

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



PLA FİLAMANTİNİN GAMA VE NÖTRON RADYASYONU
ZIRHLAMA KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI VE
GELİŞTİRİLMESİ

HATİCE YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. HASAN OĞUL

SİNOP- 2023

TEZ KABUL

Hatice YILDIZ tarafından hazırlanan “**PLA PLAMENTİNİN GAMA VE NÖTRON RADYASYONU ZIRHLAMA KABİLİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı bu çalışma, 10.10.2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan	Prof. Dr. Meryem SEFERİNOĞLU Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	İmza
---------------	---	------

Üye (Danışman)	Doç. Dr. Hasan OĞUL Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	İmza
---------------------------	--	------

Üye	Doç. Dr. Ferdi AKMAN Bingöl Üniversitesi/ Bingöl Sosyal Bilimler Meslek Yüksek Okulu	İmza
------------	--	------

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. Fadime DİRİK	İmza
----------------	------------------------	------

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hatice YILDIZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLA FİLAMENTİNİN GAMA VE NÖTRON RADYASYONU ZIRHLAMA KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ

HATİCE YILDIZ

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN:DOÇ. DR. HASAN OĞUL

Radyasyon, birçok uygulamada avantajlı olsa da, insanlar ve çevre için risk oluşturmakta ve kurşun gibi koruyucu malzemelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışmasında, 3D yazıcılarda kullanılan Polilaktik Asit (PLA) filamentinin gama ve nötron radyasyonuna karşı alternatif bir zırh malzemesi olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. PLA'nın, Er_2O_3 ve Gd_2O_3 metal tozları ile farklı oranlarda (%5, %10 ve %20) katkılanması sonrasında çeşitli gama radyasyon kaynakları kullanılarak radyasyon zırhlama kabiliyetleri incelenmiştir. Katkılı kompozitlerin yapısı ve homojenliği SEM ve EDS kullanılarak analiz edilmiştir. Lineer zayıflama katsayısı ve yarı değer kalınlığı gibi çeşitli parametreler hem deneysel olarak hem de GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları aracılığıyla hesaplanmıştır. Bulgular, %20 Gd_2O_3 katkılı PLA'nın özellikle düşük enerjilerde üstün gama radyasyonu zırhlama kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca nötron radyasyonuna karşı PLA filamentinin zırhlama kabiliyetinin söz konusu metal tozları ile katkılандığında azaldığı tespit edilmiştir. GEANT4 ve FLUKA ile gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde elde edilen bulgular da katkılamanın numunelerin hızlı nötronlara karşı gösterdiği zırhlama etkinliğini artırmadığını doğrulamaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Polilaktik asit; Polimer; Radyasyon zırhlama; 3D yazıcı

Ekim 2023 121 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF GAMMA AND NEUTRON RADIATION SHIELDING CAPABILITY OF PLA FILAMENT

HATİCE YILDIZ

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF NUCLEAR ENERGY ENGINEERING**

SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. HASAN OĞUL

Radiation, although advantageous in many applications, poses a risk to humans and the environment and requires the use of protective materials such as lead. In this thesis, the potential usage of Polylactic Acid (PLA) filament as an alternative shielding material against gamma and neutron radiation was studied. PLA was doped with Er_2O_3 and Gd_2O_3 metal powders at different ratios (5%, 10% and 20%) and their radiation shielding capabilities were investigated using various gamma radiation sources. The structure and homogeneity of the doped composites were analyzed using SEM and EDS. Various parameters such as linear attenuation coefficient and half-value thickness were calculated both experimentally and through GEANT4 and FLUKA simulation programs. The findings show that PLA doped with 20% Gd_2O_3 has superior gamma radiation shielding capability, especially at low energies. It was also found that the shielding ability of PLA filament against neutron radiation decreases when doped with these metal powders. Calculations with GEANT4 and FLUKA also confirm that doping does not increase the shielding efficiency of the samples against fast neutrons.

