
c -* sample, 1 mfp thick
10 cy 0.5
11 py -0.00662
12 py 0.00662
c -* detector
20 cy 0.5
21 py 49.5
22 py 50.5
c -* void
99 so 100.0

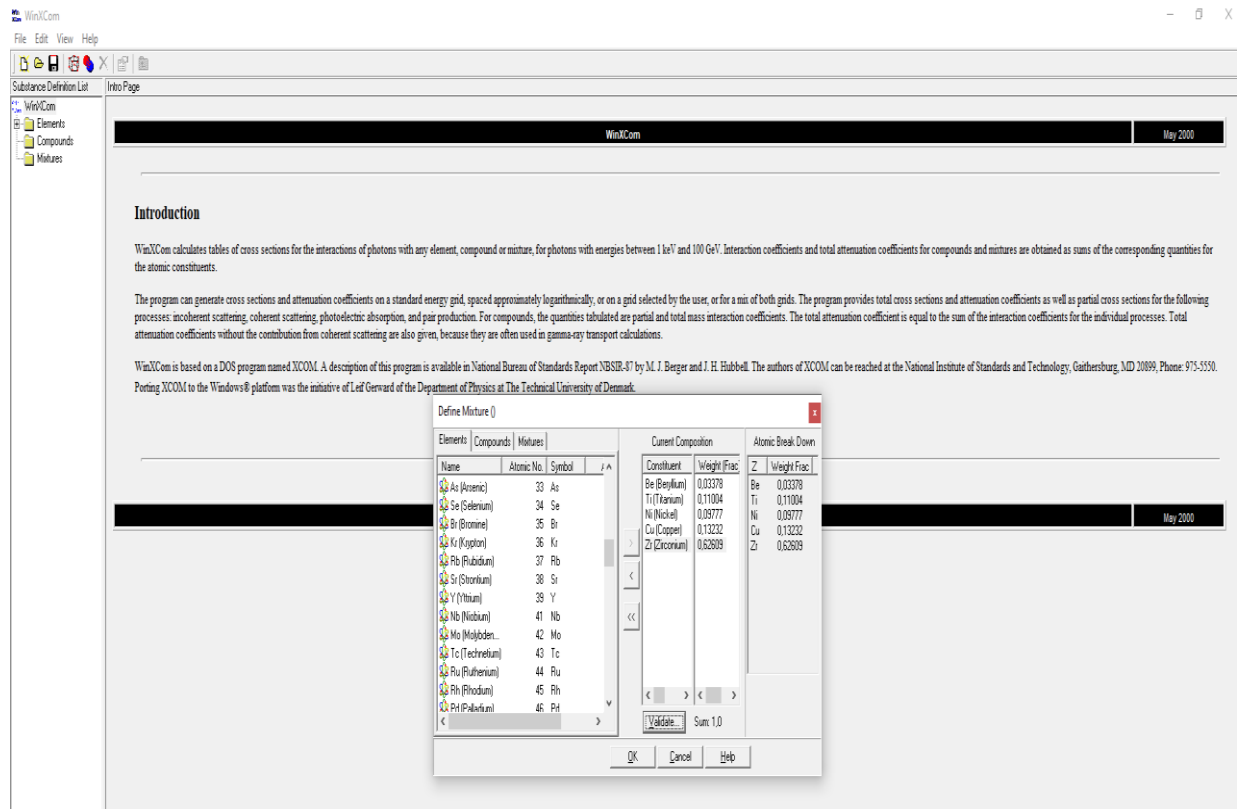
c ... data cards section ...
c -* problem definition card
mode p $ photon problem
c -* source definition card
sdef par 2 $ source particles to be generated: 2 (photon)
C cel 1 $ source particles to start in this cell
pos 0.0 -50.0 0.0 $ reference point for position distribution
erg 1 $ starting energy of source particles
vec 0.0 1.0 0.0 $ reference vector for directional distribution
nrm 1.0 $ cosine of the angle with normal vector
dir 1.0 $ directional distribution of source particles

```

Şekil 4.5. MCNP6 ile gama zırlama çalışmalarının gerçekleştirildiği “input” dosyası için bir örnek

4.4. WinXCOM Uygulama Süreci

XCOM herhangi bir karışım, bileşik veya element için toplam azaltma katsayılarını 1 keV ile 100 GeV enerji aralığında sağlayarak gama ışını zırlama parametrelerini tartışmak için kullanılan bir web veri tabanıdır. Bu tabanın Windows versiyonu yapılarak daha pratik kullanımı sağlanmıştır. Bu bağlamda “WinXCOM”, “Windows tabanlı XCOM” anlamına gelir ve XCOM tesir kesitleri veritabanını kullanır. Başka bir deyişle, bu arayüz gama ışını etkileşimleriyle ilgili karmaşık teorik hesaplamaları basitleştirir ve radyasyon fiziği ve radyolojik bilimler alanında değerli bir kaynaktır. İlgili azaltma katsayılarını elde etmek için kullanıcının gama ışınlarının enerjisini ve malzemeninelementselle içeriğini ara yüze tanımlaması gerekir. Bu tezde, metalik camların kimyasal içerikleri ve çalışılan enerjiler ara yüze tanımlanmıştır ve kütle azaltma katsayıları belirlenmiştir. Belirlenen bu kütle azaltma katsayıları kullanılarak da diğer gama ışını zırlama parametreleri teorik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6’de WinXCOM ara yüzüne ait bir görsel sunulmuştur.



Şekil 4.6. WinXCOM ara yüzüne ait bir görsel

4.5. İyonlaştırıcı Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Hesaplanma Süreci

Zirkonyum tabanlı metalik camlardan Vitroley-1 ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$), Vitroley-105 ($Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$) ve Vitroley-106a ($Zr_{57}Nb_5Al_{10}Cu_{15,4}Ni_{12,6}$) ve titanyum tabanlı metalik camlardan $Ti_{32,8}Zr_{30,2}Ni_{5,3}Cu_9Be_{22,7}$, $Ti_{55}Zr_{10}Cu_9Ni_8Be_{18}$ ve $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$ numunelerinin gama ve/veya nötron radyasyonlarını zırhlama karakteristikleri WinXCOM, FLUKA, GEANT4 ve MCNP6 yöntemleri kullanılarak irdelenmiştir. Yukarıda belirtilen metalik camların element içerikleri % atomik birimde sunulmuştur. Tablo 4.1’de ise % ağırlık cinsinden verilmiştir. Gama radyasyonu zırhlama karakteristiklerini belirlemek için geniş foton enerji aralığında ($0,04 \leq E \leq 10$ MeV) on dokuz farklı enerjide kütle azaltma katsayıları, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değerleri, onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yollar, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlikleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda WinXCOM, FLUKA, GEANT4 ve MCNP6 yöntemleri ile elde edilen kütle azaltma katsayıları kullanılarak diğer parametreler türetilmiştir. Belirtilen yöntemler ile kütle azaltma katsayılarını belirlemek için Tablo 4.1’de verilen yüzde ağırlıklı kimyasal bileşenler kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Radyasyon zırhlama karakteristikleri incelenecek metalik camların kodları, kimyasal içerikleri ve yoğunlukları

Numune Kodu	Kimyasal içerikler (% ağırlık)							ρ (g/cm ³)
	Be	Al	Ti	Ni	Cu	Zr	Nb	
Zr-1	3,378	-	11,004	9,777	13,232	62,609	-	6,000
Zr-2	-	3,700	3,282	11,750	15,597	65,671	-	6,570
Zr-3	-	3,526	-	9,664	12,788	67,951	6,071	6,800
Ti-1	3,780	-	29,007	5,747	10,566	50,899	-	5,541
Ti-2	3,416	-	55,441	9,888	12,044	19,211	-	5,030
Ti-3	3,392	-	36,030	3,313	14,349	42,916	-	5,400

Nötron zırhlama karakteristiklerini incelemek için ise teorik olarak etkin uzaklaştırma tesir kesitleri, ortalama serbest yol ve toplam makroskopik tesir kesitleri hesaplanmıştır. Ortalama serbest yol ve toplam makroskopik tesir kesitleri GEANT4 simülasyon kodu ile elde edilmiştir. 2 ila 20mm numune kalınlıklarında 4,5 MeV nötron enerjisinde metalik camlardan geçen nötron sayıları ve 0,1 ila 10 MeV nötron enerjileri aralığında 1 cm metalik cam kalınlığında da numuneden geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımıyla elde edilmiştir.

Kütle azaltma katsayıları temelinde Beer-Lambert Kanunu bulunan ve teorik olarak karışım kuralı ile belirlenmiştir. Karışım kuralı malzeme içinde bulunan her bir elementin ağırlıklı kesri kadar katkı sağladığı ve bu şekilde toplam kütle azaltma katsayısının bulunabildiği bir yaklaşımdır ve bu kural aşağıdaki eşitte belirtilmiştir (Akman vd., 2015).

$$\mu/\rho = \sum W_i(\mu/\rho)_i \quad (4.1)$$

Burada, $(\mu/\rho)_i$ metalik cam içindeki i. elementin kütle azaltma katsayısını ve W_i aynı elementin ağırlıklı kesrini ifade eder ve aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilir (Akman vd., 2015).

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum n_j A_j} \quad (4.2)$$

Denklemden n_i ve A_i sırasıyla ilgili elemente ait atom sayısı ve atom ağırlığıdır. Herhangi bir malzeme içindeki elementlerin toplam ağırlıklı kesri 1'dir, yani $\sum W_i = 1$ 'dir.

Başlangıç parametresi olarak belirlenen kütle azaltma katsayısı yardımıyla zırhlama parametrelerinden lineer azaltma katsayısı, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik değerleri türetilebilir. Aşağıda matematiksel ifadesi verilen lineer azaltma katsayısı malzemenin kütle azaltma katsayısı ile yoğunluğunun çarpımından hesaplanabilir.

$$\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \quad (4.3)$$

Lineer azaltma katsayısı ve aşağıda ifade edilen yarı ve onda-bir kalınlık değerleri ve ortalama serbest yol parametreleri malzemenin yoğunluğu ile ilişkili parametreler oldukları için malzemenin kullanılabilirliği açısından önemli parametrelerdir. Başlangıç radyasyon şiddeti miktarının %50'sini geçiren numune kalınlığı yarı kalınlık değeri olarak bilinirken, %90 ve %63,2'sini zırhlayan numune kalınlıkları ise sırasıyla onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol olarak tanımlanır. İlgili malzeme kalınlıkları lineer azaltma katsayısı ile ilişkilidir ve aşağıdaki denklemler yardımıyla elde edilebilirler (Abdallavd., 2022).

$$YKD = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (4.4)$$

$$OKD = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2,303}{\mu} \quad (4.5)$$

$$OSY = \frac{1}{\mu} \quad (4.6)$$

Moleküler tesir kesiti malzemenin kütle azaltma katsayısı ile ilişkili bir parametredir ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir (Akman vd., 2015).

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{N} (\mu/\rho)_{malz} \sum_i (n_i A_i) \quad (4.7)$$

Denklemden, N Avogadro sayısını, n_i ve A_i ise malzeme içindeki i. elementin sayısını ve atom ağırlığını belirtir. Moleküler tesir kesiti ile atomik tesir kesiti arasında aşağıda sunulan ilişki vardır (Akman vd., 2015).

$$\sigma_{t,a} = \sigma_{t,m} / \sum_i n_i \quad (4.8)$$

Elektronik tesir kesiti ise malzeme içindeki her bir elementten gelen kütle azaltma katsayısı, atom numarası, elemental bolluk ve atomik ağırlıktan gelen katkı ile hesaplanır (Akman vd., 2015).

$$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu/\rho)_i \quad (4.9)$$

Etkin atom numarası ile atomik ve elektronik tesir kesitleri arasında aşağıda sunulan denklemdeki gibi bir ilişki vardır. Bu parametrenin hesaplanmasının temelinde kütle azaltma katsayısı olduğu için yoğunluktan bağımsız ve enerji ile değişen bir parametredir (Akman vd., 2015).

$$Z_{etk} = \sigma_{t,a} / \sigma_{t,e} \quad (4.10)$$

Etkin elektron yoğunluğu ise etkin atom numarası ile ilişkili bir parametredir. Birim kütle başına düşen elektron sayısını belirtilen bu parametre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Erkoyuncu vd., 2023).

$$N_{etk} = \frac{Z_{etk}}{A_{top}} (N n_{top}) \quad (4.11)$$

Denklemdaki n_{top} ve A_{top} sırasıyla materyal içindeki elementlerin toplam sayısını ve atomik ağırlığını belirtir. Etkin elektron yoğunluğu ile etkin iletkenlik arasında doğrusal bir ilişki vardır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Akman vd., 2019).

$$\sigma_{etk} = \frac{N_{etk} e^2 \tau}{m} \quad (4.12)$$

Eşitlikteki e elektronun yükünü, τ elektronun rahatla süresini, m elektronun kütlesini ve N_{etk} metre küp biriminde etkin elektron yoğunluğunu belirtir.

Malzemenin nötron parçacıklarını zırlama karakteristiklerini gözlemlemek için hesaplanabilecek parametrelerden biri hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitidir ve teorik olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Kaçal vd., 2019).

$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i \quad (4.13)$$

Denklemden, ρ_i malzeme içindeki i . elementin kısmi yoğunluğunu belirtirken $(\Sigma_R/\rho)_i$ aynı elementin kütle uzaklaştırma tesir kesitini belirtir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Zr tabanlı üç metalik cam ile Ti tabanlı üç metalik camların gama ve nötron radyasyonu zırlama parametreleri GEANT4, FLUKA, MCNP6 simülasyon kodu ve/veya WinXCOM bilgisayar programı aracılığı ile hesaplanmıştır. Metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığındaki 19 farklı enerji değerinde kütle azalma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma katsayısı(μ), yarı kalınlık değerleri (YKD), onda bir kalınlık değerleri (OKD), ortalama serbest yol (OSY), etkin atom numarası (Z_{etk}), etkin elektron yoğunluğu (N_{etk}) ve etkin iletkenliği (σ_{etk}) parametreleri incelenmiştir.

Ayrıca nötron radyasyonu zırlama parametrelerinden hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti, ortalama serbest yol ve toplam makroskobik tesir kesiti hesaplanmıştır. Ortalama serbest yol ve toplam makroskobik tesir kesiti GEANT4 simülasyon kodu ile hesaplanmıştır. 0,2 ile 2 cm değişen kalınlıkta 4,5 MeV enerjiye sahip nötronlarda ve 1 cm numune kalınlığından geçen 0,1 -10 MeV enerjiye sahip olan nötronların nötron zırlama kapasiteleri GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımı ile belirlenmiştir.

5.1. Kütle Azaltma Katsayısına Ait Araştırma Bulguları

Kütle azaltma katsayısı iyonlaştırıcı gama ve X- ışınlarına maruz kalındığı zaman maruz kalınan radyasyon miktarının belirlenmesinde ve zırlama parametrelerinin hesaplanmasında çok etkili bir göstergedir. Kütle azaltma katsayısı, gelen fotonun birim alandaki kütle ile etkileşme ihtimaliyeti ile ilgili bir parametredir ve cm^2/g birimine sahiptir. Bu parametre maddenin yoğunluğundan bağımsızdır. Yani maddenin fiziksel özelliklerinden bağımsızdır. Bu özellikte bu parametreyi daha kullanışlı hale getirmektedir. Birden fazla elemente sahip bir malzeme söz konusu olduğunda ise kütle azaltma katsayısı her bir elementin kütle azaltma katsayılarının ağırlık kesrine göre toplamıdır.

Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide kütle azaltma katsayıları GEANT4, FLUKA, MCNP6 simülasyon kodları ve WinXCOM programı ile belirlenmiştir. Bu parametre belirlenirken denklem (4.1) dikkate alınmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen kütle

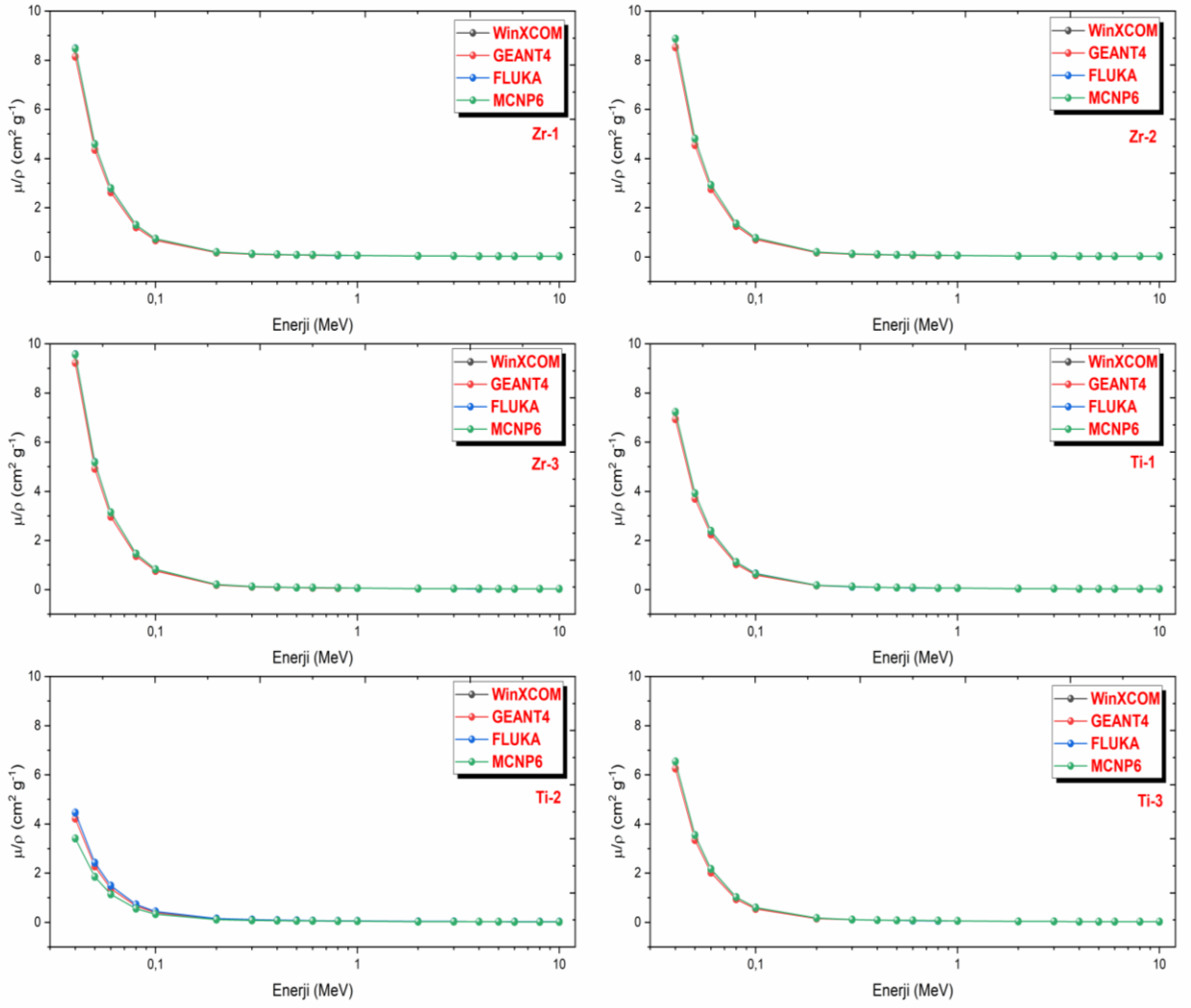
azaltma katsayısı sonuçları Tablo 5.1 listelenirken, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.1. Metalik camlara ait kütle azaltma katsayısı (cm²/g) sonuçları

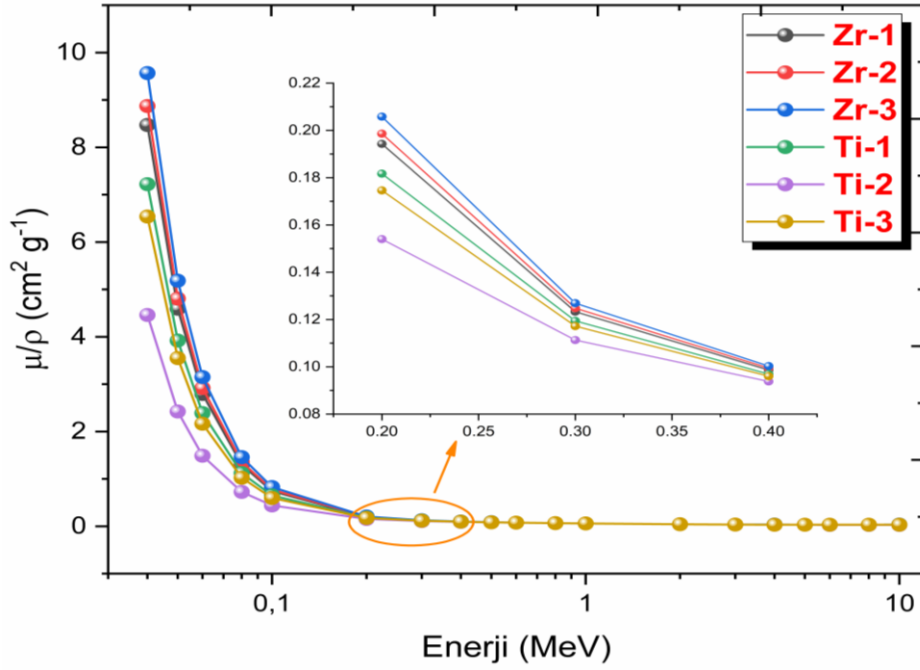
Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	8,4718	8,1478	8,4780	8,4756	8,8706	8,5254	8,8740	8,8721
0,05	4,5919	4,3522	4,5940	4,5938	4,8061	4,5495	4,8090	4,8088
0,06	2,7917	2,6259	2,7880	2,7944	2,9198	2,7571	2,9240	2,9228
0,08	1,2993	1,2047	1,3002	1,2995	1,3559	1,2588	1,3559	1,3562
0,1	0,7431	0,6807	0,7427	0,7426	0,7731	0,7074	0,7730	0,7725
0,2	0,1943	0,1770	0,1944	0,1946	0,1986	0,1807	0,1987	0,1986
0,3	0,1233	0,1154	0,1235	0,1236	0,1248	0,1170	0,1247	0,1249
0,4	0,0986	0,0943	0,0987	0,0990	0,0994	0,0950	0,0995	0,0998
0,5	0,0856	0,0835	0,0857	0,0859	0,0862	0,0838	0,0862	0,0865
0,6	0,0771	0,0756	0,0772	0,0775	0,0775	0,0759	0,0775	0,0777
0,8	0,0660	0,0655	0,0660	0,0661	0,0662	0,0657	0,0662	0,0666
1	0,0586	0,0586	0,0586	0,0588	0,0588	0,0587	0,0588	0,0589
2	0,0417	0,0417	0,0417	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419	0,0421
3	0,0362	0,0361	0,0362	0,0362	0,0364	0,0364	0,0364	0,0365
4	0,0338	0,0336	0,0338	0,0339	0,0341	0,0339	0,0341	0,0341
5	0,0327	0,0326	0,0327	0,0327	0,0331	0,0330	0,0331	0,0330
6	0,0322	0,0321	0,0323	0,0321	0,0327	0,0326	0,0327	0,0325
8	0,0324	0,0321	0,0324	0,0315	0,0329	0,0327	0,0329	0,0320
10	0,0330	0,0328	0,0330	0,0309	0,0337	0,0335	0,0337	0,0315

Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	9,5669	9,2255	9,5780	9,5685	7,2222	6,9308	7,2332	7,2273
0,05	5,1848	4,9145	5,1940	5,1874	3,9186	3,7008	3,9210	3,9213
0,06	3,1480	2,9651	3,1520	3,1504	2,3884	2,2473	2,3883	2,3908
0,08	1,4572	1,3636	1,4583	1,4580	1,1215	1,0355	1,1225	1,1209
0,1	0,8267	0,7570	0,8267	0,8253	0,6494	0,5941	0,6499	0,6492
0,2	0,2058	0,1866	0,2059	0,2057	0,1817	0,1659	0,1818	0,1819
0,3	0,1269	0,1189	0,1271	0,1270	0,1194	0,1124	0,1190	0,1198
0,4	0,1003	0,0957	0,1000	0,1006	0,0969	0,0934	0,0969	0,0973
0,5	0,0865	0,0840	0,0865	0,0867	0,0848	0,0828	0,0848	0,0852
0,6	0,0777	0,0759	0,0777	0,0778	0,0766	0,0754	0,0766	0,0770
0,8	0,0662	0,0656	0,0662	0,0666	0,0658	0,0654	0,0658	0,0660
1	0,0587	0,0585	0,0587	0,0589	0,0586	0,0584	0,0586	0,0587
2	0,0419	0,0418	0,0419	0,0420	0,0417	0,0416	0,0417	0,0418
3	0,0365	0,0364	0,0365	0,0365	0,0359	0,0358	0,0359	0,0360
4	0,0342	0,0342	0,0342	0,0343	0,0333	0,0331	0,0336	0,0334
5	0,0333	0,0332	0,0333	0,0333	0,0320	0,0319	0,0312	0,0320
6	0,0330	0,0330	0,0330	0,0328	0,0314	0,0312	0,0316	0,0313
8	0,0334	0,0331	0,0334	0,0324	0,0313	0,0312	0,0315	0,0305
10	0,0342	0,0341	0,0342	0,0319	0,0317	0,0315	0,0320	0,0298

Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	4,4604	4,2234	4,4650	3,4180	6,5398	6,2511	6,5441	6,5449
0,05	2,4235	2,2731	2,4233	1,8575	3,5489	3,3502	3,5489	3,5520
0,06	1,4902	1,3757	1,4920	1,1412	2,1662	2,0276	2,1667	2,1690
0,08	0,7242	0,6634	0,7247	0,5543	1,0231	0,9426	1,0230	1,0218
0,1	0,4400	0,3988	0,4399	0,3366	0,5975	0,5463	0,5981	0,5973
0,2	0,1540	0,1419	0,1544	0,1183	0,1746	0,1596	0,1749	0,1750
0,3	0,1113	0,1061	0,1114	0,0856	0,1172	0,1107	0,1174	0,1175
0,4	0,0938	0,0907	0,0938	0,0722	0,0960	0,0927	0,0961	0,0965
0,5	0,0834	0,0822	0,0834	0,0642	0,0843	0,0824	0,0843	0,0848
0,6	0,0761	0,0754	0,0761	0,0585	0,0764	0,0755	0,0764	0,0767
0,8	0,0660	0,0658	0,0658	0,0507	0,0658	0,0653	0,0658	0,0661
1	0,0589	0,0589	0,0589	0,0453	0,0586	0,0585	0,0586	0,0588
2	0,0419	0,0417	0,0419	0,0323	0,0417	0,0416	0,0417	0,0418
3	0,0356	0,0354	0,0356	0,0274	0,0358	0,0356	0,0358	0,0360
4	0,0325	0,0325	0,0325	0,0250	0,0330	0,0329	0,0331	0,0332
5	0,0309	0,0309	0,0309	0,0238	0,0317	0,0316	0,0317	0,0318
6	0,0300	0,0298	0,0300	0,0230	0,0311	0,0308	0,0310	0,0310
8	0,0294	0,0292	0,0294	0,0221	0,0308	0,0307	0,0308	0,0301
10	0,0294	0,0292	0,0294	0,0214	0,0311	0,0309	0,0311	0,0294



Şekil 5.1. İncelenen metalik camların WinXCOM, GEANT4, FLUKA, MCNP6 metotları yardımı ile elde edilen kütle azaltma katsayılarının karşılaştırması



Şekil 5.2. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların kütle azaltma katsayılarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

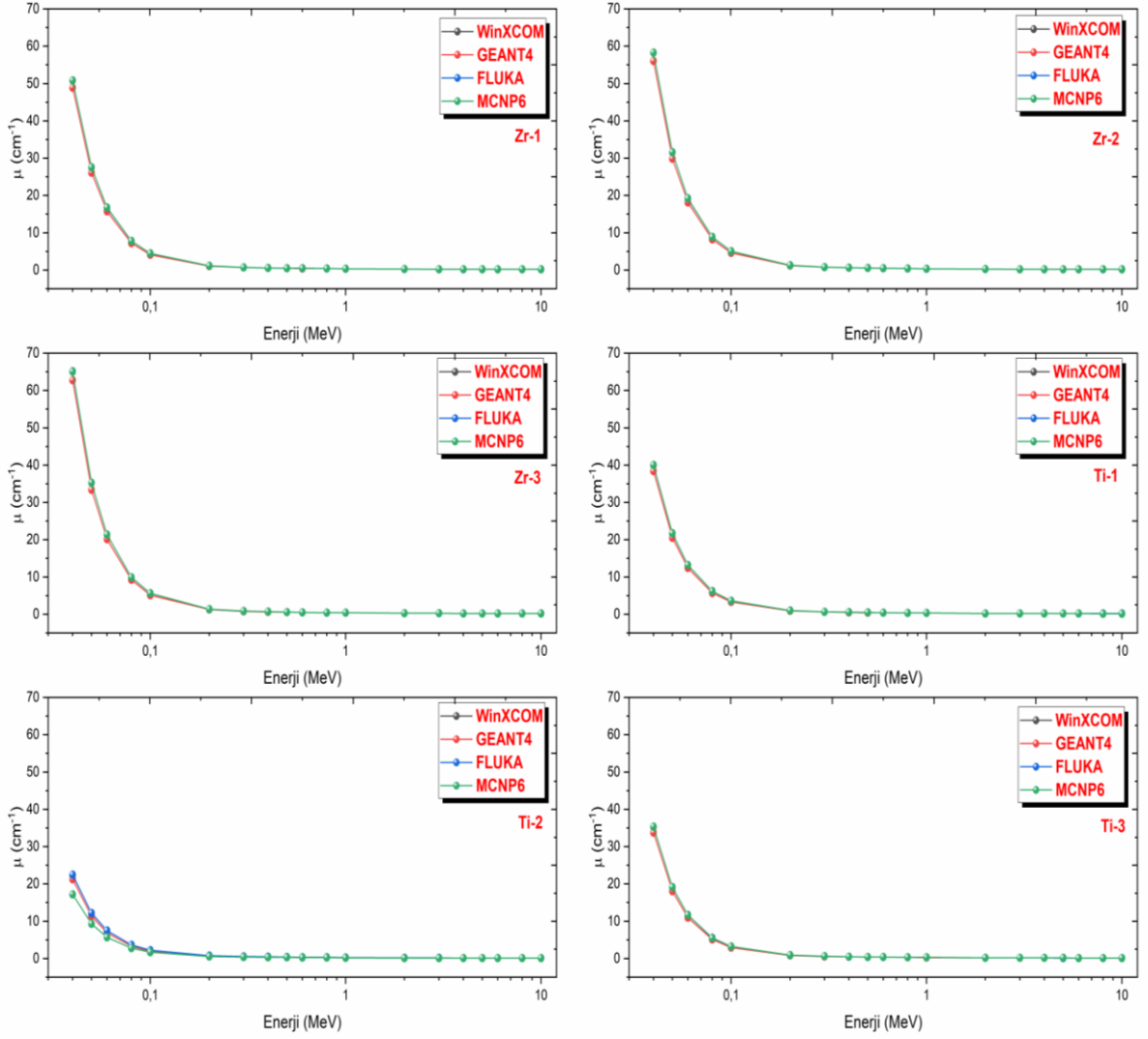
5.2. Lineer Azaltma Katsayısına Ait Araştırma Bulguları

Lineer azalma katsayısı gama ışını zırhlama parametreleri arasında önemli bir parametredir. Lineer azaltma katsayısı (μ), gelen fotonun malzemenin birim kalınlığı ile etkileşime girme olasılığı ile ilgili bir parametredir. Birimi cm^{-1} 'dir. Kütle azaltma katsayısının aksine bu parametre malzemenin yoğunluğuna bağlıdır ve bu yüzden malzemenin gama ışını zırhlama alanı kullanımında önemli bir parametredir.

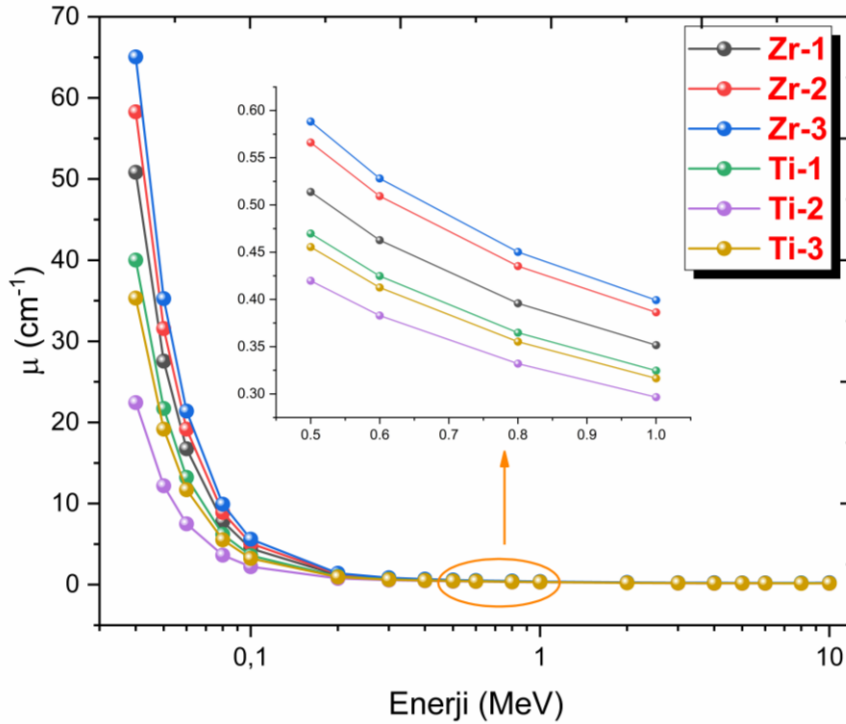
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide lineer azaltma katsayıları GEANT4, FLUKA, MCNP6simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre belirlenirken denklem (4.3) dikkate alınmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen lineer azaltma katsayısı sonuçları Tablo 5.2'de listelenirken, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.2. Metalik camlara ait lineer azaltma katsayısı (cm^{-1}) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	50,8308	48,8868	50,8680	50,8536	58,2798	56,0119	58,3022	58,2897
0,05	27,5517	26,1132	27,5640	27,5627	31,5763	29,8902	31,5951	31,5941
0,06	16,7500	15,7554	16,7280	16,7664	19,1829	18,1141	19,2107	19,2029
0,08	7,7957	7,2282	7,8010	7,7968	8,9079	8,2703	8,9081	8,9099
0,1	4,4587	4,0841	4,4564	4,4557	5,0791	4,6477	5,0785	5,0755
0,2	1,1658	1,0622	1,1664	1,1675	1,3051	1,1870	1,3055	1,3050
0,3	0,7396	0,6921	0,7410	0,7416	0,8202	0,7685	0,8193	0,8207
0,4	0,5917	0,5660	0,5922	0,5937	0,6534	0,6240	0,6537	0,6560
0,5	0,5138	0,5010	0,5140	0,5155	0,5661	0,5505	0,5663	0,5680
0,6	0,4627	0,4534	0,4632	0,4647	0,5093	0,4989	0,5094	0,5107
0,8	0,3958	0,3930	0,3959	0,3967	0,4352	0,4317	0,4349	0,4373
1	0,3516	0,3516	0,3516	0,3526	0,3863	0,3858	0,3862	0,3872
2	0,2505	0,2504	0,2503	0,2513	0,2754	0,2756	0,2753	0,2763
3	0,2170	0,2168	0,2172	0,2174	0,2392	0,2390	0,2393	0,2400
4	0,2025	0,2018	0,2027	0,2031	0,2239	0,2230	0,2240	0,2240
5	0,1961	0,1956	0,1963	0,1960	0,2173	0,2168	0,2174	0,2168
6	0,1935	0,1926	0,1937	0,1924	0,2148	0,2141	0,2150	0,2133
8	0,1942	0,1928	0,1943	0,1889	0,2163	0,2152	0,2164	0,2103
10	0,1981	0,1967	0,1980	0,1853	0,2212	0,2200	0,2213	0,2067
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	65,0549	62,7334	65,1304	65,0658	40,0182	38,4036	40,0792	40,0464
0,05	35,2564	33,4186	35,3192	35,2744	21,7129	20,5061	21,7263	21,7281
0,06	21,4067	20,1627	21,4336	21,4225	13,2341	12,4523	13,2336	13,2472
0,08	9,9092	9,2725	9,9161	9,9145	6,2140	5,7377	6,2200	6,2108
0,1	5,6212	5,1473	5,6213	5,6122	3,5984	3,2921	3,6012	3,5973
0,2	1,3993	1,2692	1,4001	1,3986	1,0066	0,9193	1,0074	1,0080
0,3	0,8631	0,8086	0,8643	0,8633	0,6614	0,6226	0,6594	0,6637
0,4	0,6818	0,6506	0,6800	0,6841	0,5371	0,5173	0,5369	0,5394
0,5	0,5883	0,5709	0,5880	0,5896	0,4697	0,4586	0,4698	0,4719
0,6	0,5280	0,5160	0,5284	0,5292	0,4247	0,4180	0,4244	0,4265
0,8	0,4502	0,4458	0,4501	0,4528	0,3647	0,3624	0,3647	0,3657
1	0,3992	0,3980	0,3994	0,4003	0,3245	0,3236	0,3247	0,3252
2	0,2846	0,2845	0,2849	0,2859	0,2310	0,2308	0,2311	0,2317
3	0,2480	0,2476	0,2481	0,2484	0,1988	0,1982	0,1989	0,1996
4	0,2328	0,2324	0,2326	0,2335	0,1843	0,1834	0,1862	0,1853
5	0,2266	0,2256	0,2264	0,2263	0,1773	0,1767	0,1731	0,1776
6	0,2246	0,2242	0,2247	0,2228	0,1741	0,1731	0,1750	0,1734
8	0,2269	0,2251	0,2271	0,2204	0,1733	0,1731	0,1745	0,1693
10	0,2327	0,2321	0,2328	0,2168	0,1758	0,1748	0,1773	0,1651
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	22,4358	21,2437	22,4590	17,1923	35,3149	33,7559	35,3381	35,3423
0,05	12,1900	11,4337	12,1892	9,3434	19,1642	18,0911	19,1641	19,1807
0,06	7,4957	6,9198	7,5048	5,7401	11,6975	10,9490	11,7002	11,7126
0,08	3,6428	3,3371	3,6452	2,7879	5,5245	5,0901	5,5243	5,5177
0,1	2,2133	2,0061	2,2125	1,6931	3,2263	2,9501	3,2300	3,2255
0,2	0,7744	0,7139	0,7766	0,5953	0,9431	0,8621	0,9445	0,9449
0,3	0,5596	0,5336	0,5603	0,4303	0,6330	0,5979	0,6340	0,6344
0,4	0,4718	0,4564	0,4719	0,3631	0,5186	0,5004	0,5189	0,5208
0,5	0,4197	0,4135	0,4196	0,3229	0,4554	0,4451	0,4554	0,4582
0,6	0,3829	0,3791	0,3830	0,2941	0,4126	0,4075	0,4126	0,4140
0,8	0,3319	0,3311	0,3309	0,2549	0,3552	0,3526	0,3553	0,3568
1	0,2965	0,2962	0,2963	0,2280	0,3164	0,3157	0,3163	0,3174
2	0,2107	0,2100	0,2107	0,1624	0,2251	0,2247	0,2249	0,2258
3	0,1790	0,1779	0,1790	0,1378	0,1931	0,1920	0,1931	0,1942
4	0,1636	0,1633	0,1635	0,1259	0,1785	0,1778	0,1788	0,1794
5	0,1555	0,1552	0,1556	0,1196	0,1712	0,1705	0,1711	0,1716
6	0,1510	0,1497	0,1511	0,1155	0,1677	0,1665	0,1675	0,1675
8	0,1477	0,1468	0,1479	0,1109	0,1663	0,1658	0,1661	0,1627
10	0,1478	0,1471	0,1479	0,1077	0,1681	0,1669	0,1679	0,1586



Şekil 5.3. İncelenen metalik camların WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımı ile elde edilen lineer azaltma katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 5.4. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların lineer azaltma katsayılarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

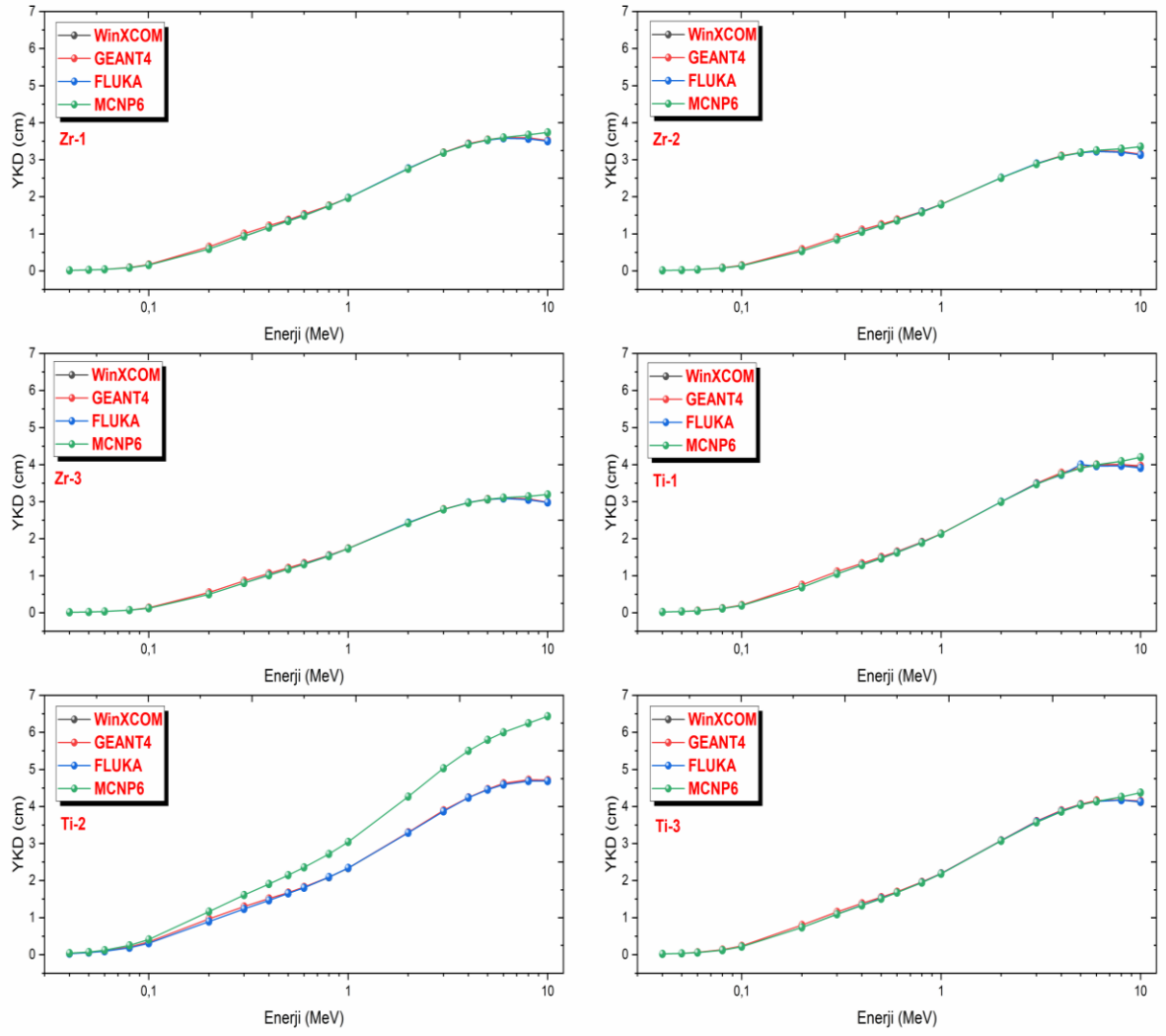
5.3. Yarı Kalınlık Değerine (YKD) Ait Araştırma Bulguları

Yarı kalınlık değeri (YKD, cm) gama ışını zırhlama olayında kullanılan başlangıç radyasyonunun yarısının azaltıldığı malzeme kalınlığını ifade etmektedir. Lineer azaltma katsayısı yardımı ile kolaylıkla belirlenmektedir ve aralarında ters orantı vardır. Bu parametrenin küçük değerleri gama ışınının daha iyi zırhlandığını gösterir.