KEYWORDS:Polylactic acid; Polymer; Radiation shielding; 3D printing

October 2023, 121 Page

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında katkıda bulunan herkese içten teşekkürlerimi sunarım. Öncelikle, bana bu süreçte rehberlik eden danışman hocam Doç Dr. Hasan OĞUL’a eşsiz bilgisi, sabrı ve yönlendirmesi için teşekkür ederim.

Araştırmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi ve Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezi çalışanları ve öğretim üyelerine, özellikle de Dr. Fatih BULUT’a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca jüride değerli vaktini ayırarak yorumlarıyla ve düzeltmeleriyle tez çalışmasına katkıda bulunan Prof. Dr. Meryem SEFERİNOĞLU ve Doç. Dr. Ferdi AKMAN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin hazırlık sürecindeki moral ve motivasyon destekleri için aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler. Aynı zamanda bu tez çalışmasında 122M736 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz

Bu tez çalışması Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından sağlanan Marie Skłodowska- Curie Fellowship programı tarafından desteklenmiştir.

Son olarak, bu süre zarfında bana her konuda yardımcı olan Burak HASBOLAT’a teşekkür ederim.

Hatice YILDIZ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİN	xiii
1. GİRİŞ.....	14
2. GENEL BİLGİLER.....	18
2.1. Radyasyon Kavramı ve Radyasyon Tipleri	18
2.1.1. Gama ve nötron radyasyonuna giriş	19
2.1.2. Gama ve nötron radyasyonunun madde ile etkileşimi.....	20
2.2. Radyasyondan Korunma Konsepti	24
2.2.1. Radyasyondan korunmada kullanılan güncel malzemeler.....	27
2.2.2. Radyasyondan korunmada polimerlerin rolü.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. PLA Filamenti ve Polimerlerin Genel Özellikleri	31
3.2. PLA Filamentlerinin Üretimi	33
3.2.1. PLA'nın radyasyon zırhlama uygulaması	35
3.2.2. Katkılı PLA filamentinde kullanılan maddeler	35
3.2.3. PLA Filamentlerinin karakterizasyonu ve karşılaşılan zorluklar.....	36
3.3. Deneysel Çalışmalar	37
3.3.1. Numunelerin hazırlanması	37
3.3.2. SEM ve EDS analizlerinin yapılması	44
3.3.3. Zırhlama özelliklerinin belirlenmesi.....	45
3.4. Simülasyon Çalışmaları	47
3.4.1. Monte Carlo kodları ve deterministik hesaplama araçları kullanımı.....	48
3.4.2. Simülasyon çalışmalarının araştırmadaki rolü ve önemi	55
4. BULGULAR.....	57
4.1. SEM ve EDS Analizleri	58

4.2.	Gama Zırhlama	61
4.2.1.	Lineer zayıflatma katsayısı	61
4.2.2.	Kütle zayıflatma katsayısı.....	66
4.2.3.	Yarı değer kalınlığı.....	70
4.2.4.	Ortalama serbest yol	74
4.2.5.	Z_{etk} ve N_e	76
4.2.6.	Teorik yığılma faktörü	79
4.2.7.	Radyasyon koruma verimliliği.....	90
4.3.	Nötron Zırhlamasına Ait Bulgular	99
5.	SONUÇ VE TARTIŞMA	109
	KAYNAKLAR.....	116
	ÖZGEÇMİŞ	121