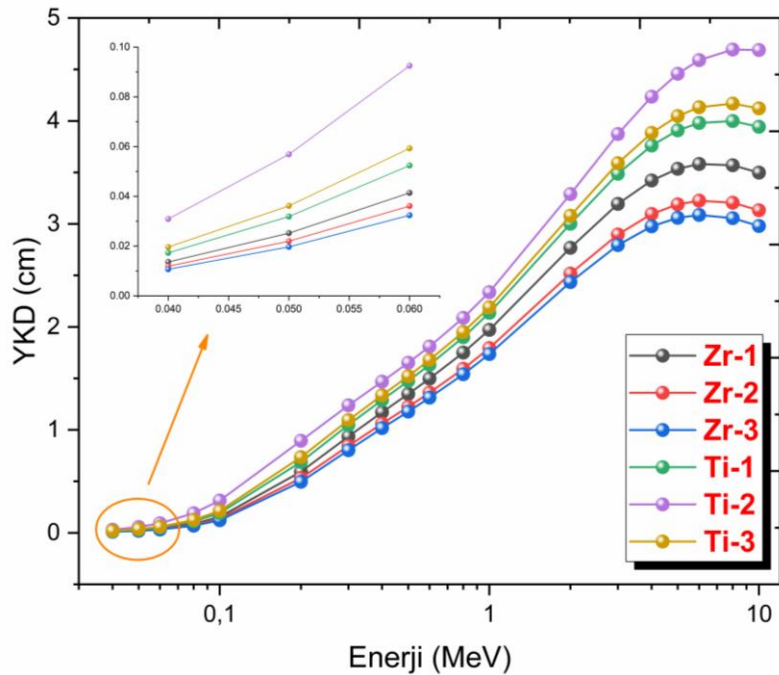
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide yarı kalınlık değeri sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre belirlenirken denklem (4.4) dikkate alınmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen yarı kalınlık değeri sonuçları Tablo 5.3'te listelenirken, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.3. Metalik camlara ait yarı kalınlık değeri (cm) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0136	0,0142	0,0136	0,0136	0,0119	0,0124	0,0119	0,0119
0,05	0,0252	0,0265	0,0251	0,0251	0,0220	0,0232	0,0219	0,0219
0,06	0,0414	0,0440	0,0414	0,0413	0,0361	0,0383	0,0361	0,0361
0,08	0,0889	0,0959	0,0889	0,0889	0,0778	0,0838	0,0778	0,0778
0,1	0,1555	0,1697	0,1555	0,1556	0,1365	0,1491	0,1365	0,1366
0,2	0,5946	0,6525	0,5943	0,5937	0,5311	0,5839	0,5310	0,5312
0,3	0,9371	1,0015	0,9354	0,9347	0,8451	0,9020	0,8460	0,8446
0,4	1,1714	1,2247	1,1705	1,1674	1,0609	1,1108	1,0603	1,0567
0,5	1,3492	1,3835	1,3486	1,3447	1,2244	1,2590	1,2239	1,2202
0,6	1,4980	1,5287	1,4964	1,4915	1,3610	1,3894	1,3606	1,3573
0,8	1,7511	1,7638	1,7509	1,7473	1,5927	1,6056	1,5939	1,5852
1	1,9715	1,9714	1,9714	1,9759	1,7942	1,7968	1,7949	1,7903
2	2,7675	2,7684	2,7697	2,7578	2,5171	2,5154	2,5179	2,5083
3	3,1944	3,1976	3,1913	3,1880	2,8978	2,9006	2,8960	2,8877
4	3,4222	3,4355	3,4189	3,4120	3,0959	3,1089	3,0948	3,0948
5	3,5353	3,5436	3,5307	3,5363	3,1905	3,1969	3,1883	3,1967
6	3,5824	3,5982	3,5788	3,6018	3,2263	3,2376	3,2234	3,2502
8	3,5701	3,5961	3,5667	3,6699	3,2049	3,2215	3,2038	3,2962
10	3,4985	3,5234	3,5007	3,7406	3,1331	3,1508	3,1315	3,3531
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0107	0,0110	0,0106	0,0107	0,0173	0,0180	0,0173	0,0173
0,05	0,0197	0,0207	0,0196	0,0197	0,0319	0,0338	0,0319	0,0319
0,06	0,0324	0,0344	0,0323	0,0324	0,0524	0,0557	0,0524	0,0523
0,08	0,0700	0,0748	0,0699	0,0699	0,1115	0,1208	0,1114	0,1116
0,1	0,1233	0,1347	0,1233	0,1235	0,1926	0,2105	0,1925	0,1927
0,2	0,4954	0,5461	0,4951	0,4956	0,6886	0,7540	0,6881	0,6876
0,3	0,8031	0,8572	0,8020	0,8029	1,0480	1,1132	1,0512	1,0443
0,4	1,0167	1,0654	1,0193	1,0132	1,2904	1,3399	1,2911	1,2851
0,5	1,1783	1,2141	1,1788	1,1757	1,4757	1,5114	1,4753	1,4689
0,6	1,3127	1,3432	1,3119	1,3098	1,6321	1,6583	1,6331	1,6251
0,8	1,5397	1,5549	1,5400	1,5309	1,9004	1,9125	1,9008	1,8954
1	1,7363	1,7416	1,7353	1,7316	2,1357	2,1418	2,1347	2,1316
2	2,4353	2,4362	2,4328	2,4247	3,0012	3,0035	2,9991	2,9915
3	2,7950	2,7997	2,7935	2,7908	3,4867	3,4965	3,4855	3,4730
4	2,9768	2,9822	2,9805	2,9687	3,7608	3,7799	3,7230	3,7406
5	3,0594	3,0730	3,0620	3,0623	3,9086	3,9237	4,0043	3,9034
6	3,0867	3,0911	3,0852	3,1114	3,9810	4,0039	3,9599	3,9971
8	3,0554	3,0799	3,0528	3,1450	3,9998	4,0035	3,9725	4,0954
10	2,9792	2,9865	2,9779	3,1967	3,9431	3,9661	3,9104	4,1986
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0309	0,0326	0,0309	0,0403	0,0196	0,0205	0,0196	0,0196
0,05	0,0569	0,0606	0,0569	0,0742	0,0362	0,0383	0,0362	0,0361
0,06	0,0925	0,1002	0,0924	0,1208	0,0593	0,0633	0,0592	0,0592
0,08	0,1903	0,2077	0,1902	0,2486	0,1255	0,1362	0,1255	0,1256
0,1	0,3132	0,3455	0,3133	0,4094	0,2148	0,2350	0,2146	0,2149
0,2	0,8950	0,9709	0,8925	1,1644	0,7350	0,8041	0,7339	0,7335
0,3	1,2386	1,2990	1,2370	1,6108	1,0950	1,1592	1,0934	1,0926
0,4	1,4691	1,5186	1,4688	1,9090	1,3365	1,3852	1,3357	1,3308
0,5	1,6517	1,6764	1,6521	2,1467	1,5222	1,5572	1,5219	1,5129
0,6	1,8102	1,8282	1,8099	2,3566	1,6798	1,7010	1,6801	1,6743
0,8	2,0886	2,0937	2,0949	2,7194	1,9516	1,9658	1,9511	1,9429
1	2,3376	2,3401	2,3392	3,0404	2,1911	2,1958	2,1916	2,1836
2	3,2900	3,3013	3,2895	4,2692	3,0799	3,0851	3,0819	3,0704
3	3,8729	3,8960	3,8719	5,0311	3,5893	3,6103	3,5905	3,5688
4	4,2359	4,2439	4,2401	5,5039	3,8839	3,8994	3,8768	3,8646
5	4,4582	4,4653	4,4539	5,7972	4,0483	4,0662	4,0518	4,0386
6	4,5901	4,6294	4,5888	6,0028	4,1334	4,1628	4,1380	4,1390
8	4,6932	4,7209	4,6872	6,2491	4,1692	4,1806	4,1730	4,2600
10	4,6887	4,7120	4,6872	6,4338	4,1223	4,1539	4,1274	4,3718



Şekil 5.5. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı yarı kalınlık değerlerinin grafiği



Şekil 5.6. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların yarı kalınlık değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

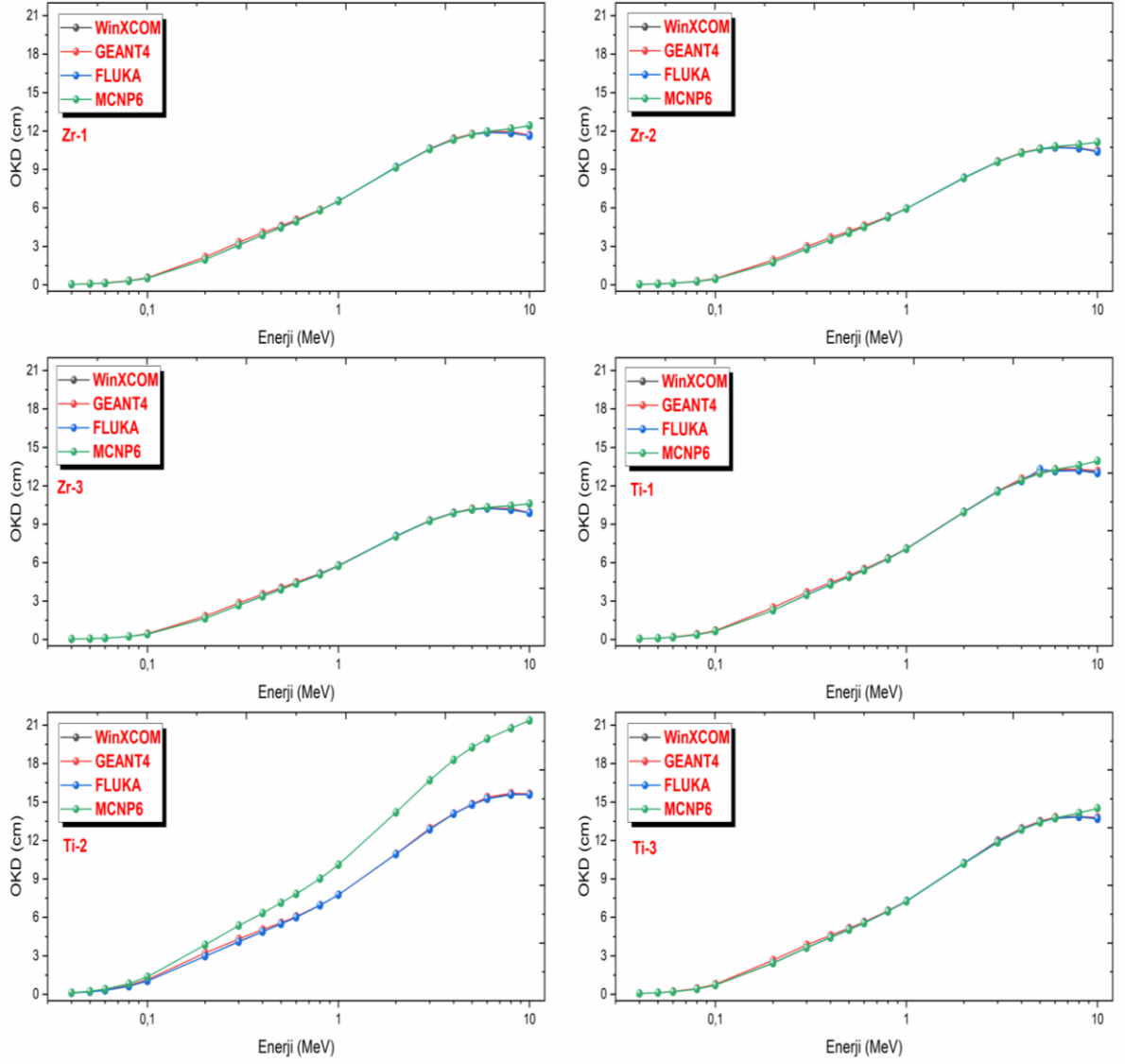
5.4. Onda-bir Kalınlık Değerine (OKD) Ait Araştırma Bulguları

Onda-bir kalınlık değeri (OKD, cm) parametresi başlangıçta uygulanan radyasyonun %10'nunun geçebileceği malzeme kalınlığı olarak tanımlanır. Onda-bir kalınlık değeri de lineer azaltma katsayısı yardımıyla belirlenen bir parametredir ve aralarında ters orantı vardır. Yarı kalınlık değerine benzer şekilde bu parametrenin de küçük değerleri malzemenin iyi bir gama ışını zırhlama malzemesi olduğunun göstergesidir.

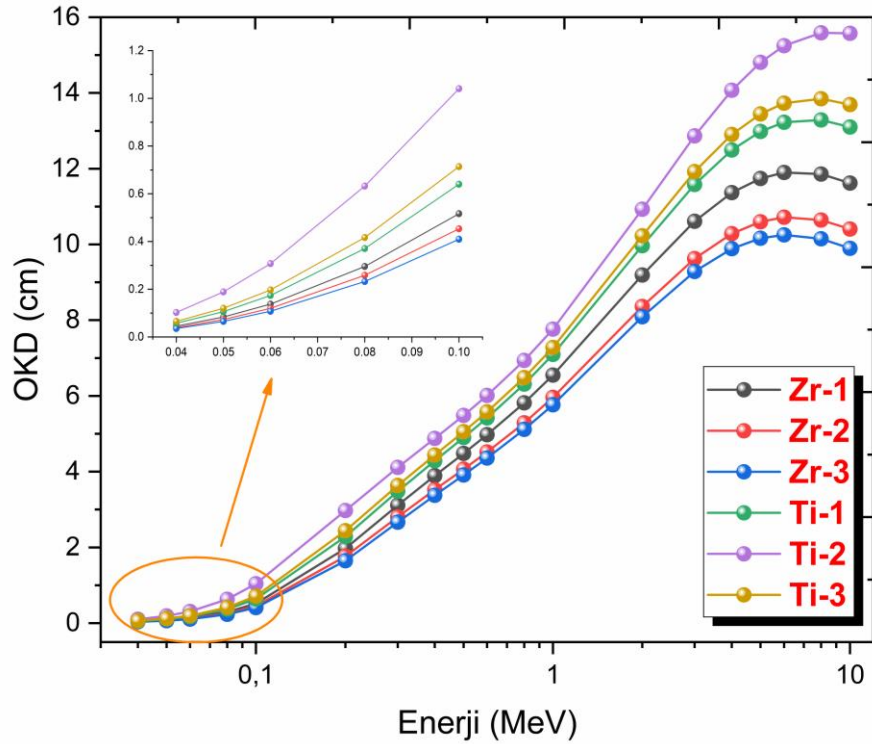
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide onda-bir kalınlık değeri sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6 simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre belirlenirken denklem (4.5) dikkate alınmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen onda-bir kalınlık değeri sonuçları Tablo 5.4'te listelenirken, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.4. İncelenen metalik camlara ait onda-bir kalınlık değeri (cm) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0453	0,0471	0,0453	0,0453	0,0395	0,0411	0,0395	0,0395
0,05	0,0836	0,0882	0,0835	0,0835	0,0729	0,0770	0,0729	0,0729
0,06	0,1375	0,1461	0,1376	0,1373	0,1200	0,1271	0,1199	0,1199
0,08	0,2954	0,3186	0,2952	0,2953	0,2585	0,2784	0,2585	0,2584
0,1	0,5164	0,5638	0,5167	0,5168	0,4533	0,4954	0,4534	0,4537
0,2	1,9752	2,1677	1,9741	1,9722	1,7643	1,9398	1,7638	1,7645
0,3	3,1131	3,3270	3,1074	3,1050	2,8074	2,9962	2,8105	2,8057
0,4	3,8914	4,0684	3,8882	3,8780	3,5242	3,6899	3,5223	3,5103
0,5	4,4819	4,5958	4,4801	4,4670	4,0674	4,1825	4,0658	4,0535
0,6	4,9764	5,0781	4,9710	4,9548	4,5212	4,6154	4,5199	4,5088
0,8	5,8169	5,8591	5,8164	5,8043	5,2909	5,3337	5,2949	5,2659
1	6,5492	6,5490	6,5489	6,5305	5,9601	5,9689	5,9624	5,9473
2	9,1936	9,1964	9,2008	9,1612	8,3616	8,3561	8,3644	8,3323
3	10,6117	10,6223	10,6012	10,5903	9,6261	9,6357	9,6204	9,5927
4	11,3683	11,4124	11,3573	11,3345	10,2845	10,3277	10,2807	10,2808
5	11,7441	11,7715	11,7287	11,7473	10,5987	10,6200	10,5914	10,6193
6	11,9004	11,9530	11,8886	11,9651	10,7175	10,7552	10,7079	10,7971
8	11,8598	11,9460	11,8482	12,1911	10,6463	10,7017	10,6429	10,9498
10	11,6217	11,7044	11,6292	12,4259	10,4079	10,4668	10,4028	11,1389
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0354	0,0367	0,0354	0,0354	0,0575	0,0600	0,0575	0,0575
0,05	0,0653	0,0689	0,0652	0,0653	0,1060	0,1123	0,1060	0,1060
0,06	0,1076	0,1142	0,1074	0,1075	0,1740	0,1849	0,1740	0,1738
0,08	0,2324	0,2483	0,2322	0,2322	0,3705	0,4013	0,3702	0,3707
0,1	0,4096	0,4473	0,4096	0,4103	0,6399	0,6994	0,6394	0,6401
0,2	1,6456	1,8143	1,6446	1,6464	2,2876	2,5047	2,2858	2,2843
0,3	2,6678	2,8477	2,6642	2,6673	3,4815	3,6981	3,4921	3,4691
0,4	3,3774	3,5393	3,3862	3,3659	4,2867	4,4510	4,2889	4,2691
0,5	3,9141	4,0331	3,9160	3,9056	4,9022	5,0208	4,9010	4,8796
0,6	4,3608	4,4620	4,3580	4,3510	5,4218	5,5088	5,4250	5,3985
0,8	5,1148	5,1651	5,1158	5,0854	6,3129	6,3531	6,3145	6,2963
1	5,7680	5,7856	5,7646	5,7524	7,0948	7,1148	7,0914	7,0810
2	8,0898	8,0927	8,0815	8,0547	9,9697	9,9775	9,9629	9,9376
3	9,2847	9,3003	9,2797	9,2709	11,5827	11,6151	11,5785	11,5372
4	9,8888	9,9065	9,9010	9,8617	12,4931	12,5564	12,3677	12,4259
5	10,1630	10,2082	10,1717	10,1728	12,9841	13,0341	13,3020	12,9668
6	10,2538	10,2685	10,2487	10,3358	13,2247	13,3007	13,1546	13,2780
8	10,1497	10,2313	10,1412	10,4474	13,2872	13,2994	13,1964	13,6045
10	9,8967	9,9211	9,8924	10,6193	13,0988	13,1750	12,9901	13,9474
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,1026	0,1084	0,1025	0,1339	0,0652	0,0682	0,0652	0,0652
0,05	0,1889	0,2014	0,1889	0,2464	0,1202	0,1273	0,1202	0,1200
0,06	0,3072	0,3328	0,3068	0,4011	0,1968	0,2103	0,1968	0,1966
0,08	0,6321	0,6900	0,6317	0,8259	0,4168	0,4524	0,4168	0,4173
0,1	1,0404	1,1478	1,0407	1,3600	0,7137	0,7805	0,7129	0,7139
0,2	2,9733	3,2253	2,9648	3,8681	2,4415	2,6710	2,4380	2,4368
0,3	4,1145	4,3153	4,1092	5,3509	3,6375	3,8509	3,6321	3,6295
0,4	4,8803	5,0447	4,8792	6,3415	4,4397	4,6015	4,4371	4,4209
0,5	5,4869	5,5689	5,4882	7,1310	5,0566	5,1730	5,0558	5,0258
0,6	6,0132	6,0732	6,0122	7,8284	5,5802	5,6507	5,5812	5,5618
0,8	6,9383	6,9552	6,9591	9,0337	6,4830	6,5301	6,4813	6,4541
1	7,7654	7,7736	7,7707	10,0999	7,2785	7,2943	7,2803	7,2537
2	10,9292	10,9667	10,9274	14,1819	10,2313	10,2484	10,2378	10,1996
3	12,8654	12,9423	12,8623	16,7129	11,9233	11,9932	11,9274	11,8552
4	14,0714	14,0978	14,0852	18,2835	12,9022	12,9535	12,8784	12,8378
5	14,8098	14,8333	14,7954	19,2578	13,4481	13,5075	13,4597	13,4160
6	15,2478	15,3785	15,2438	19,9409	13,7308	13,8286	13,7461	13,7494
8	15,5904	15,6824	15,5704	20,7589	13,8499	13,8876	13,8623	14,1513
10	15,5756	0,1084	15,5704	21,3727	13,6940	13,7991	13,7108	14,5227



Şekil 5.7. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı onda-bir kalınlık değerlerinin grafiği



Şekil 5.8. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların onda-bir kalınlık değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

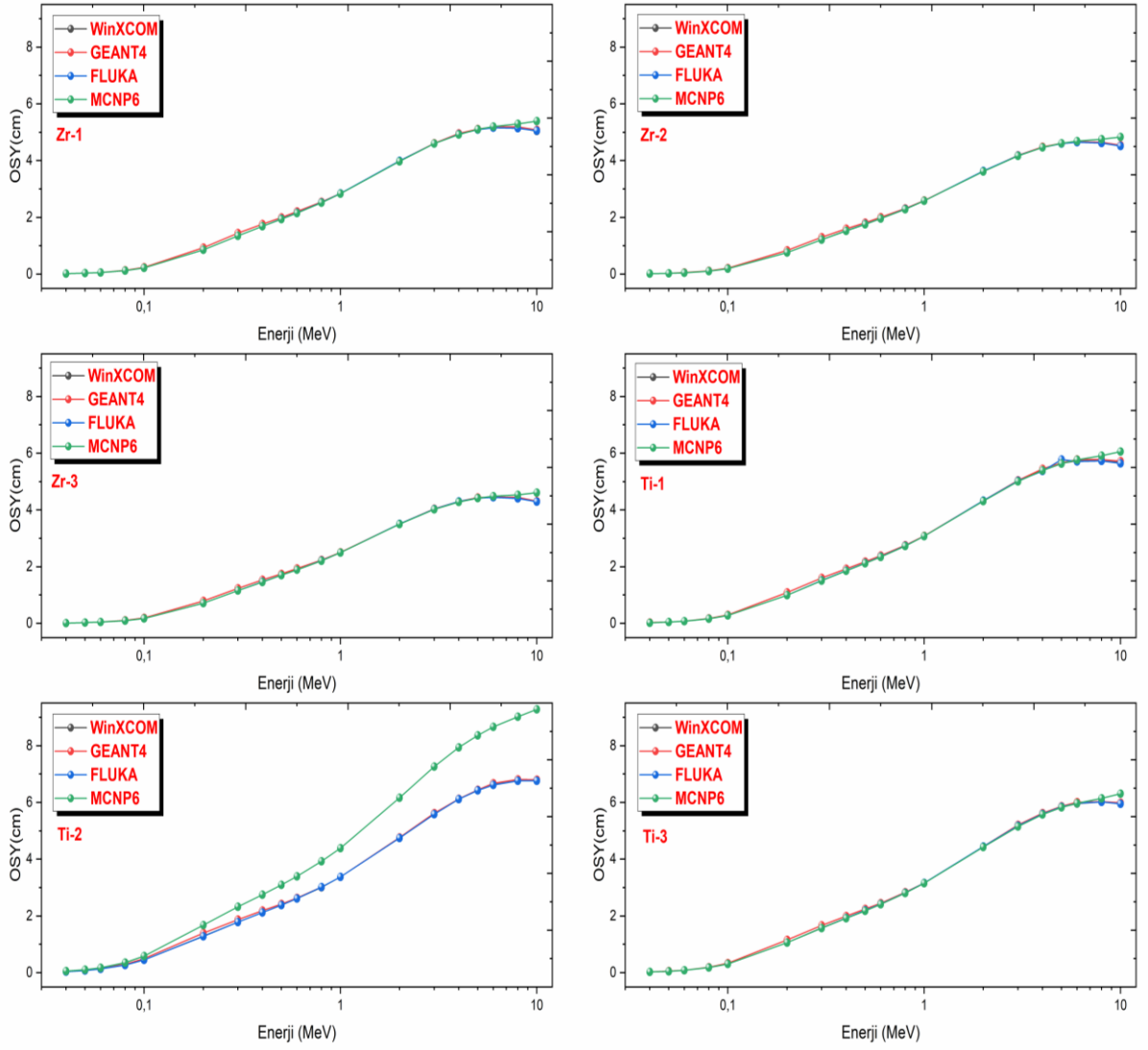
5.5. Ortalama Serbest Yol (OSY) Parametresine Ait Araştırma Bulguları

Ortalama serbest yol parametresi (OSY, cm) başlangıçta uygulanan radyasyonun %63,2'sinin azaltılacağı malzeme kalınlığı olarak tanımlanır. Bu parametre de lineer azaltma katsayısı yardımıyla belirlenen bir parametredir ve aralarında ters orantı vardır. Bu parametrenin de küçük değerleri malzemenin iyi bir gama ışını zırhlama malzemesi olduğunun göstergesidir.