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 PLA'nın ayrıntılı özellikleri	32
Tablo 3.2 Kompozit malzemenin yüzde katkı oranları	39
Tablo 3.3 ERNAM'da kullanılan ekstrüder makinasının özellikleri.....	40
Tablo 3.4 Arşimet tekniği kullanılarak ölçülen yoğunluk sonuçları	44
Tablo 3.5 HPGe dedektörünün detaylı teknik özellikleri	47
Tablo 3.6 Kompozit malzemelerin içerdiği elementlerin yüzdeleri	52
Tablo 4.1 3D baskı yöntemi ile elde edilen numunelerin EDS analizleri	60
Tablo 4.2 PLA-0 ve PLA-Er5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları	62
Tablo 4.3 PLA-Er10 ve PLA-Gd5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları.....	63
Tablo 4.4 PLA-Gd10 ve PLA-Er10Gd5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları...	64
Tablo 4.5 PLA-Gd20 numunesinin lineer zayıflatma katsayıları.....	65
Tablo 4.6 Numunelerin deneysel olarak lineer zayıflatma katsayıları	65
Tablo 4.7 PLA-0 ve PLA-Er5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları.....	66
Tablo 4.8 PLA-Er10 ve PLA-Gd5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları.....	67
Tablo 4.9 PLA-Gd10 ve PLA-Er10Gd5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları....	67
Tablo 4.10 PLA-Gd20 numunesinin kütle zayıflatma katsayısı.....	68
Tablo 4.11 Numunelerin deneysel olarak lineer zayıflatma katsayıları	68
Tablo 4.12 PLA-0 ve PLA-Er5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları	71
Tablo 4.13 PLA-Er10 ve PLA-Gd5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları.....	71
Tablo 4.14 PLA-Gd10 ve PLA-Er10Gd5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları	72
Tablo 4.15 PLA-Gd20 numunesinin yarı değer kalınlığı.....	72
Tablo 4.16 P-PLA-0 ve P-PLA-Er5 numunelerine ait ortalama serbest yolları	74
Tablo 4.17 P-PLA-Er10 ve P-PLA-Gd5 numunelerinin ortalama serbest yolları	75
Tablo 4.18 P-PLA-Gd10 ve P-PLA-Er10Gd5 numunelerinin ortalama serbest yolları	75
Tablo 4.19 P-PLA-Gd20 numunesinin ortalama serbest yolları	76

Tablo 4.20 Z_{etk} değerine ait teorik sonuçlar	77
Tablo 4.21 Etkin Elektron Yoğunluğuna ait teorik sonuçlar	78
Tablo 4.22 1 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	80
Tablo 4.23 5 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	81
Tablo 4.24 10 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	82
Tablo 4.25 40 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	83
Tablo 4.26 1 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü.....	85
Tablo 4.27 5 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	86
Tablo 4.28 10 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	87
Tablo 4.29 40 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü	88
Tablo 4.30 59,5 ve 661,6 keV enerjilerde RKV sonuçları (GEANT4).....	91
Tablo 4.31 356 ve 1332,5 keV enerjilerde RKV sonuçları (GEANT4).....	92
Tablo 4.32 59,5 ve 661,6 keV enerjilerde RKV sonuçları (FLUKA)	93
Tablo 4.33 356 ve 1332,5 keV enerjilerde RKV sonuçları (FLUKA)	94
Tablo 4.34 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ve P-PLA-Gd20 RKV değerleri.....	96
Tablo 4.35 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ile 1 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV değerleri	96
Tablo 4.36 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ile 2 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV değerleri	96
Tablo 4.37 Numunelerin uzaklaştırma tesir kesiti ve diğer parametreleri	100
Tablo 4.38 Parafin ve sıradan betonun uzaklaştırma tesir kesitleri.....	101
Tablo 4.39 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri	102
Tablo 4.40 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri	103
Tablo 4.41 Nötron transmisyon değeri.....	106
Tablo 4.42 Nötron transmisyon değeri	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Radyasyon türleri.	19
Şekil 2.2 γ radyasyonunun madde ile etkileşim süreçlerinin gösterimi	23
Şekil 2.3 ALARA prensibinin 3 temel uygulaması	24
Şekil 2.4 Gama radyasyonu için üstel transmisyon eğrisi.	25
Şekil 2.5 Farklı radyasyon tipleri için yaygın olarak kullanılan zırh malzemeleri	27
Şekil 3.1 PLA'nın kimyasal yapısı	31
Şekil 3.2 Ekstrüzyon tekniğinin şematize edilmiş hali	34
Şekil 3.3 Üretimi gerçekleştirilen saf PLA filamenti	34
Şekil 3.4 PLA granülleri ve nano boyuttaki Er_2O_3 tartımı	38
Şekil 3.5 1) Er_2O_3 ve 2) Gd_2O_3 nano boyutta metal tozu	38
Şekil 3.6 Çift vidalı ekstrüder cihaz resmi	40
Şekil 3.7 Filamentlerin üretim aşamaları.....	41
Şekil 3.8 3D yazıcı için üretilen Gd_2O_3 ve Er_2O_3 katkılı filamentler	42
Şekil 3.9 3D yazıcı ile üretilen numuneler	43
Şekil 3.10 Gelen ışının madde ile etkileşimi	46
Şekil 3.11 HPGe dedektörü düzeneği	47
Şekil 3.12 EpiXS programının arayüz görüntüsü	50
Şekil 3.13 WinXCOM programının arayüz görüntüsü.....	51
Şekil 3.14 FLUKA/Flair programının ara yüzü ve input dosyasının görünümü	53
Şekil 3.15 GEANT4 DedectorConstruction.cc dosyasında tanımlanan elementler	54
Şekil 4.1 PLA-0 numunesine ait SEM görüntüsü.....	58
Şekil 4.2 3D baskı yöntemi ile üretilen katkılı PLA numunelerin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 4.3 1) PLA-Er5 ve 2) PLA-Gd5 element dağılımı	60
Şekil 4.4 P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10 numunelerinin MAC grafikleri.....	69

Şekil 4.5 P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin MAC grafikleri	70
Şekil 4.6 P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10 numunelerinin YDK grafikleri	73
Şekil 4.7 P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin YDK grafikleri	73
Şekil 4.8 Z_{etk} sonuçlarının 356-661,6 keV değeri arası yakınlaştırılmış grafik.....	77
Şekil 4.9 Z_{etk} sonuçlarının 1173,2-1332,5 keV değeri arası yakınlaştırılmış grafik.....	78
Şekil 4.10 Etkin elektron yoğunluğu sonucuna ait grafik	79
Şekil 4.11 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (enerji soğurma) karşılaştırmaları grafiği	84
Şekil 4.12 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (maruz kalma) karşılaştırmaları grafiği	89
Şekil 4.13 GEANT4 programı ile 59,5 keV, 661,6 keV, 356,0 keV ve 1332,5 keV gama enerjilerinde RKV değerlerinin hesaplanması sonucunda elde edilen grafikler	95
Şekil 4.14 FLUKA programı ile 59,5 keV, 661,6 keV, 356,0 keV ve 1332,5 keV gama enerjilerinde RKV grafikleri	95
Şekil 4.15 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ve P-PLA-Gd20 RKV değerleri grafiği	97
Şekil 4.16 0,5 mm kalınlıkta kurşun ve 1 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV grafiği.....	98
Şekil 4.17 0,5 mm kalınlıkta kurşun ve 2 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV grafiği.....	98
Şekil 4.18 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki nötron transmisyon değerleri.....	104
Şekil 4.19 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki nötron transmisyon değerleri.....	105
Şekil 4.20 10 mm kalınlıktaki numuneler için farklı enerjilerde transmisyon değerinin grafiği.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİN

ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
Er	: Erbiyum
Er₂O₃	: Erbiyum oksit
Gd	: Gadolinyum
Gd₂O₃	: Gadolinyum oksit
HPGe	: Yüksek Saflıkta Germanyum
LAC, μ	: Lineer zayıflatma katsayısı
MAC, μ/ρ	: Kütle zayıflatma katsayısı
MFP	: Ortalama serbest yol
ESYF	: Enerji Soğurma Yığılma Faktörü
MYF	: Maruziyet Yığılma Faktörü
N_e	: Etkin elektron yoğunluğu
PLA	: Polilaktik asit
RKV	: Radyasyon koruma verimliliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
YDK	: Yarı değer kalınlığı
Z_{etk}	: Etkin atom numarası
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
eV	: Elektron volt
MeV	: Milyon elektron volt
ρ	: Yoğunluk