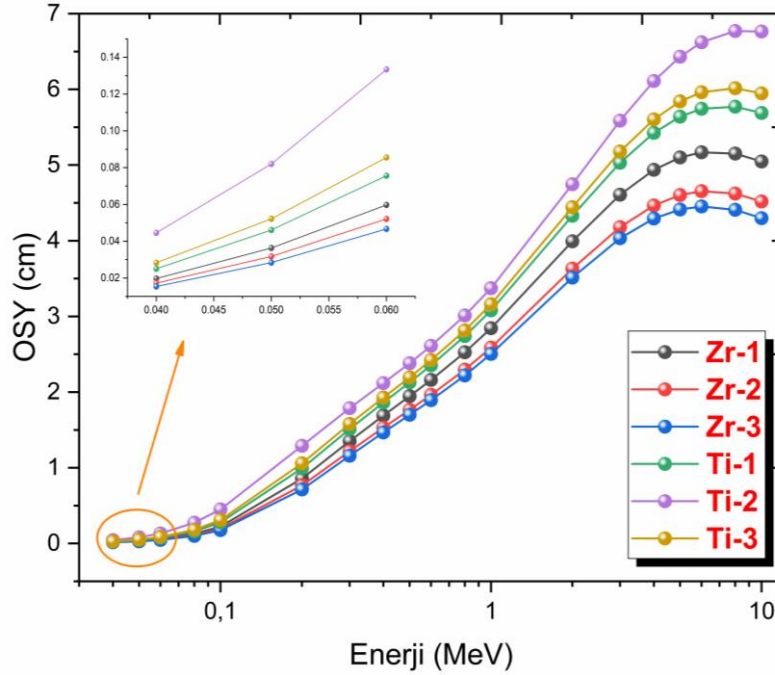
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide ortalama serbest yol değeri sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6 simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre denklem (4.6) yardımıyla hesaplanmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen ortalama serbest yol değeri sonuçları Tablo 5.5'te listelenirken, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.5. Metalik camlara ait ortalama serbest yol değeri (cm) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0197	0,0205	0,0205	0,0197	0,0172	0,0179	0,0172	0,0172
0,05	0,0363	0,0383	0,0383	0,0363	0,0317	0,0335	0,0317	0,0317
0,06	0,0597	0,0635	0,0635	0,0596	0,0521	0,0552	0,0521	0,0521
0,08	0,1283	0,1383	0,1383	0,1283	0,1123	0,1209	0,1123	0,1122
0,1	0,2243	0,2449	0,2449	0,2244	0,1969	0,2152	0,1969	0,1970
0,2	0,8578	0,9414	0,9414	0,8565	0,7662	0,8425	0,7660	0,7663
0,3	1,3520	1,4449	1,4449	1,3485	1,2192	1,3012	1,2206	1,2185
0,4	1,6900	1,7669	1,7669	1,6842	1,5305	1,6025	1,5297	1,5245
0,5	1,9465	1,9959	1,9959	1,9400	1,7664	1,8164	1,7657	1,7604
0,6	2,1612	2,2054	2,2054	2,1518	1,9635	2,0044	1,9629	1,9581
0,8	2,5262	2,5446	2,5446	2,5208	2,2978	2,3164	2,2995	2,2869
1	2,8443	2,8442	2,8442	2,8362	2,5884	2,5923	2,5894	2,5829
2	3,9927	3,9939	3,9939	3,9786	3,6314	3,6290	3,6326	3,6187
3	4,6086	4,6132	4,6132	4,5993	4,1806	4,1847	4,1781	4,1661
4	4,9372	4,9563	4,9563	4,9225	4,4665	4,4853	4,4649	4,4649
5	5,1004	5,1123	5,1123	5,1018	4,6030	4,6122	4,5998	4,6119
6	5,1683	5,1911	5,1911	5,1964	4,6545	4,6709	4,6504	4,6891
8	5,1506	5,1881	5,1881	5,2945	4,6236	4,6477	4,6221	4,7554
10	5,0472	5,0832	5,0832	5,3965	4,5201	4,5457	4,5179	4,8375
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0154	0,0159	0,0154	0,0154	0,0250	0,0260	0,0250	0,0250
0,05	0,0284	0,0299	0,0283	0,0283	0,0461	0,0488	0,0460	0,0460
0,06	0,0467	0,0496	0,0467	0,0467	0,0756	0,0803	0,0756	0,0755
0,08	0,1009	0,1078	0,1008	0,1009	0,1609	0,1743	0,1608	0,1610
0,1	0,1779	0,1943	0,1779	0,1782	0,2779	0,3038	0,2777	0,2780
0,2	0,7147	0,7879	0,7142	0,7150	0,9935	1,0878	0,9927	0,9920
0,3	1,1586	1,2367	1,1570	1,1584	1,5120	1,6061	1,5166	1,5066
0,4	1,4668	1,5371	1,4706	1,4618	1,8617	1,9330	1,8627	1,8540
0,5	1,6999	1,7515	1,7007	1,6962	2,1290	2,1805	2,1285	2,1192
0,6	1,8938	1,9378	1,8926	1,8896	2,3547	2,3924	2,3560	2,3445
0,8	2,2213	2,2432	2,2218	2,2086	2,7417	2,7591	2,7423	2,7345
1	2,5050	2,5127	2,5036	2,4982	3,0812	3,0899	3,0797	3,0752
2	3,5134	3,5146	3,5098	3,4981	4,3298	4,3332	4,3268	4,3159
3	4,0323	4,0391	4,0301	4,0263	5,0303	5,0444	5,0285	5,0105
4	4,2946	4,3024	4,3000	4,2829	5,4257	5,4532	5,3712	5,3965
5	4,4137	4,4334	4,4175	4,4180	5,6389	5,6606	5,7770	5,6314
6	4,4531	4,4596	4,4509	4,4888	5,7434	5,7764	5,7130	5,7666
8	4,4079	4,4434	4,4043	4,5372	5,7705	5,7759	5,7311	5,9084
10	4,2981	4,3087	4,2962	4,6119	5,6888	5,7218	5,6415	6,0573
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	0,0446	0,0471	0,0445	0,0582	0,0283	0,0296	0,0283	0,0283
0,05	0,0820	0,0875	0,0820	0,1070	0,0522	0,0553	0,0522	0,0521
0,06	0,1334	0,1445	0,1332	0,1742	0,0855	0,0913	0,0855	0,0854
0,08	0,2745	0,2997	0,2743	0,3587	0,1810	0,1965	0,1810	0,1812
0,1	0,4518	0,4985	0,4520	0,5906	0,3100	0,3390	0,3096	0,3100
0,2	1,2913	1,4007	1,2876	1,6799	1,0603	1,1600	1,0588	1,0583
0,3	1,7869	1,8741	1,7846	2,3239	1,5798	1,6724	1,5774	1,5763
0,4	2,1195	2,1909	2,1190	2,7541	1,9282	1,9984	1,9270	1,9200
0,5	2,3829	2,4185	2,3835	3,0970	2,1960	2,2466	2,1957	2,1827
0,6	2,6115	2,6375	2,6111	3,3998	2,4235	2,4541	2,4239	2,4155
0,8	3,0133	3,0206	3,0223	3,9233	2,8155	2,8360	2,8148	2,8030
1	3,3725	3,3760	3,3748	4,3863	3,1610	3,1679	3,1618	3,1502
2	4,7465	4,7628	4,7457	6,1591	4,4434	4,4508	4,4462	4,4296
3	5,5874	5,6208	5,5860	7,2583	5,1782	5,2086	5,1800	5,1486
4	6,1111	6,1226	6,1171	7,9404	5,6033	5,6257	5,5930	5,5754
5	6,4318	6,4420	6,4256	8,3636	5,8404	5,8662	5,8455	5,8265
6	6,6220	6,6788	6,6203	8,6602	5,9632	6,0057	5,9699	5,9713
8	6,7708	6,8108	6,7621	9,0155	6,0149	6,0313	6,0203	6,1458
10	6,7644	6,7980	6,7621	9,2820	5,9472	5,9929	5,9545	6,3071



Şekil 5.9. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı ortalama serbest yol değerlerinin grafiği



Şekil 5.10. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların ortalama serbest yollarının WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

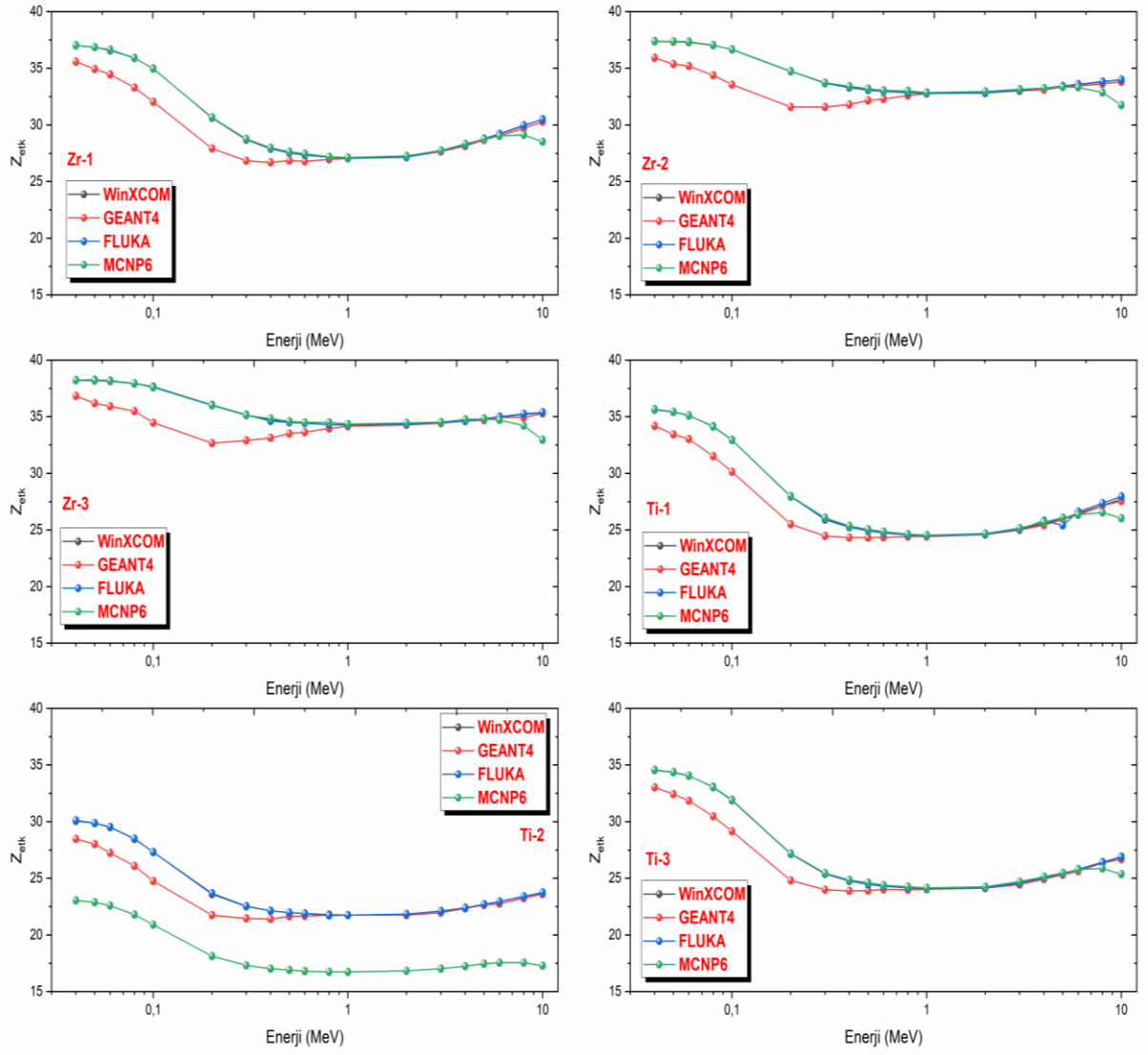
5.6. Etkin Atom Numarası Parametresine Ait Araştırma Bulguları

Yapısında birden fazla element ihtiva eden materyallerin atom numarası tek bir elementin atom numarası gibi sabit değildir ve değişen foton enerjisi ile farklı değerler almaktadır. Birden fazla element içeren malzemelerde atom numarası yerine etkin atom numarası (Z_{etk}) terimi kullanılır. Etkin atom numarası için öncelikle atomik, elektronik ve moleküler kesit kavramlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu parametreler denklem (4.7), (4.8) ve (4.9) yardımıyla hesaplanmıştır. Moleküler, atomik ve elektronik kesitleri sırasıyla gelen fotonun malzemenin molekülü, atomu ve elektronu ile etkileşme ihtimaliyetlerini gösterir ve birimleri $\text{cm}^2/\text{molekül}$, cm^2/atom ve $\text{cm}^2/\text{elektron}$ 'dur. Moleküler kesit, atomik kesit yardımıyla belirlenir. Etkin atom numarası ise atomik kesitin elektronik kesitine oranından hesaplanır ve birim olarak boyutsuzdur.