1. GİRİŞ

Evrenin doğuşundan bu yana var olan bir gerçeklik olan radyasyon, çok yönlü etkileri nedeniyle sayısız araştırmanın odak noktası olmuştur. Radyasyon parçacık ya da dalga şeklinde enerji yayılımını ifade etmektedir. Radyasyon kelimesi çağdaş toplumda genellikle nükleer reaktörleri veya gündelik hayatta sıklıkla karşılaşılan tıbbi görüntüleme tekniklerini çağrışırsa da radyasyonun faydası ve etkisi bu alanların çok ötesine uzanmaktadır. Örneğin yiyeceklerin raf ömrünü uzatabilmek için zararlı mikroorganizmaların önlenmesi, tarım sektöründe mahsullerin böceklenmesinin önüne geçilebilmesi gibi radyasyonun faydalı pek çok kullanım alanı mevcuttur (Kaya İ. S., 2012)

Radyasyon iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana sınıfta incelenmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon türlerinden olan gama (γ) ve nötron radyasyonunun malzemede ya da havada kat ettiği mesafenin diğer radyasyon türlerine göre çok daha fazla olması insan ve çevrenin bu radyasyon türlerinin zararlı etkilerinden korunmasını gerektirmektedir. Radyasyonun olumsuz etkilerinin önüne geçebilmek için literatürde üç önemli kriter öne çıkmaktadır Bunlar zaman, mesafe ve zırh olarak ifade edilmektedir (Kim, 2018). Bu tez çalışmasında, bahsi geçen üç kriterden zırh uygulaması üzerinde durularak radyasyonun istenmeyen etkilerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Nükleer tekniklerin uygulama alanlarında gama ve nötron radyasyonlarının avantajlarından yararlanmak ve risklerini azaltmak arasındaki hassas dengenin sağlanması radyasyonun farklı malzemelerle etkileşim mekanizmalarının anlaşılmasına bağlıdır. Dolayısıyla, zırh malzemesi olabilecek maddelerin radyasyon ile etkileşim mekanizmalarının incelenmesi son derece önemlidir (Hamad, 2021).

Literatürde radyasyonun zararlı etkilerini azaltmak veya tamamen engellemek amacıyla birçok malzeme araştırılmış ve kullanılmıştır. Bu malzemelerden kurşun yaygın olarak kullanılan radyasyondan korunma malzemesidir (AbuAlRoos, 2019). Kurşuna ek olarak, cam (Kavaz, 2019), alaşım (Alshahrani, 2021), polimer (Nambiar, 2012; Saiyad, 2014), beton (Ardiansyah, 2023; Zeyad, 2022) gibi malzemeler radyasyon zırh malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Bu malzemeler kullanım alanlarına, kullanılacak radyasyon türüne ve enerjilerine göre değişiklik göstermektedir. Bu zırh malzemelerinden herhangi birinin diğerinden daha iyi olduğunu ifade etmek yanlış olur çünkü her birinin kendisine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin beton korozyon direnci zayıf bir

malzeme olması sebebiyle nemli bir ortam için iyi bir seçim değildir. Diğer bir yandan polimer malzeme ise kimyasal çözücülerin bulunduğu bir ortamda bozunma ihtimali bulunmaktadır. Bundan dolayı radyasyon zırhlama uygulamalarında ihtiyaca yönelik malzeme seçimi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında çalışma alanı olarak medikal uygulamalar seçilmiştir.

Sürdürülebilirlik ve çevre bilimindeki ilerlemelerin etkisiyle, odak noktası sadece koruma sağlamakla kalmayıp aynı zamanda çevre dostu ve çok yönlü olan malzemelere yönelmiştir. Sürdürülebilir bir polimer olan Polilaktik Asit (PLA), kurşun gibi geleneksel koruyucu malzemelere kıyasla umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Kurşun, radyasyondan korunmak için uzun süredir tercih edilen bir malzeme olsa da önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlarından toksisitesi çevresel riskler oluşturmakta ve insan sağlığını etkilemekte, ayrıca ağırlığı ve esnek olmaması ise çeşitli uygulama alanlarındaki kullanım çeşitliliğini sınırlamaktadır.