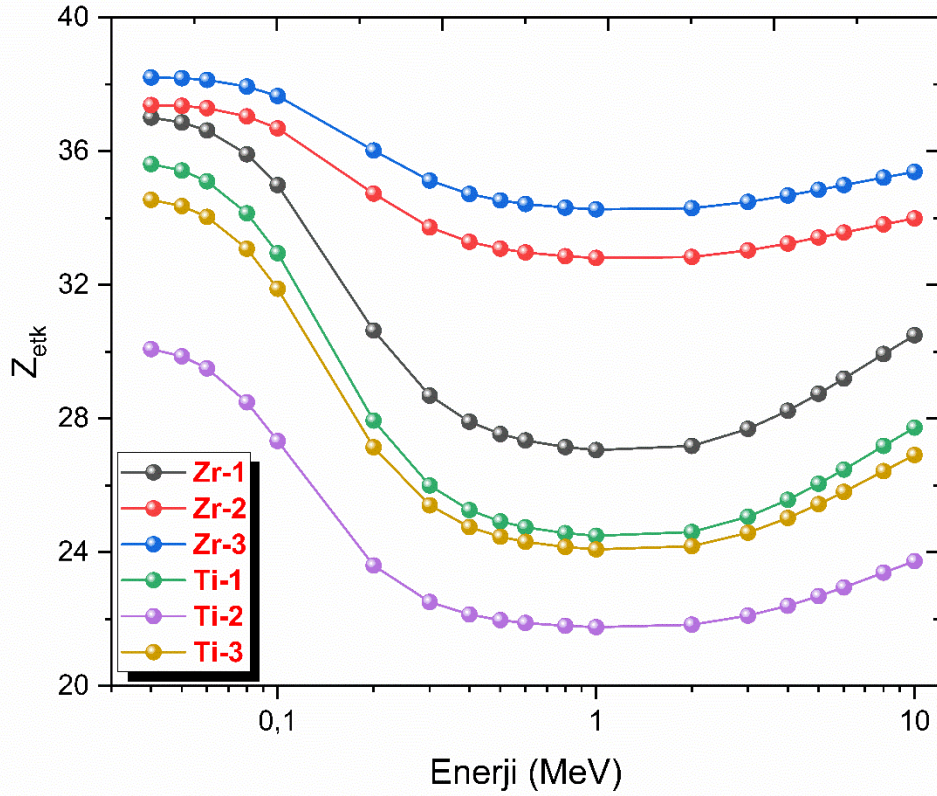
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide etkin atom numarası sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6 simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre denklem (4.10) yardımıyla hesaplanmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen etkin atom numarası değeri sonuçları Tablo 5.6'da listelenirken, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.6. Metalik camlara ait etkin atom numarası sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	37,005	35,590	37,032	36,875	37,378	35,923	37,392	37,384
0,05	36,860	34,935	36,876	36,658	37,357	35,362	37,379	37,378
0,06	36,622	34,447	36,574	35,916	37,289	35,212	37,344	37,328
0,08	35,911	33,297	35,935	34,964	37,041	34,390	37,042	37,049
0,1	34,988	32,048	34,970	30,680	36,684	33,568	36,679	36,658
0,2	30,634	27,914	30,651	28,763	34,734	31,590	34,743	34,730
0,3	28,687	26,844	28,740	28,000	33,722	31,597	33,685	33,742
0,4	27,905	26,690	27,927	27,631	33,288	31,793	33,305	33,419
0,5	27,539	26,856	27,550	27,464	33,083	32,172	33,096	33,196
0,6	27,345	26,797	27,375	27,207	32,970	32,297	32,979	33,060
0,8	27,148	26,953	27,151	27,135	32,857	32,594	32,832	33,013
1	27,058	27,058	27,059	27,279	32,805	32,756	32,792	32,875
2	27,183	27,174	27,161	27,746	32,838	32,860	32,827	32,953
3	27,690	27,662	27,718	28,321	33,033	33,000	33,053	33,148
4	28,237	28,128	28,264	28,739	33,235	33,096	33,248	33,247
5	28,746	28,680	28,784	29,038	33,416	33,349	33,439	33,351
6	29,195	29,067	29,224	29,119	33,568	33,450	33,598	33,321
8	29,933	29,717	29,962	28,521	33,811	33,636	33,822	32,874
10	30,494	30,279	30,475	36,875	33,991	33,799	34,007	31,760
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	38,204	36,840	38,248	38,210	35,616	34,179	35,670	35,641
0,05	38,186	36,195	38,254	38,205	35,421	33,453	35,443	35,446
0,06	38,132	35,916	38,180	38,160	35,097	33,024	35,096	35,132
0,08	37,936	35,498	37,962	37,956	34,142	31,525	34,175	34,124
0,1	37,651	34,477	37,652	37,591	32,946	30,141	32,971	32,935
0,2	36,022	32,672	36,044	36,004	27,942	25,520	27,965	27,983
0,3	35,119	32,901	35,167	35,126	26,000	24,477	25,921	26,092
0,4	34,719	33,131	34,629	34,837	25,263	24,330	25,250	25,367
0,5	34,527	33,509	34,511	34,603	24,926	24,338	24,933	25,042
0,6	34,421	33,639	34,443	34,498	24,750	24,359	24,736	24,857
0,8	34,314	33,980	34,308	34,513	24,572	24,417	24,566	24,637
1	34,264	34,160	34,284	34,357	24,491	24,422	24,503	24,539
2	34,296	34,284	34,332	34,446	24,604	24,585	24,621	24,684
3	34,483	34,425	34,501	34,534	25,066	24,996	25,075	25,165
4	34,675	34,613	34,632	34,770	25,571	25,442	25,830	25,709
5	34,845	34,691	34,815	34,812	26,047	25,947	25,425	26,082
6	34,988	34,937	35,005	34,710	26,472	26,321	26,613	26,366
8	35,214	34,933	35,243	34,211	27,181	27,156	27,368	26,547
10	35,380	35,293	35,395	32,972	27,731	27,570	27,963	26,044
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	30,079	28,481	30,110	23,049	34,547	33,022	34,570	34,574
0,05	29,865	28,012	29,863	22,891	34,360	32,436	34,360	34,390
0,06	29,503	27,237	29,539	22,593	34,037	31,859	34,044	34,081
0,08	28,487	26,096	28,506	21,801	33,077	30,476	33,076	33,036
0,1	27,329	24,772	27,320	20,907	31,887	29,158	31,924	31,880
0,2	23,607	21,762	23,674	18,146	27,144	24,811	27,183	27,196
0,3	22,515	21,467	22,544	17,313	25,402	23,995	25,441	25,459
0,4	22,139	21,417	22,143	17,037	24,756	23,885	24,770	24,861
0,5	21,972	21,648	21,967	16,906	24,463	23,912	24,467	24,613
0,6	21,887	21,671	21,890	16,812	24,310	24,007	24,306	24,391
0,8	21,801	21,748	21,736	16,744	24,157	23,982	24,163	24,264
1	21,762	21,739	21,747	16,732	24,086	24,034	24,081	24,169
2	21,835	21,760	21,839	16,827	24,185	24,144	24,169	24,260
3	22,104	21,972	22,109	17,015	24,585	24,442	24,577	24,727
4	22,402	22,360	22,380	17,241	25,024	24,924	25,070	25,149
5	22,688	22,652	22,710	17,448	25,438	25,326	25,416	25,499
6	22,948	22,753	22,954	17,547	25,809	25,626	25,780	25,774
8	23,388	23,251	23,418	17,565	26,428	26,356	26,404	25,865
10	23,735	23,618	23,743	17,297	26,909	26,704	26,876	25,374



Şekil 5.11. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin atom numarası değerlerinin grafiği



Şekil 5.12. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin atom numarası değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

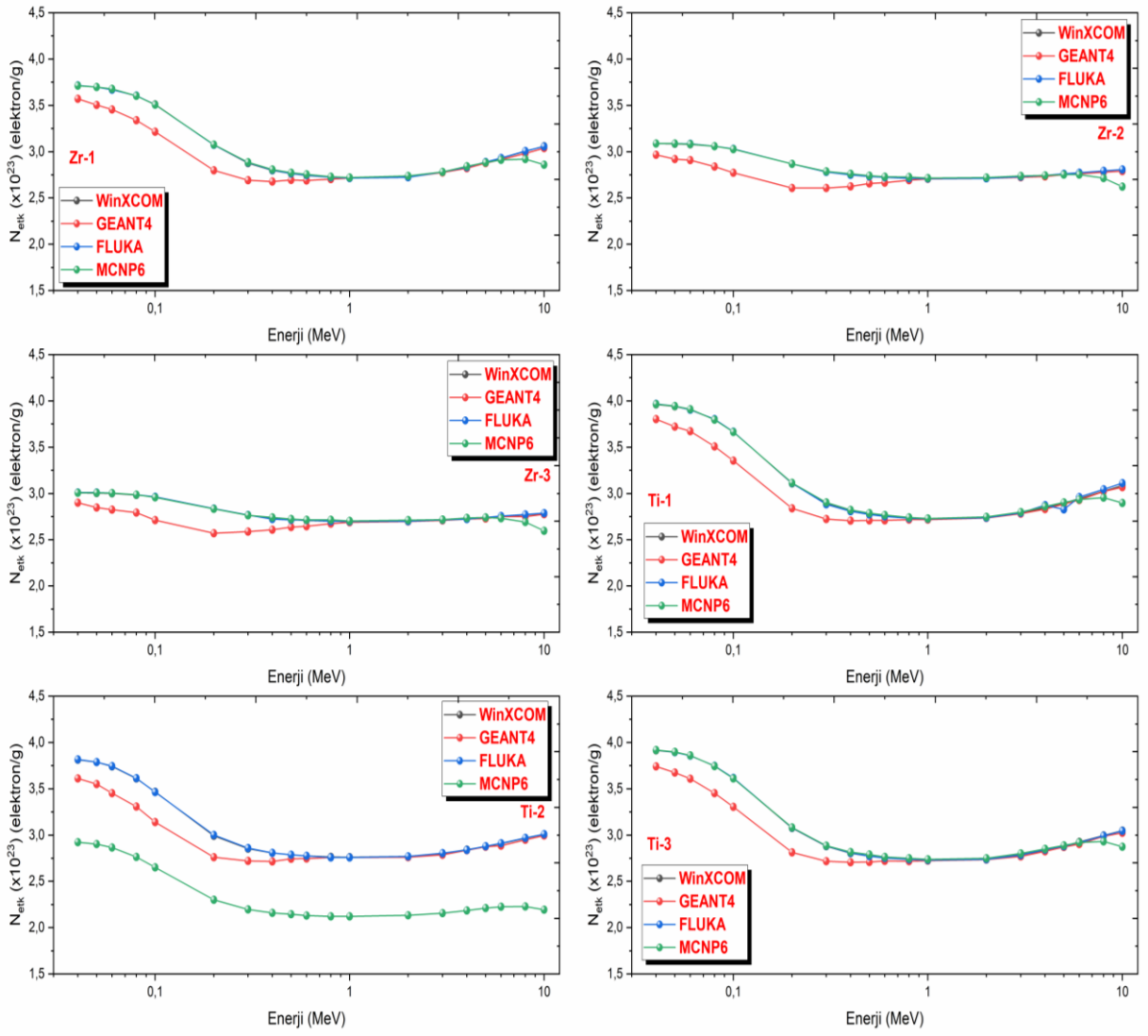
5.7. Etkin Elektron Yoğunluğu Parametresine Ait Araştırma Bulguları

Etkin elektron yoğunluğu etkin atom numarası kullanılarak belirlenen bir parametredir ve aralarında doğrusal bir ilişki vardır. Etkin elektron yoğunluğu malzemenin birim kütledeki elektron miktarını belirtir ve birimi elektron/g boyutundadır. Bu parametrenin büyük değerleri gama ışınlarının daha iyi zırhladığının göstergesidir.

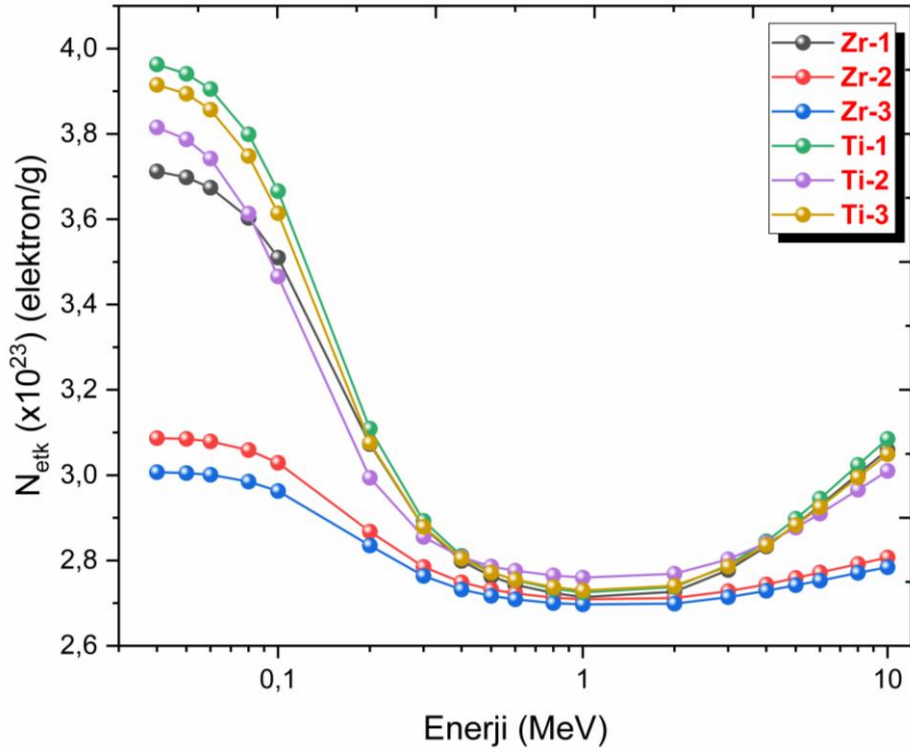
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide etkin elektron yoğunluğu sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre denklem (4.11) yardımıyla hesaplanmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen etkin elektron yoğunluğu değeri sonuçları Tablo 5.7'de listelenirken, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.7. Metalik camlara ait etkin elektron yoğunluğu ($\times 10^{23}$) (elektron/g) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	3,712	3,570	3,715	3,714	3,087	2,966	3,088	3,087
0,05	3,698	3,505	3,699	3,699	3,085	2,920	3,087	3,087
0,06	3,674	3,456	3,669	3,677	3,079	2,908	3,084	3,082
0,08	3,603	3,340	3,605	3,603	3,059	2,840	3,059	3,059
0,1	3,510	3,215	3,508	3,508	3,029	2,772	3,029	3,027
0,2	3,073	2,800	3,075	3,078	2,868	2,609	2,869	2,868
0,3	2,878	2,693	2,883	2,885	2,785	2,609	2,782	2,786
0,4	2,799	2,678	2,802	2,809	2,749	2,625	2,750	2,760
0,5	2,763	2,694	2,764	2,772	2,732	2,657	2,733	2,741
0,6	2,743	2,688	2,746	2,755	2,723	2,667	2,723	2,730
0,8	2,724	2,704	2,724	2,729	2,713	2,691	2,711	2,726
1	2,714	2,714	2,715	2,722	2,709	2,705	2,708	2,715
2	2,727	2,726	2,725	2,737	2,712	2,713	2,711	2,721
3	2,778	2,775	2,781	2,783	2,728	2,725	2,729	2,737
4	2,833	2,822	2,835	2,841	2,744	2,733	2,745	2,745
5	2,884	2,877	2,888	2,883	2,759	2,754	2,761	2,754
6	2,929	2,916	2,932	2,913	2,772	2,762	2,774	2,752
8	3,003	2,981	3,006	2,921	2,792	2,778	2,793	2,715
10	3,059	3,038	3,057	2,861	2,807	2,791	2,808	2,623
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	3,007	2,899	3,010	3,007	3,963	3,803	3,969	3,966
0,05	3,005	2,848	3,010	3,007	3,941	3,722	3,944	3,944
0,06	3,001	2,826	3,005	3,003	3,905	3,674	3,905	3,909
0,08	2,985	2,794	2,988	2,987	3,799	3,508	3,802	3,797
0,1	2,963	2,713	2,963	2,958	3,666	3,354	3,668	3,664
0,2	2,835	2,571	2,837	2,833	3,109	2,840	3,111	3,114
0,3	2,764	2,589	2,768	2,764	2,893	2,723	2,884	2,903
0,4	2,732	2,607	2,725	2,742	2,811	2,707	2,809	2,822
0,5	2,717	2,637	2,716	2,723	2,773	2,708	2,774	2,786
0,6	2,709	2,647	2,711	2,715	2,754	2,710	2,752	2,766
0,8	2,700	2,674	2,700	2,716	2,734	2,717	2,733	2,741
1	2,697	2,688	2,698	2,704	2,725	2,717	2,726	2,730
2	2,699	2,698	2,702	2,711	2,738	2,735	2,739	2,746
3	2,714	2,709	2,715	2,718	2,789	2,781	2,790	2,800
4	2,729	2,724	2,725	2,736	2,845	2,831	2,874	2,861
5	2,742	2,730	2,740	2,740	2,898	2,887	2,829	2,902
6	2,753	2,749	2,755	2,732	2,945	2,929	2,961	2,934
8	2,771	2,749	2,774	2,692	3,024	3,022	3,045	2,954
10	2,784	2,777	2,786	2,595	3,085	3,068	3,111	2,898
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	3,815	3,612	3,818	2,923	3,915	3,742	3,918	3,918
0,05	3,787	3,552	3,787	2,903	3,894	3,676	3,894	3,897
0,06	3,742	3,454	3,746	2,865	3,857	3,610	3,858	3,862
0,08	3,613	3,309	3,615	2,765	3,748	3,454	3,748	3,744
0,1	3,466	3,141	3,465	2,651	3,614	3,304	3,618	3,613
0,2	2,994	2,760	3,002	2,301	3,076	2,812	3,080	3,082
0,3	2,855	2,722	2,859	2,196	2,879	2,719	2,883	2,885
0,4	2,808	2,716	2,808	2,161	2,805	2,707	2,807	2,817
0,5	2,786	2,745	2,786	2,144	2,772	2,710	2,773	2,789
0,6	2,776	2,748	2,776	2,132	2,755	2,721	2,754	2,764
0,8	2,765	2,758	2,757	2,123	2,738	2,718	2,738	2,750
1	2,760	2,757	2,758	2,122	2,730	2,724	2,729	2,739
2	2,769	2,760	2,770	2,134	2,741	2,736	2,739	2,749
3	2,803	2,786	2,804	2,158	2,786	2,770	2,785	2,802
4	2,841	2,836	2,838	2,186	2,836	2,825	2,841	2,850
5	2,877	2,873	2,880	2,213	2,883	2,870	2,880	2,890
6	2,910	2,886	2,911	2,225	2,925	2,904	2,921	2,921
8	2,966	2,949	2,970	2,228	2,995	2,987	2,992	2,931
10	3,010	2,995	3,011	2,194	3,049	3,026	3,046	2,875



Şekil 5.13. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin elektron yoğunluğu değerlerinin grafiği



Şekil 5.14. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin elektron yoğunluğu değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

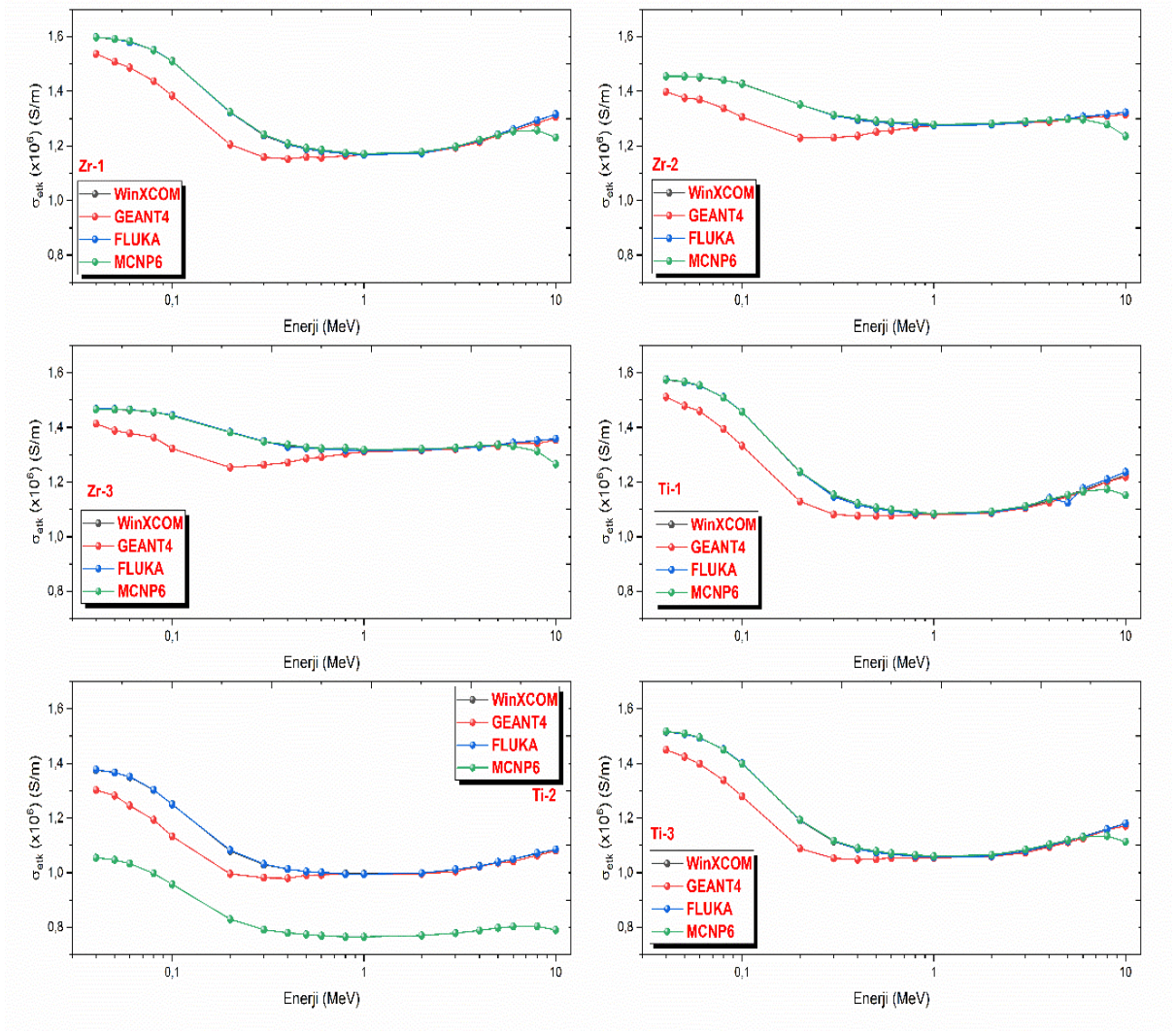
5.8. Etkin İletkenlik Parametresine Ait Araştırma Bulguları

Etkin iletkenlik özellikle elektronik cihazların gama ışını ile etkileşime girdiğinde önemli olan bir parametredir. Gama ışını elektronik cihazlarda sinyal kesilmelerine ya da değişikliklerine veya devre elemanlarını etkileyerek farklı sonuçların ortaya çıkmasına sebep olur. Etkin iletkenlik, etkin elektron yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Bu parametrenin büyük değerleri malzeme ile gama ışınlarının daha fazla etkileşime girdiğini gösterir.

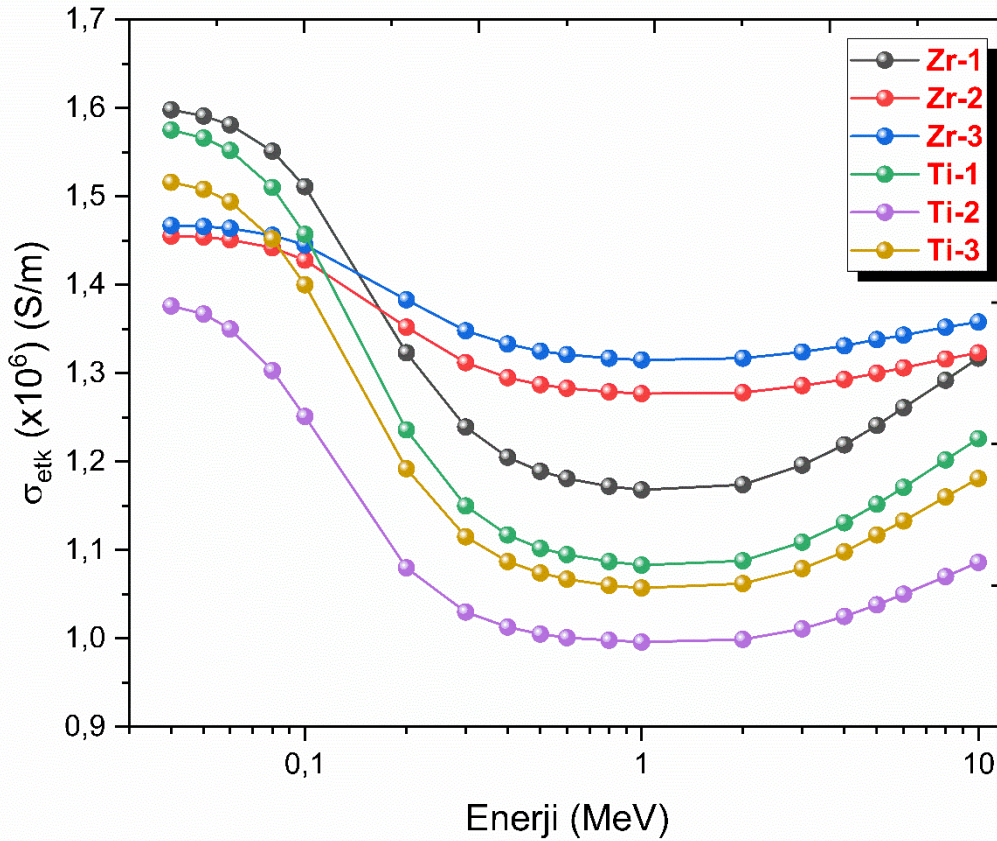
Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların 0,04-10 MeV enerji aralığında 19 farklı foton enerjide etkin iletkenlik sonuçları GEANT4, FLUKA, MCNP6simülasyon kodları ve WinXCOM programı yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametre denklem (4.12) yardımıyla hesaplanmıştır. Dört farklı yöntem ile elde edilen etkin iletkenlik değeri sonuçları Tablo 5.8'de listelenirken, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da ise bunların foton enerjisi ile değişim grafikleri sunulmuştur.

Tablo 5.8. Metalik camlara ait etkin iletkenlik değeri ($\times 10^6$) (S/m) sonuçları

Enerji (MeV)	Zr-1				Zr-2			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	1,598	1,537	1,599	1,598	1,455	1,398	1,455	1,455
0,05	1,591	1,508	1,592	1,592	1,454	1,376	1,455	1,455
0,06	1,581	1,487	1,579	1,583	1,451	1,370	1,453	1,453
0,08	1,551	1,438	1,552	1,551	1,442	1,338	1,442	1,442
0,1	1,511	1,384	1,510	1,510	1,428	1,306	1,427	1,427
0,2	1,323	1,205	1,323	1,325	1,352	1,229	1,352	1,352
0,3	1,239	1,159	1,241	1,242	1,312	1,230	1,311	1,313
0,4	1,205	1,152	1,206	1,209	1,295	1,237	1,296	1,301
0,5	1,189	1,160	1,190	1,193	1,287	1,252	1,288	1,292
0,6	1,181	1,157	1,182	1,186	1,283	1,257	1,283	1,287
0,8	1,172	1,164	1,172	1,175	1,279	1,268	1,278	1,285
1	1,168	1,168	1,168	1,172	1,277	1,275	1,276	1,279
2	1,174	1,173	1,173	1,178	1,278	1,279	1,278	1,282
3	1,196	1,194	1,197	1,198	1,286	1,284	1,286	1,290
4	1,219	1,214	1,220	1,223	1,293	1,288	1,294	1,294
5	1,241	1,238	1,243	1,241	1,300	1,298	1,301	1,298
6	1,261	1,255	1,262	1,254	1,306	1,302	1,308	1,297
8	1,292	1,283	1,294	1,257	1,316	1,309	1,316	1,279
10	1,317	1,307	1,316	1,231	1,323	1,315	1,323	1,236
Enerji (MeV)	Zr-3				Ti-1			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	1,467	1,414	1,468	1,467	1,575	1,512	1,577	1,576
0,05	1,466	1,389	1,468	1,467	1,566	1,479	1,567	1,568
0,06	1,464	1,379	1,466	1,465	1,552	1,460	1,552	1,554
0,08	1,456	1,363	1,457	1,457	1,510	1,394	1,511	1,509
0,1	1,445	1,323	1,445	1,443	1,457	1,333	1,458	1,457
0,2	1,383	1,254	1,384	1,382	1,236	1,129	1,237	1,238
0,3	1,348	1,263	1,350	1,348	1,150	1,082	1,146	1,154
0,4	1,333	1,272	1,329	1,337	1,117	1,076	1,117	1,122
0,5	1,325	1,286	1,325	1,328	1,102	1,076	1,103	1,107
0,6	1,321	1,291	1,322	1,324	1,095	1,077	1,094	1,099
0,8	1,317	1,304	1,317	1,325	1,087	1,080	1,086	1,090
1	1,315	1,311	1,316	1,319	1,083	1,080	1,084	1,085
2	1,317	1,316	1,318	1,322	1,088	1,087	1,089	1,092
3	1,324	1,321	1,324	1,326	1,109	1,105	1,109	1,113
4	1,331	1,329	1,329	1,335	1,131	1,125	1,142	1,137
5	1,338	1,332	1,336	1,336	1,152	1,147	1,124	1,153
6	1,343	1,341	1,344	1,332	1,171	1,164	1,177	1,166
8	1,352	1,341	1,353	1,313	1,202	1,201	1,210	1,174
10	1,358	1,355	1,359	1,266	1,226	1,219	1,237	1,152
Enerji (MeV)	Ti-2				Ti-3			
	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6	Teorik	GEANT4	FLUKA	MCNP6
0,04	1,376	1,303	1,378	1,055	1,516	1,450	1,517	1,518
0,05	1,367	1,282	1,366	1,047	1,508	1,424	1,508	1,510
0,06	1,350	1,246	1,352	1,034	1,494	1,398	1,494	1,496
0,08	1,303	1,194	1,304	0,998	1,452	1,338	1,452	1,450
0,1	1,251	1,133	1,250	0,957	1,400	1,280	1,401	1,399
0,2	1,080	0,996	1,083	0,830	1,192	1,089	1,193	1,194
0,3	1,030	0,982	1,032	0,792	1,115	1,053	1,117	1,118
0,4	1,013	0,980	1,013	0,780	1,087	1,048	1,087	1,091
0,5	1,005	0,991	1,005	0,774	1,074	1,050	1,074	1,080
0,6	1,001	0,992	1,002	0,769	1,067	1,054	1,067	1,071
0,8	0,998	0,995	0,995	0,766	1,060	1,053	1,061	1,065
1	0,996	0,995	0,995	0,766	1,057	1,055	1,057	1,061
2	0,999	0,996	0,999	0,770	1,062	1,060	1,061	1,065
3	1,011	1,005	1,012	0,779	1,079	1,073	1,079	1,085
4	1,025	1,023	1,024	0,789	1,098	1,094	1,100	1,104
5	1,038	1,037	1,039	0,798	1,117	1,112	1,116	1,119
6	1,050	1,041	1,050	0,803	1,133	1,125	1,132	1,131
8	1,070	1,064	1,072	0,804	1,160	1,157	1,159	1,135
10	1,086	1,081	1,086	0,791	1,181	1,172	1,180	1,114



Şekil 5.15. İncelenen metalik cam numunelerinin karşılaştırmalı etkin iletkenlik değerlerinin grafiği



Şekil 5.16. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların etkin iletkenlik değerlerinin WinXCOM yardımı ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

5.9. Nötron Zırhlama Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları

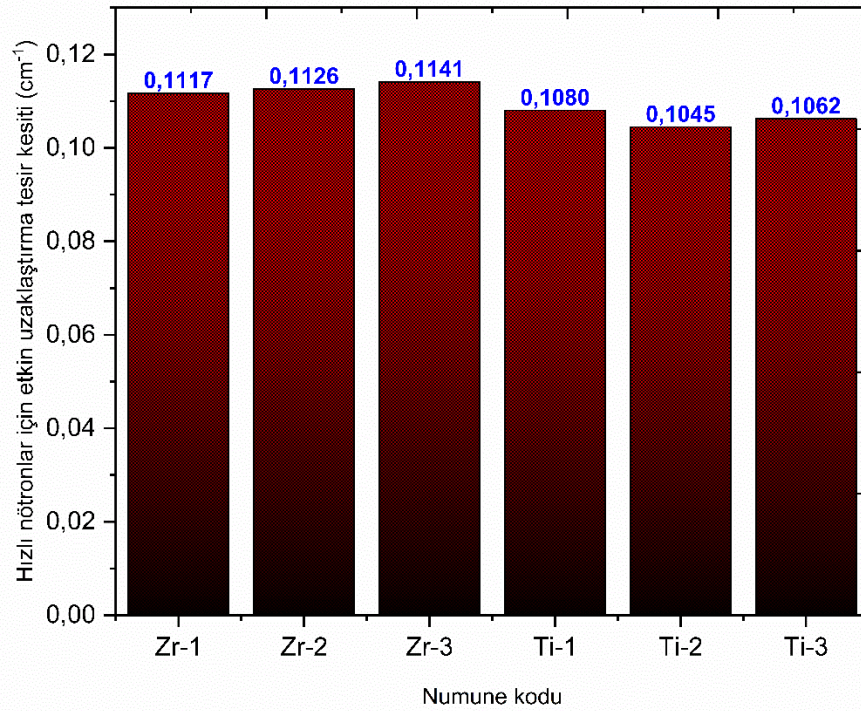
Metalik camların nötron radyasyonu zırhlama parametrelerinden hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti, ortalama serbest yol ve toplam makroskobik tesir kesiti teorik olarak hesaplanmıştır. Ortalama serbest yol ve toplam makroskobik tesir kesiti GEANT4 simülasyon kodu ile hesaplanmıştır. 0,2 ile 2 cm değişen kalınlıkta 4,5 MeV enerjiye sahip nötronlarda ve 1 cm numune kalınlığından geçen 0,1 -10 MeV enerjiye sahip olan nötronların nötron zırhlama kapasiteleri GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımı ile belirlenmiştir.

Hızlı nötronlar için etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti, numune üzerine gelen hızlı nötronların malzeme tarafından azaltılma olasılığı ile ilgili bir parametredir ve birimi cm^{-1} boyutundadır. 500 keV üzerinde enerjiye sahip nötronlar hızlı nötron olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yükseklikte enerjiye sahip nötronların azaltılması önem taşımaktadır. Bu süreçte numune üzerine gelen hızlı nötronlarda saçılma olayı gözlemlenir ve bu yüzden büyüklük olarak nötrona yakın olduğu için hidrojen gibi düşük

atom numaralı elementler nötron zırh malzemesi olarak kullanılır. Nötron zırh malzemesi olarak hidrojen miktarı bol olan su ve parafın çok tercih edilmektedir. Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan metalik camların hızlı nötronlar için etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti parametresi denklem (4.13) yardımıyla belirlenmiştir. İncelenen metalik camların hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları Tablo 5.9'da listelenmiştir ve görsel olarak Şekil 5. 17'de sunulmuştur.

Tablo 5.9. Metalik camlara ait hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti değeri (cm^{-1}) sonuçları

Element	Zr-1		Zr-2		Zr-3	
	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})
Be	0,2027	0,0137	-	-	-	-
Al	-	-	0,2431	0,0071	0,2398	0,0070
Ti	0,6602	0,0135	0,2156	0,0044	-	-
Ni	0,5866	0,0111	0,7720	0,0147	0,6572	0,0125
Cu	0,7939	0,0148	1,0247	0,0191	0,8696	0,0162
Zr	3,7565	0,0586	4,3146	0,0673	4,6207	0,0721
Nb	-	-	-	-	0,4128	0,0063
Toplam	6,000	0,1117	6,570	0,1126	6,800	0,1141
Element	Ti-1		Ti-2		Ti-3	
	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})	Kısmi yoğunluk	Σ_R (cm^{-1})
Be	0,2094	0,0141	0,1718	0,0116	0,1832	0,0123
Ti	1,6073	0,0329	2,7887	0,0572	1,9456	0,0399
Ni	0,3184	0,0061	0,4974	0,0094	0,1789	0,0034
Cu	0,5855	0,0109	0,6058	0,0113	0,7748	0,0144
Zr	2,8203	0,0440	0,9663	0,0151	2,3175	0,0362
Toplam	5,541	0,1080	5,030	0,1045	5,400	0,1062

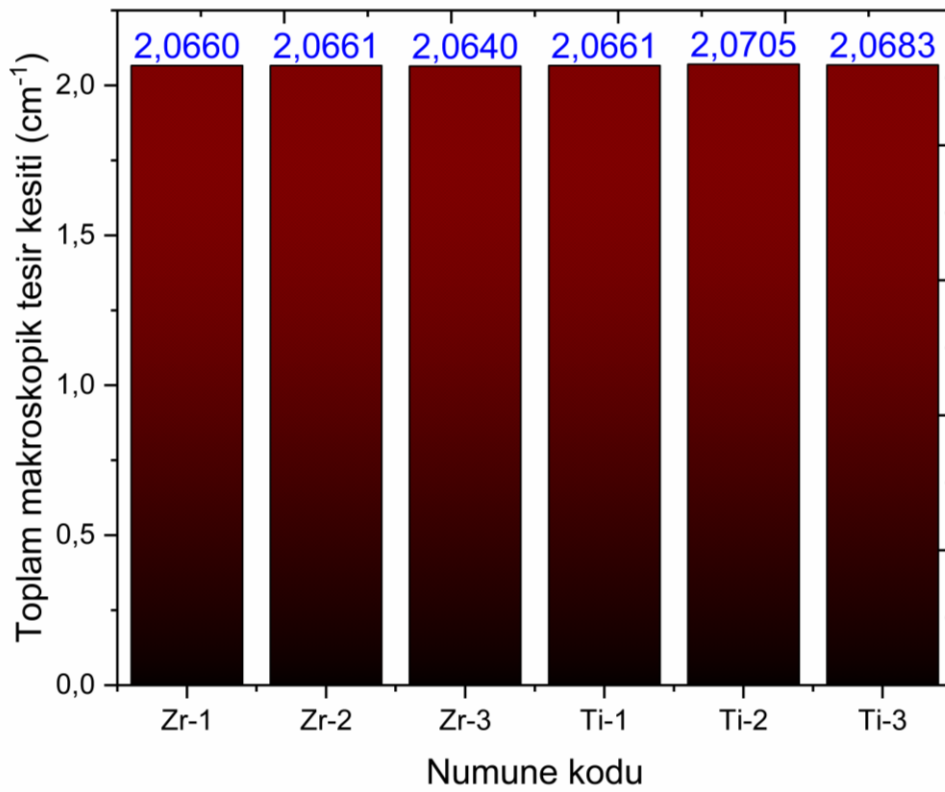


Şekil 5.17. Zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları

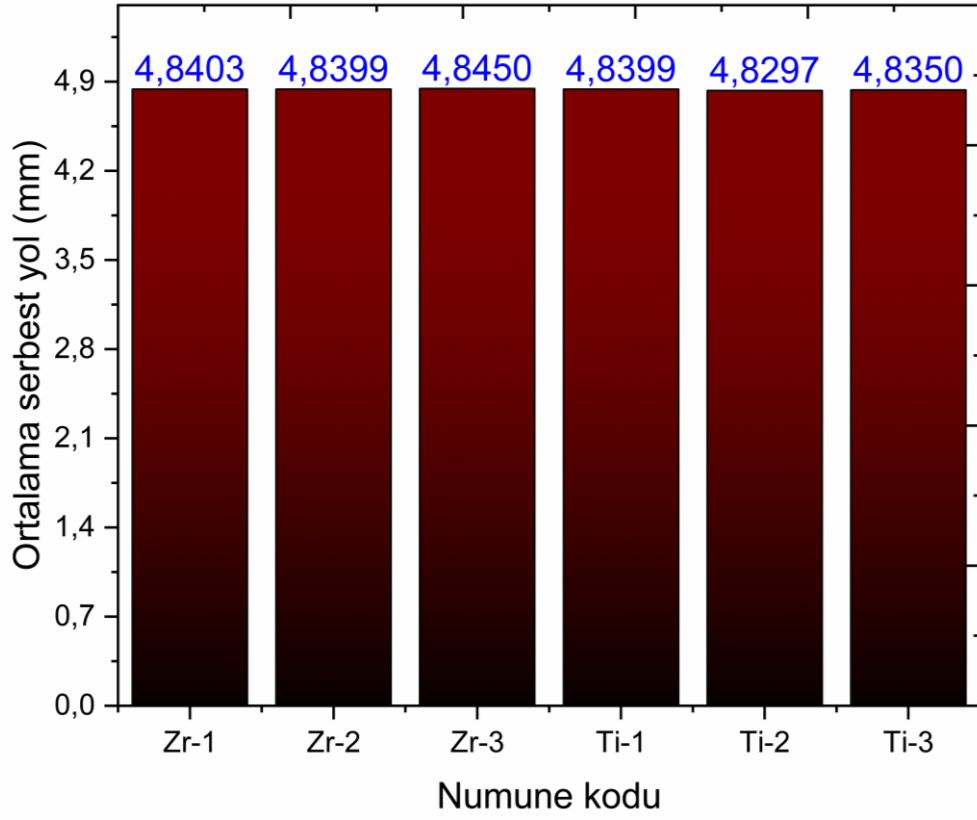
Metalik camların nötron zırlama karakteristiklerini incelemek için toplam makroskobik tesir kesiti ve ortalama serbest yol belirlenen diğer parametrelerdendir. Toplam makroskobik tesir kesiti saçılma ve soğurma tesir kesitlerini kapsayan bir parametredir ve cm^{-1} boyutundadır. Bu parametre gelen nötronun malzemenin birim kalınlığı ile etkileşime girme ihtimaliyetinin göstergesidir. Ortalama serbest yol ise toplam makroskobik tesir kesiti ile ters orantılı olan bir parametredir ve nötronun malzeme içinde iki ardışık etkileşim arasında katettiği mesafe olarak tanımlanır. Nötronlar için ortalama serbest yol parametresi mm veya cm birimini kullanır. 10 mm numune kalınlığında 4,5 MeV enerjiye sahip nötronların metalik camlardan geçen sayısı da belirlenmiştir. Geçen nötron sayısının küçüklüğü malzemenin iyi bir nötron zırh malzemesi olduğunun göstergesidir. Bu üç parametre GEANT4 simülasyon kodu yardımıyla belirlenmiştir. İncelenen metalik camların toplam makroskobik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve 10 mm numune kalınlığında 4,5 MeV nötron enerjisinde numuneden geçen nötron sayıları Tablo 5.10’da listelenmiştir. Toplam makroskobik tesir kesiti ve ortalama serbest yol parametrelerinin sonuçları Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.10. GEANT4 ile belirlenmiş 10 mm numune kalınlığında ve 4,5 MeV nötron enerjisinde toplam makroskobik tesir kesiti (cm^{-1}), ortalama serbest yol (mm) ve numuneden geçen nötron sayısı sonuçları

Numune Kodu	Toplam makroskobik tesir kesiti (cm^{-1})	Ortalama serbest yol (mm)	Geçen nötron sayısı
Zr-1	2,0660	4,8403	8230260
Zr-2	2,0661	4,8399	8279885
Zr-3	2,0640	4,8450	8295450
Ti-1	2,0661	4,8399	8200226
Ti-2	2,0705	4,8297	8121396
Ti-3	2,0683	4,8350	8198021



Şekil 5.18. İncelenen metalik camlara ait toplam makroskobik tesir kesiti grafiği



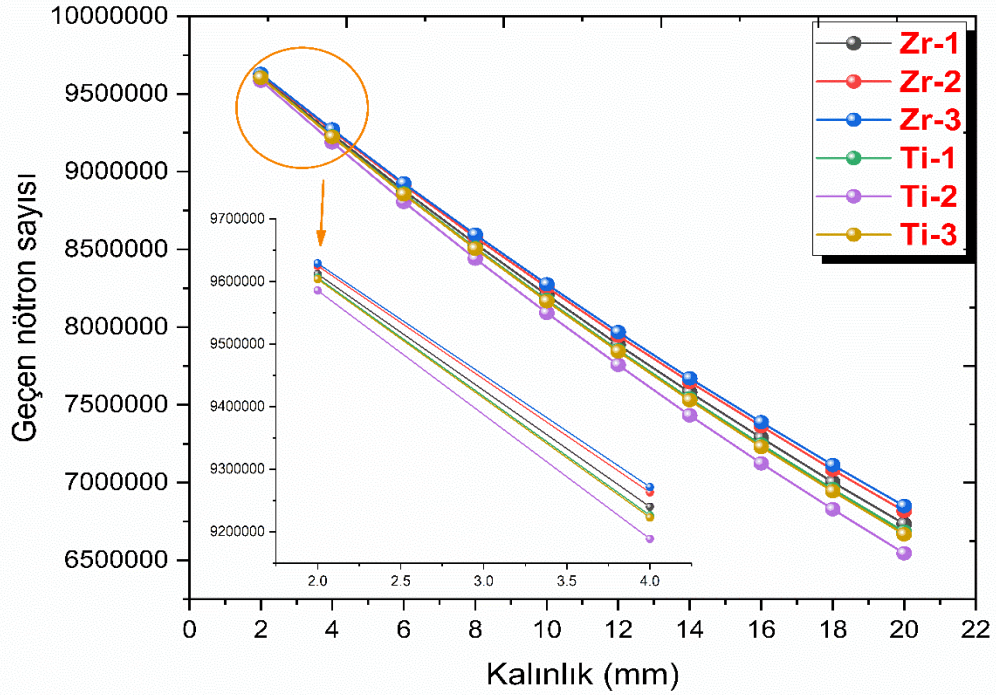
Şekil 5.19. İncelenen metalik camlara ait ortalama serbest yol grafiği

Metalik camların nötron zırhlama kabiliyetlerinde kalınlık etkisini görebilmek için 2 ila 20 mm numune kalınlığı aralığında 10 farklı kalınlıkta incelenen metalik camlardan geçen nötron sayıları belirlenmiştir. Hem GEANT4 hem de FLUKA simülasyon kodları ile kalınlık etkisi araştırılmıştır. Farklı kalınlıklarda metalik camlardan 10000000 başlangıç nötron sayılarının metalik camlardan geçtikten sonraki sayıları Tablo 5.11’de listelenmiştir. FLUKA yardımıyla belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının kalınlığa göre değişim grafiği Şekil 5.20’de sunulurken GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen geçen nötron sayıları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.21’de verilmiştir.

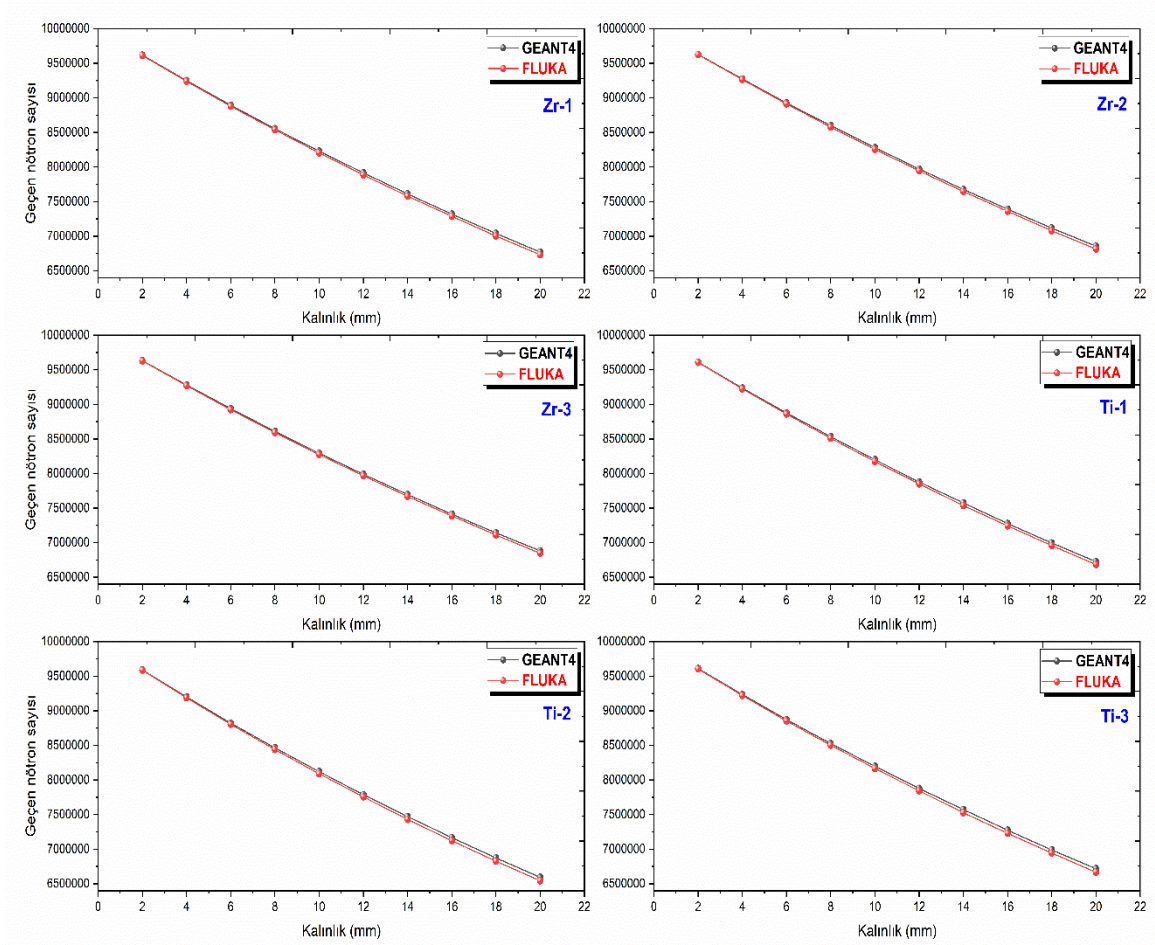
Tablo 5.11. Farklı numune kalınlıklarında incelenen metalik camlardan geçen nötron sayısı

Kalınlık (mm)	Zr-1		Zr-2		Zr-3	
	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA
2	9618236	9611852	9629521	9624950	9632693	9629101
4	9249865	9239753	9273497	9262882	9280420	9271584
6	8895966	8879304	8928796	8914328	8939739	8925409
8	8555285	8536891	8600238	8576885	8610921	8595358
10	8230260	8206726	8279885	8256638	8295450	8275960
12	7916938	7885858	7974028	7944948	7988808	7967592
14	7611764	7580840	7678991	7647803	7697907	7671269
16	7319963	7287254	7393842	7363037	7413871	7388714
18	7041360	7002559	7118514	7081596	7143551	7112750
20	6772629	6733376	6857508	6816609	6881307	6849240

Kalınlık (mm)	Ti-1		Ti-2		Ti-3	
	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA
2	9610457	9606008	9591821	9585545	9610761	9603847
4	9236040	9226303	9202361	9188580	9235643	9222863
6	8878018	8860332	8824852	8805627	8875118	8854437
8	8534257	8509948	8466242	8440348	8528865	8503914
10	8200226	8175066	8121396	8091188	8198021	8166806
12	7880201	7852717	7788489	7756678	7878338	7843460
14	7577274	7540216	7472236	7431828	7571731	7529508
16	7279330	7244686	7168018	7123088	7274843	7229513
18	6996259	6957569	6874599	6827981	6988932	6943443
20	6726760	6683865	6593817	6544740	6718676	6666730



Şekil 5.20. FLUKA ile belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının kalınlık ile değişimi



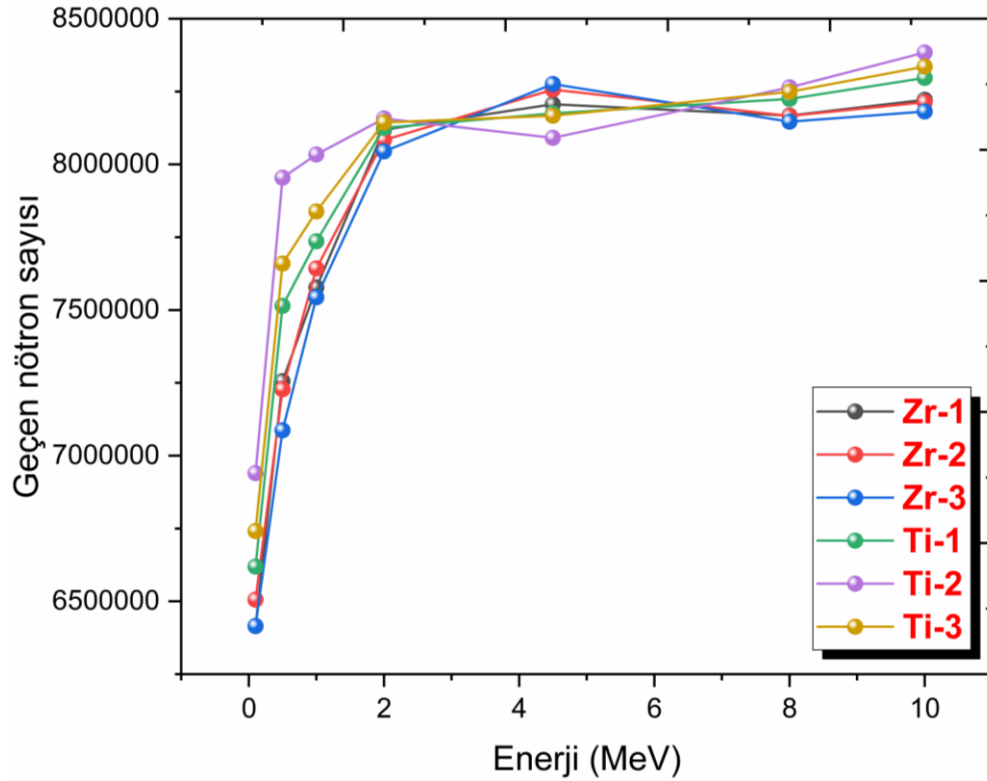
Şekil 5.21. GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen farklı kalınlıklarda metalik camlardan geçen nötron sayılarının karşılaştırmalı gösterimi

İncelenen metalik camların nötron zırhlama karakteristiklerini incelemek için belirlenen son parametre farklı nötron enerjilerinde incelenen metalik camlardan geçen nötron sayılarıdır. 0,1 ila 10 MeV nötron enerjisi aralığında yedi farklı enerjide metalik camlardan geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımıyla belirlenmiştir. Farklı nötron enerjilerinde metalik camlardan 10000000 başlangıç nötron sayılarının metalik camlardan geçtikten sonraki sayıları Tablo 5.12’de listelenmiştir. FLUKA yardımıyla belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının enerjiye göre değişim grafiği Şekil 5.22’de sunulurken GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen farklı enerjilerde metalik camlardan geçen nötron sayıları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.23’te verilmiştir.

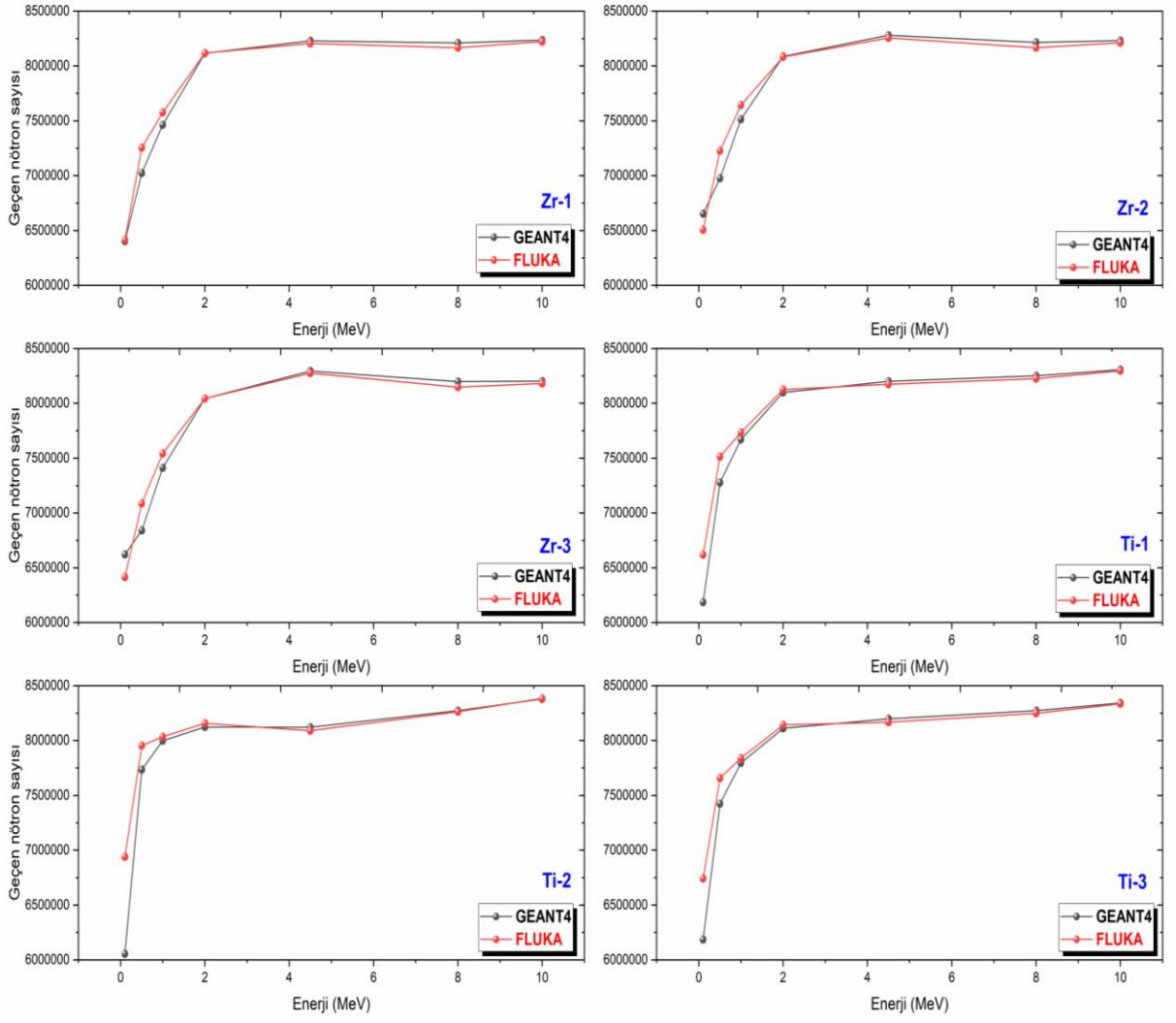
Tablo 5.12. Farklı nötron enerjilerinde incelenen metalik camlardan geçen nötron sayısı

Enerji (MeV)	Zr-1		Zr-2		Zr-3	
	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA
0,1	6403083	6415147	6652299	6506089	6620962	6415555
0,5	7025661	7255686	6977049	7227895	6841049	7087351
1,0	7462666	7577685	7512889	7643041	7412579	7543843
2,0	8116976	8119256	8088837	8083439	8044486	8045012
4,5	8230260	8206726	8279885	8256638	8295450	8275960
8,0	8209507	8167948	8215615	8166139	8198464	8146916
10,0	8237985	8221740	8233407	8213451	8202555	8181682

Enerji (MeV)	Ti-1		Ti-2		Ti-3	
	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA
0,1	6184655	6619251	6054476	6939875	6186113	6741733
0,5	7277605	7514618	7735893	7954656	7425112	7659314
1,0	7670428	7735811	7999425	8034241	7796790	7838408
2,0	8099748	8125944	8125111	8157194	8112032	8144285
4,5	8200226	8175066	8121396	8091188	8198021	8166806
8,0	8251360	8225095	8272444	8264154	8273520	8248894
10,0	8306372	8297109	8378988	8384068	8344458	8335833



Şekil 5.22. FLUKA ile belirlenen metalik camlardan geçen nötron sayılarının enerji ile değişimi



Şekil 5.23. GEANT4 ve FLUKA kodları yardımıyla belirlenen farklı enerjilerde metalik camlardan geçen nötron sayılarının karşılaştırmalı gösterimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında WinXCOM bilgisayar programı, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 simülasyon kodları kullanılarak zirkonyum ve titanyum tabanlı bazı metalik camların gama ve nötron radyasyonlarına karşı zırhlama karakteristikleri incelenmiştir. İncelenen zirkonyum tabanlı metalik camlar Vitroley-1 ($Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$), Vitroley-105($Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$) ve Vitroley-106a ($Zr_{57}Nb_5Al_{10}Cu_{15,4}Ni_{12,6}$) iken titanyum tabanlı metalik camlar $Ti_{32,8}Zr_{30,2}Ni_{5,3}Cu_9Be_{22,7}$, $Ti_{55}Zr_{10}Cu_9Ni_8Be_{18}$ ve $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$ şeklindedir. Gama-ışını zırhlama kapasiteleri dört farklı yaklaşımla (teorik, GEANT4, FLUKA ve MCNP6) ile belirlenmiştir. Gama-ışını zırhlama kapasiteleri 0,04 ila 10 MeV foton enerjileri aralığında irdelenmiştir. Bu amaçla kütle azaltma katsayıları, lineer azaltma katsayıları, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yolları, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlikleri hesaplanmıştır. Nötron parçacıklarının zırhlama kapasitelerini incelemek için ise öncelikle teorik yol ile hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti parametresi hesaplanmıştır. FLUKA ve GEANT4 simülasyon yaklaşımları kullanılarak 4,5 MeV enerjide ve 1 cm numune kalınlığında metalik camlardan geçen nötron sayıları ve 4,5 MeV enerjide on farklı metalik cam kalınlığında (2 mm ila 20 mm aralığında) numunelerden geçen nötron sayıları tespit edilmiştir. 1 cm metalik cam kalınlığında yedi farklı enerjide (0,1 ila 10 MeV enerji aralığında) numuneden geçen nötron sayıları GEANT4 ile FLUKA simülasyon kodları ile belirlenmiştir. Son olarak, GEANT4 simülasyonu kullanılarak 1 cm numune kalınlığında ve 4,5 MeV enerjide metalik camların nötron zırhlama kapasitelerini incelemek için ortalama serbest yol ve toplam makroskobik tesir kesitleri hesaplanmıştır.

Zr-1, Zr-2, Zr-3, Ti-1, Ti-2 ve Ti-3 olarak kodlanan zirkonyum ve titanyum tabanlı metalik camların 0,04 ila 10 MeV enerji aralığında 19 farklı enerjide GEANT4, FLUKA MCNP6 simülasyon kodlarında ve WinXCOM programı yardımıyla ve Denklem (4.1) kullanılarak belirlenen kütle azaltma katsayıları sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de sunulurken WinXCOM programı ile elde edilen sonuçlar ise metalik

camların kütle azaltma katsayılarını karşılaştırabilmek için Şekil 5.2'de sunulmuştur. Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'e göre kullanılan WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları arasında uyum vardır. Tablo ve şekiller incelendiğinde kütle azaltma katsayılarının artan enerji ile azaldığı ve yüksek atom numarasına sahip elementin daha fazla olduğu metalik camlarda kütle azaltma katsayısının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Artan enerji ile gözlemlenen eksponansiyel azalma fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitleri ile açıklanabilir. Düşük enerji bölgesinde baskın olan fotoelektrik olayın tesir kesiti $E^{-3.5}$ (E, enerji) ve $Z^{4.5}$ (Z, atom numarası) ile orantılıdır ve düşük enerji bölgesindeki keskin düşüş fotoelektrik tesir kesitinin enerji ile ilişkisinden kaynaklanmaktadır. Orta enerji bölgesinde Compton saçılma tesir kesiti baskındır ve E^{-1} ve Z ile orantılıdır. Orta enerji bölgesindeki küçük değişimler ile bu orantılıklar ile alakalıdır. Son olarak yüksek enerji bölgesinde ($E \geq 1,024$ MeV) çift oluşum tesir kesiti baskındır ve E ve Z^2 ile orantılıdır. Elde edilen sonuçlara göre metalik camların kütle azaltma katsayıları $Zr-3 > Zr-2 > Zr-1 > Ti-1 > Ti-3 > Ti-2$ şeklinde sıralanmaktadır. Zr-3 numunesinin kütle azaltma katsayılarının diğerlerine göre daha yüksek olmasının sebebi içeriğindeki Zr miktarının diğerlerine daha fazla olması ve incelenen metalik camların içeriğinde bulunan elementler arasında en yüksek atom numarasına sahip Nb'nin varlığıdır. Kütle azaltma katsayısı sonuçlarına göre incelenen metalik camlar içerisinde en iyi gama ışını zırh malzemesi Zr-3 olarak kodlanan metalik camdır.

Kütle azaltma katsayısı malzemenin yoğunluğundan ve faz durumundan bağımsız bir parametre olduğu çok kullanışlı değildir. Bunun yerine malzemenin yoğunluğuna ve faz durumuna bağlı olan lineer azaltma katsayısı daha kullanışlı bir parametredir. İncelenen metalik camların kütle azaltma katsayıları denklem (4.3)'de kullanılarak lineer azaltma katsayıları elde edilmiştir. İncelenen metalik camlara ait WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımıyla elde edilen lineer azaltma katsayıları Tablo 5.2'de listelenirken bu parametrenin foton enerjisine bağlı değişimi ve kullanılan metotlar arasındaki uyumu görmek için Şekil 5.3'de görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca, metalik camların lineer azaltma katsayılarını karşılaştırmak için ise Şekil 5.4 oluşturulmuştur. Tablo 5.2 ve Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi kullanılan yöntemler arasında iyi bir uyum gözlemlenirken, artan foton enerjisi ile lineer azaltma katsayısında bir azalma görülmüştür. Bu azalma kütle azaltma katsayısında da belirtildiği gibi fotoelektrik,

Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitleri ile açıklanabilir. İlgili tablo ve şekillerden de görüldüğü gibi en yüksek lineer azaltma katsayılarına sahip metalik cam Zr-3 olarak kodlanırken, en düşük lineer azaltma katsayılarına sahip olan ise Ti-2 olarak kodlanan metalik camdır. Bu yüzden lineer azaltma katsayısı sonuçlarına göre Zr-3 kodlu numune en iyi gama ışını zırlama özelliğine sahipken Ti-2 kodlu numune ise en kötü gama ışını zırlama özelliğine sahiptir. Zr-3 kodlu metalik camın en yüksek lineer azaltma katsayılarına sahip olmasının sebebi içeriğinde bol miktarda bulunan Zr elementi, incelenen metalik camların içeriğinde bulunan en yüksek atom numarasına sahip olan Nb elementi ve metalik camın yoğunluğudur.

Lineer azaltma katsayısına bağlı olan yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol parametreleri incelenen diğer gama radyasyonu zırlama parametreleridir. Bu parametreler ile lineer azaltma katsayısı arasında ters bir orantı vardır. Yarı kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin yarıya düşmesi için gerekli numune kalınlığı, onda-bir kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin %90'nını azaltmak için gerekli numune kalınlığı ve ortalama serbest yol ise başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'sinin geçebileceği numune kalınlığı olarak ifade edilir. Bu tanımlamalardan da anlaşılacağı üzere bu parametreler ne kadar küçük olursa numunenin radyasyon zırlama özelliği de o kadar iyi olacaktır. Bu parametreler sırasıyla denklem (4.4), (4.5) ve (4.6) ve WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımıyla belirlenmiştir. Yarı kalınlık değeri sonuçları Tablo 5.3, onda-bir kalınlık değeri sonuçları Tablo 5.4 ve ortalama serbest yol sonuçları ise Tablo 5.5'de listelenmiştir. Yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol sonuçlarının WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları ile elde edilen sonuçlarının grafikleri Şekil 5.5, Şekil 5.7 ve Şekil 5.9'da sunulmuştur. İncelenen metalik camların yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol sonuçlarını karşılaştırabilmek için ise WinXCOM yardımıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.6, Şekil 5.8 ve Şekil 5.10'da görsel olarak sunulmuştur. Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 ve Şekil 5.5, Şekil 5.7 ve Şekil 5.9'dan da görüldüğü gibi kullanılan yöntemler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Ayrıca, artan gama ışını enerjisi ile bu parametrelerin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.6, Şekil 5.8 ve Şekil 5.10'dan da görüldüğü en düşük yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol değerine sahip olan metalik cam Zr-3 kodlu numune iken en yükseklerine sahip olan ise Ti-2 kodlu metalik

camdır. Yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol sonuçlarına göre metalik camlar $Ti-2 > Ti-3 > Ti-1 > Zr-1 > Zr-2 > Zr-3$ olarak sıralanmaktadır. Yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol sonuçlarına göre incelenen metalik camlar içinde en iyi gama ışını zırh malzemesi Zr-3 kodlu metalik cam iken, en kötüsü Ti-2 kodlu metalik camdır. Yani, herhangi bir gama ışını enerjisini zırhlamak için Zr-3 kodlu metalik camın diğerlerinden daha ince kalınlık kullanılması yeterli olacaktır. Bu da maliyet açısından ayrıca önemlidir.

Gama ışını zırhlama karakteristiklerini belirlemek için incelenen metalik camların etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenliği parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler birbiri ile ilişkili parametrelerdir. Etkin atom numarası kütle azaltma katsayısı ile belirlenebilirken, etkin elektron yoğunluğu ile etkin atom numarası arasında doğrusal bir ilişki vardır. Etkin iletkenlik ise etkin elektron yoğunluğu yardımıyla belirlenmektedir. Etkin atom numarası birden fazla element içeren malzemelerde önemli bir gama ışını zırhlama parametresidir. Bu parametrenin yüksek değerleri malzemenin daha iyi bir gama ışını zırh malzemesi olduğunun göstergesidir. Etkin atom numarası denklem (4.10) ve WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımıyla belirlenmiştir. İncelenen metalik camların kullanılan metotlar ile elde edilen sonuçları Tablo 5.6'da listelenirken, metotların uyumu ve gama ışını enerjisine göre etkin atom numarasının değişimini gözlemleyebilmek için Şekil 5.11 oluşturulmuştur. Ayrıca metalik camların etkin atom numarası sonuçlarını karşılaştırabilmek için WinXCOM programı yardımıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'den de görüldüğü gibi artan gama ışını enerjisi ile etkin atom numarasının azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer parametrelere benzer şekilde Zr-3 kodlu metalik camın en iyi gama ışını zırh malzemesi olduğu ve Ti-2 kodlu metalik camın ise en kötü gama ışını zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir.

Etkin elektron yoğunluğu malzemenin birim kütledeki elektron sayısını belirten bir parametredir ve ne kadar büyük olursa gama ışını zırhlama açısından o kadar iyidir. Etkin elektron yoğunluğu sonuçları denklem (4.11) ve WinXCOM, GEANT4, FLUKA ve MCNP6 metotları yardımıyla hesaplanmıştır. İncelenen metalik camların kullanılan metotlar ile elde edilen etkin elektron yoğunluğu sonuçları Tablo 5.7'da listelenirken, metotların uyumu ve gama ışını enerjisine göre etkin elektron yoğunluğunun değişimini gözlemleyebilmek için Şekil 5.13 oluşturulmuştur. Ayrıca metalik camların etkin elektron

yoğunluğu sonuçlarını karşılaştırabilmek için WinXCOM programı yardımıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14'den de görüldüğü gibi artan gama ışını enerjisi ile etkin atom numarasına benzer şekilde etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının da azaldığı görülmektedir. Bu parametreye göre incelenen metalik camların gama ışını zırlama açısından $Zr-3 < Zr-2 < Zr-1 < Ti-2 < Ti-3 < Ti-1$ olarak sıralanmaktadır. Elektronik cihazlardaki sinyallerin gama ışınları tarafından nasıl etkilendiği gösteren parametrelerden biri olan etkin iletkenlik belirlenen son gama ışını zırlama parametresidir. Bu parametre denklem (4.12) ile hesaplanmıştır ve diğer parametrelerde kullanılan metotlar tercih edilmiştir. Etkin iletkenliğe ait dört farklı metotla belirlenen sonuçlar Tablo 5.8 sunulurken, bu sonuçların görsel gösterimi Şekil 5.15'de görülmektedir. İncelenen metalik camları bu parametre açısından irdelemek için ise Şekil 5.16'da çizilmiştir. Etkin iletkenlik parametresinin de artan enerji ile azaldığı ve en yüksek etkin iletkenliğe sahip metalin camın Zr-1 kodlu numune olduğu gözlemlenmiştir.

İncelenen metalik camların gama ışını zırlama karakteristiklerini incelemek için belirlenen parametrelerin genel olarak artan gama ışını enerjisi ile kütle azaltma katsayısının, lineer azaltma katsayısının, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenliğin azaldığı ve artan gama ışını enerjisi ile yarı ve onda-bir kalınlık değerleri ve ortalama serbest yol parametrelerinin ise arttığı gözlemlenmiştir. İncelenen metalik camlar içinde çoğu kullanışlı parametrelere göre Zr-3 kodlu numunenin diğerlerinden daha iyi bir gama ışını zır malzemesi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan dört fark metodun gama ışını zırlama çalışmalarında güvenilir bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Gama ışını zırlama karakteristiklerinin yanı sıra incelenen metalik camların nötron radyasyonu zırlama kapasiteleri de irdelenmiştir. Nötron radyasyonu zırlama parametrelerinden ilki hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesitidir. Bu parametre numune üzerine gelen hızlı nötronların malzeme ile ilk etkileşime girme ihtimaliyeti ile ilgilidir. Yani numune üzerine gelen ilk hızlı nötronların uzaklaştırılması ile ilgili bir parametredir. Bu parametre metalik cam içindeki elementlerin kısmi yoğunlukları ve kütle uzaklaştırma tesir kesitleri yardımıyla belirlenmiştir. Teorik olarak belirlenen bu parametrenin elde edilmesinde denklem (4.13) kullanılmıştır. İncelenen metalik camlara ait hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları Tablo 5.9'da ve görsel

olarak Şekil 5.17’de sunulmuştur. Tablo 5.9 ve Şekil 5.17’de de görüldüğü gibi hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları $Zr-3 > Zr-2 > Zr-1 > Ti-1 > Ti-3 > Ti-2$ şeklinde sıralanmaktadır. Yani Zr-3 kodlu metalik cam incelenenler içinde en yüksek hızlı nötronlar için etkin uzaklaştırma tesir kesitine sahipken, Ti-2 kodlu metalik camın ise en düşük değere sahiptir. Bu da numune üzerinde gelen hızlı nötronların uzaklaştırılmasında en etkili metalik camın Zr-3 kodlu numune olduğunu göstermektedir.

İncelenen metalik camların nötron radyasyonu zırlama kapasitelerini belirlemek için elde edilen diğer parametreler toplam makroskobik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve 10 mm numune kalınlığında 4,5 MeV enerjiye sahip nötronların metalik camlardan geçen sayısıdır. Bu üç parametre GEANT4 simülasyon kodu ile belirlenmiştir. Bu parametrelerden toplam makroskobik tesir kesiti gelen nötronların malzeme ile hem saçılma hem de soğurma ihtimaliyetleri ile ilgili olduğundan önemli bir parametredir. Ortalama serbest yol ise toplam makroskobik tesir kesiti ile belirlenebilen ve aralarında ters orantı olan bir parametredir. Toplam makroskobik tesir kesitinin büyük değerleri nötron radyasyonu zırlama karakteristikleri açısından önem taşırken ortalama serbest yol parametresinin ise küçük değerleri bu açıdan daha önemlidir. Numuneden geçen nötron sayılarının küçük değerleri de malzemenin daha iyi bir nötron zırh malzemesi olabileceğinin göstergesidir. GEANT4 ile belirlenmiş 10 mm numune kalınlığında ve 4,5 MeV nötron enerjisinde toplam makroskobik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve numuneden geçen nötron sayısı sonuçları Tablo 5.10’da listelenmiştir. İncelenen metalik camların toplam makroskobik tesir kesitleri sonuçları Şekil 5.18’de ve ortalama serbest yol sonuçları ise Şekil 5.19’da görsel olarak sunulmuştur. İlgili tablo ve şekiller incelendiğinde toplam makroskobik tesir kesiti sonuçlarına göre $Ti-2 > Ti-3 > Zr-2 = Ti-1 > Zr-1 > Zr-3$ şeklinde bir sıralama mevcutken ortalama serbest yol parametresine göre ise $Zr-3 > Zr-1 > Zr-2 = Ti-1 > Ti-3 > Ti-2$ şeklinde bir sıralama mevcuttur. Ayrıca belirtilen şartlarda incelenen metalik camlardan geçen nötron sayıları ise $Zr-3 > Zr-2 > Zr-1 > Ti-1 > Ti-3 > Ti-2$ şeklinde bir sıralama vardır. Bu sıralamalar dikkate alındığında 10 mm numune kalınlığında ve 4,5 MeV nötron enerjisinde toplam makroskobik tesir kesiti, ortalama serbest yol ve numuneden geçen nötron sayısı sonuçlarına göre Ti-2 olarak kodlanan metalik camın diğerlerinden daha iyi bir nötron zırh malzemesi olduğu söylenebilir.

Numune kalınlığının nötron radyasyonu zırlama kapasitesine etkisini incelemek için 2 ila 20 mm numune kalınlığı aralığında on farklı kalınlıkta incelenen metalik camlardan

geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımıyla belirlenmiştir. Bu metotlar ile elde edilen metalik camlardan geçen nötron sayıları Tablo 5.11’de listelenirken Şekil 5.20’de FLUKA kodu ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 5.21’de ise GENAT4 ve FLUKA kodlarının karşılaştırılması için metalik camlardan geçen nötron sayılarının numune kalınlığına göre değişim grafikleri sunulmuştur. Tablo 5.11 ve Şekil 5.20 incelendiğinde $Ti-2 < Ti-1 < Ti-3 < Zr-1 < Zr-2 < Zr-3$ şeklinde bir sıralama görülmektedir. Bu sıralamaya göre Ti-2 kodlu metalik camın diğerlerinden daha iyi bir nötron radyasyonu zırh malzemesi olduğu görülürken Zr-3 kodlu metalik camın ise en kötü nötron radyasyonu zırh malzemesi olduğu görülmektedir. Şekil 5.20’den artan metalik cam kalınlığı ile geçen nötron sayılarının lineer olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.21 incelendiğinde ise kullanılan GEANT4 ve FLUKA kodları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

İncelenen metalik camların nötron zırhlama kapasitelerini incelemek için belirlenen son parametre farklı nötron enerjilerinde numuneden geçen nötron sayılarıdır. 0,1 ila 10 MeV nötron enerjisi aralığında yedi farklı enerjide metalik camlardan geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA simülasyon kodları yardımıyla belirlenmiştir. Tablo 5.12’de farklı nötron enerjilerinde metalik camlardan geçen nötron sayıları listelenirken, Şekil 5.22’de ise FLUKA kodu ile elde edilen farklı nötron enerjilerinde metalik camlardan geçen nötron sayılarının değişimi sunulmuştur. Ayrıca Şekil 5.23’de ise metotların karşılaştırılması için elde edilen sonuçların görsel sunumu yapılmıştır. Şekil 5.23’den de görüldüğü gibi GEANT4 ve FLUKA kodları ile elde edilen sonuçlar arasında genel bir uyum vardır. Ayrıca artan nötron enerjisi ile metalik camlardan geçen nötron sayılarının da arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.12’de GEANT4 sonuçları incelendiğinde ise farklı nötron enerjilerinde metalik camlardan geçen nötron sayılarının $Ti-2 < Ti-1 < Ti-3 < Zr-1 < Zr-3 < Zr-2$ olarak sıralandığı gözlemlenmiştir. Yine bu parametreye göre sıralamadan da görüldüğü gibi Ti-2 olarak kodlanan metalik camın diğerlerinden daha iyi bir nötron zırh malzemesi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak incelenen metalik camların gama ve nötron radyasyonları zırhlama parametreleri sonuçları dikkate alındığında Zr-3 kodlu metalik camın en iyi gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu ve Ti-2 kodlu metalik camın ise daha iyi bir nötron radyasyonu zırh malzemesi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan metotların hepsinin birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu veriler öncelikle

gama ve nötron zırlama çalışmalarında metot tercihinde kullanılabilir. Bunun dışında hastanelerin radyolojik bölümlerinde, nükleer santrallerde, radyasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği araştırma laboratuvarlarında ve uzay araştırmalarında kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Abdalla, A. M., Al-Naggar, T. I., Bashiri, A. M., and Alsareii, S. A. (2022). Radiation shielding performance for local granites. *Progress in Nuclear Energy*, 150, 104294.

Abdel Wahab, E. A., Shaaban, K. S., Alomairy, S., and Al-Buriahi, M. S. (2021). Electronegativity and optical basicity of glasses containing Na/Pb/B and their high performance for radiation applications: role of ZrO₂ nanoparticles. *The European Physical Journal Plus*, 136, 1-30.

Abdelghany, Y. A., Kassab, M. M., Radwan, M. M., and Abdel-Latif, M. A. (2022). Borotellurite glass system doped with ZrO₂, potential use for radiation shielding. *Progress in Nuclear Energy*, 149, 104256.

Abou Hussein, E. M., Madbouly, A. M., Eldin, F. E., and ElAlaily, N. A. (2021). Evaluation of physical and radiation shielding properties of Bi₂O₃-B₂O₃ glass doped transition metals ions. *Materials Chemistry and Physics*, 261, 124212.

Agostinelli, S., Allison, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Zschiesche, D., and Geant4 Collaboration (2003). GEANT4-a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506 (3), 250-303.

Akman, F., Durak, R., Turhan, M. F., and Kaçal, M. R. (2015). Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients near the K edge in some samarium compounds. *Applied Radiation and Isotopes*, 101, 107-113.

Akman, F., Kaçal, M. R., Sayyed, M. I., and Karataş, H. A. (2019). Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 315-322.

Akyildirim, H., Kavaz, E., El-Agawany, F. I., Yousef, E., and Rammah, Y. S. (2020). Radiation shielding features of zirconolite silicate glasses using XCOM and FLUKA simulation code. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 545, 120245.

Al-Hadeethi, Y., and Sayyed, M. I. (2019). Analysis of borosilicate glasses doped with heavy metal oxides for gamma radiation shielding application using Geant4 simulation code. *Ceramics International*, 45(18), 24858-24864.

Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I., and Al-Buriahi, M. S. (2020). Bioactive glasses doped with TiO₂ and their potential use in radiation shielding applications. *Ceramics International*, 46(10), 14721-14732.

Almuqrin, A. H., Sayyed, M. I., Jecong, J. F. M., Kumar, A., AlShammari, M. M., and Albarzan, B. (2021). SrO-SiO₂-B₂O₃-ZrO₂ glass system: Effects of varying SrO and BaO compositions to physical and optical properties, and radiation shielding using EPDL2017 photoatomic library. *Optik*, 245, 167670.

Alzahrani, J. S., Alothman, M. A., Eke, C., Al-Ghamdi, H., Aloraini, D. A., and Al-Buriahi, M. S. (2021). Simulating the radiation shielding properties of TeO₂-Na₂O-TiO glass system using PHITS Monte Carlo code. *Computational Materials Science*, 196, 110566.

Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., Mairani, A., Sala, P. R., Smirnov, G., and Vlachoudis, V. (2014). The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear Data Sheets*, 120, 211-214.

Choi-Yim, H., Conner, R. D., Szuecs, F., and Johnson, W. L. (2002). Processing, microstructure and properties of ductile metal particulate reinforced Zr₅₇Nb₅Al₁₀Cu_{15.4}Ni_{12.6} bulk metallic glass composites. *Acta Materialia*, 50(10), 2737-2745.

El-Rehim, A. A., Zahran, H. Y., Yahia, I. S., Wahab, E. A., and Shaaban, K. S. (2021). Structural, elastic moduli, and radiation shielding of SiO₂-TiO₂-La₂O₃-Na₂O glasses containing Y₂O₃. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 1872-1884.

Erkoyuncu, İ., Akman, F., Ogul, H., Kaçal, M. R., Polat, H., Demirkol, I., Dilsiz, K. ve Ertuğral, B. (2023). A detailed investigation of gamma and neutron shielding capabilities of ternary composites doped with polyacrylonitrile and gadolinium (III) sulfate. *Applied Radiation and Isotopes*, 196, 110789.

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., and Levring, H. (2004). WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation physics and chemistry*, 71(3-4), 653-654.

Ghrib, T., Mhareb, M. H. A., Sayyed, M. I., Alajerami, Y. S. M., Dwaikat, N., Ali, A. B., and Gondal, M. A. (2021). Structural, optical and radiation shielding properties of zirconium–titanium–thallium ternary oxide (0.5ZrO₂-(0.5-x)TiO₂-xTl₂O₃). *Ceramics International*, 47(15), 21837-21847.

Goorley, J. T., James, M. R., Booth, T. E., Brown, F. B., Bull, J. S., Cox, L. J., Durkee, J., Elson, J., Fensin, M., Forster, R. A., Hendricks, J., Hughes, H. G., Johns, R., Kiedrowski, B., Martz, R., Mashnik, S., Mckinney, G., Pelowitz, D., Prael, R., Sweezy, J.,

Waters, L., Wilcox, T., and Zukaitis, A. J. (2013). *Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0*(No.LA-UR-13-22934). Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).

Guo, F., Wang, H. J., Poon, S. J., and Shiflet, G. J. (2005). Ductile titanium-based glassy alloy ingots. *Applied Physics Letters*, 86(9), 091907.

Hamad, M. K., Sayyed, M. I., Mhareb, M. H. A., Sadeq, M. S., Dwaikat, N., Almessiere, M. A., and Ziq, K. A. (2022). Effects of TiO₂, V₂O₅, MnO₂ and Tl₂O₃ on structural, physical, optical and ionizing radiation shielding properties of strontium boro-tellurite glass: An experimental study. *Optical Materials*, 127, 112350.

Han, I., and Demir, L. (2009). Mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers of Ti and Ni alloys. *Radiation Measurements*, 44(3), 289-294.

Hussein, K. I., Alqahtani, M. S., Alzahrani, K. J., Alqahtani, F. F., Zahran, H. Y., Alshehri, A. M., Yahia, I. S., Reben, M., and Yousef, E. S. (2022). The Effect of ZnO, MgO, TiO₂, and Na₂O Modifiers on the Physical, Optical, and Radiation Shielding Properties of a TeTaNb Glass System. *Materials*, 15(5), 1844.

Kaçal, M. R., Akman, F., Sayyed, M. I., and Akman, F. (2019). Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 818-824.

Kassab, M. M. (2022). Effect of chromium contents on radiation shielding and macroscopic cross-section in steel alloys. *Applied Radiation and Isotopes*, 186, 110263.

Kavaz, E., Tekin, H. O., Zakaly, H. M. H., Issa, S. A. M., Kara, U., Al-Buriahi, M. S., Salah, S., Matori, K. A., and Zaid, M. H. M. (2022). Structural and Gamma-Ray Attenuation Properties of Different Resin Composites for Radiation Shielding Applications. *Brazilian Journal of Physics*, 52(5), 157.

Khobkham, C., Limkitjaroenporn, P., Shimada, K., Kaewkhao, J., and Chaiphaksa, W. (2018). Photon interaction behavior of zirconium alloy materials. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), 14928-14932.

Khong, J. C., Daisenberger, D., Burca, G., Kockelmann, W., Tremsin, A. S., and Mi, J. (2016). Design and characterisation of metallic glassy alloys of high neutron shielding capability. *Scientific reports*, 6(1), 1-10.

Lakshminarayana, G., Kumar, A., Dong, M. G., Sayyed, M. I., Long, N. V., and Mahdi, M. A. (2018). Exploration of gamma radiation shielding features for titanate bismuth borotellurite glasses using relevant software program and Monte Carlo simulation code. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, 65-73.

Lu, J., Ravichandran, G., and Johnson, W. L. (2003). Deformation behavior of the $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ bulk metallic glass over a wide range of strain-rates and temperatures. *Acta Materialia*, 51(12), 3429-3443.

Mahmoud, K. H., Elsayed, K. A., Wahab, E. A., Abdel-Rahim, F. M., and Shaaban, K. S. (2021). Structural and radiation shielding simulation of $B_2O_3-SiO_2-LiF-ZnO-TiO_2$ glasses. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 16182-16193.

Medjahed, A., Moula, H., Zegaoui, A., Derradji, M., Henniche, A., Wu, R., Hou, L., Zhang, J., and Zhang, M. (2018). Influence of the rolling direction on the microstructure, mechanical, anisotropy and gamma rays shielding properties of an Al-Cu-Li-Mg-X alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 732, 129-137.

Mhareb, M. H. A., Alqahtani, M., Alajerami, Y. S. M., Alshahri, F., Sayyed, M. I., Mahmoud, K. A., Saleh, N., Alonizan, N., Al-Buriah, M. S., and Kaky, K. M. (2021). Ionizing radiation shielding features for titanium borosilicate glass modified with different concentrations of barium oxide. *Materials Chemistry and Physics*, 272, 125047.

Olarinoye, O., and Oche, C. (2021). Gamma-Ray and Fast Neutron Shielding Parameters of Two New Titanium-Based Bulk Metallic Glasses. *Iranian Journal of Medical Physics*, 18(2).

Park, J. M., Wang, G., Pauly, S., Mattern, N., Kim, D. H., and Eckert, J. (2011). Ductile Ti-based bulk metallic glasses with high specific strength. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42, 1456-1462.

Park, S. S., Wie, Y., and Jin, X. L. (2018). Direct laser assisted machining with a sapphire tool for bulk metallic glass. *CIRP Annals*, 67(1), 193-196.

Perişanoğlu, U. (2019). Assessment of nuclear shielding and alpha/proton mass stopping power properties of various metallic glasses. *Applied Physics A*, 125(11), 801.

Rammah, Y. S., Hussein, E. A., Abdel-Hafez, S. H., Olarinoye, I. O., Gamal, A., El-Agawany, F. I., and Shams, M. S. (2022). Ionizing radiation shielding efficiency and elastic properties of zirconium/cobalt/nickel/vanadium lithium borotellurite glasses. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 58(3), 747-756.

Sayyed, M. I., Hamad, M. K., Abu Mhareb, M. H., Naseer, K. A., Mahmoud, K. A., Khandaker, M. U., Osman, H., and Elesawy, B. H. (2021). Impact of modifier oxides on mechanical and radiation shielding properties of $B_2O_3-SrO-TeO_2-RO$ glasses (where $RO = TiO_2, ZnO, BaO,$ and PbO). *Applied Sciences*, 11(22), 10904.

Seenappa, L., Manjunatha, H. C., Chandrika, B. M., Sridhar, K. N., and Hanumantharayappa, C. (2018). Gamma, X-ray and neutron interaction parameters of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, 150, 199-206.

Shaaban, K. S., Boukhris, I., Kebaili, I., and Al-Buriahi, M. S. (2021). Spectroscopic and attenuation shielding studies on B_2O_3 - SiO_2 - LiF - ZnO - TiO_2 glasses. *Silicon*, 1-10.

Singh, G. P., Singh, J., Kaur, P., Singh, T., Kaur, R., Kaur, S., and Singh, D. P. (2021). Impact of TiO_2 on radiation shielding competencies and structural, physical and optical properties of CeO_2 - PbO - B_2O_3 glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 885, 160939.

Sirin, M. (2020). The effect of titanium (Ti) additive on radiation shielding efficiency of Al25Zn alloy. *Progress in nuclear energy*, 128, 103470.

Tamam, N., Alrowaili, Z. A., Elqahtani, Z. M., Somaily, H. H., Alwadai, N., Sriwunkum, C., Olarinoye, I. O., and Al-Buriahi, M. S. (2022). Significant influence of Cu content on the radiation shielding properties of Ge-Se-Te bulk glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 193, 109981.

Tang, M. Q., Zhang, H. F., Zhu, Z. E. A., Fu, H. M., Wang, A. M., Li, H., and Hu, Z. Q. (2010). TiZr-base bulk metallic glass with over 50 mm in diameter. *Journal of Materials Science & Technology*, 26(6), 481-486.

Taşgın, Y. (2021). Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Different Titanium Alloys for Gamma Radiation Properties and Implant Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(8), 6203-6223.

Tekin, H. O., AlMisned, G., Susoy, G., Zakaly, H. M., Issa, S. A., Kilic, G., Rammah, Y. S., Lakshminarayana, G., and Ene, A. (2022). A detailed investigation on highly dense CuZr bulk metallic glasses for shielding purposes. *Open Chemistry*, 20(1), 69-80.

Weisstein, E. W. (2014). Radiation. Eric Weisstein's World of Physics. Wolfram Research. Retrieved, 11.