Radyasyon teknolojileri ilerledikçe, etkinliği sürdürülebilirlikle birleştiren yenilikçi zırh malzemelerine duyulan ihtiyaç daha da önem kazanmaktadır. Tez çalışması kapsamında da değerlendirilen polimer kompozit malzemelerin radyasyon zırh malzemesi olarak kullanımı söz konusu ihtiyaca istinaden son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir.

Al-Sarray vd. (2017), bu araştırma alanındaki girişimlerden birinde, epoksideki değişen barit konsantrasyonlarının etkilerini araştırmıştır. Yaptıkları deneysel tasarım %0 ila %50 barit konsantrasyonu arasında değişim göstermektedir. Barit konsantrasyonu ile elde edilen kompozitlerin lineer zayıflama katsayıları arasında doğrudan bir ilişki bulmaları dikkat çekmektedir. Atta vd. (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada Stiren-bütadien kauçuk (SBR-1502) /montmorillonit nano kompozitlerinin sentezine yönelinmiştir. Bahsi geçen kompozit, ferrik oksit (Fe_2O_3), çinko oksit (ZnO), molibden oksit (MoO) ve titanyum dioksit (TiO_2) gibi çoklu oksitlerin kullanılmasıyla desteklenmiştir. Bunlar arasında Stiren-bütadien kauçuk/molibden oksit (SBR/ MoO) kompoziti en iyi sonucu veren gama radyasyonu zırhı olarak ortaya çıkmış ve özellikle nükleer tıp uygulamalarına uygunluğu vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada, Gwaily (2002) farklı bir yol izleyerek doğal kauçuk (NR) ve stiren-bütadien kauçuğu (SBR-1502) farklı konsantrasyonlarda kurşun ile katkılanmıştır. Gama radyasyon kaynağı olarak ^{137}Cs kullanılan çalışmada, lineer zayıflama katsayısının (μ) artan katkı maddesi içeriğiyle birlikte belirgin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, kauçuk kompozitlerin

radasyon zırlama özelliklerinin geliştirilmesinde etkili bir katkı maddesi olarak kurşunun sağladığı faydanın altını çizmektedir.

Bu tez çalışması konusu olan 3D yazıcı malzemeleri üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, Ceh (2017) her biri 1,2 ila 2,7 g/cm³ arasında değişen farklı bizmut konsantrasyonları içeren çoklu ABS (akrilonitril bütadien stiren) varyasyonları üretmiştir. Bizmut konsantrasyonundaki artışla orantılı olarak gama radyasyonu zayıflatma davranışında bir artış gözlemleyerek bizmutun güvenilir bir katkı maddesi olma potansiyeline işaret etmişlerdir. Ek olarak Wu vd. (2020) tarafından üretilen polieter-eterketon/tungsten kompozitleri ve Muthamma vd. (2019) tarafından raporlanan poli (vinil alkol)-bizmut oksit kompozitleri çalışmaları literatürde öne çıkmaktadır. Her iki araştırmada da X-ışını ve gama radyasyonuna karşı zırlama uygulamalarını inceleyerek radyasyondan korunma alanında 3D baskılı kompozitlerin çok yönlülüğüne ve potansiyeline odaklanmıştır.

Bu tez çalışmasının odak noktası olan PLA, doğası gereği çevre dostu olmasının yanı sıra radyasyon zırlama yeteneklerini artırmak için yüksek yoğunluklu malzemelerle de katkılanabilmektedir (Niksarlıoğlu, 2023). Bu kapsamda, Yıldırım ve Oral (2018) gerçekleştirdikleri çalışmada döküm yöntemiyle PLA içerisine farklı zeolit konsantrasyonlarında (%3 ila %7) katkılayarak, radyasyondan korunma etkinliğinde bir artış olduğunu fark etmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada Adliené vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, tungsten ve tantal katkılı polimer kompozit malzemenin X ışınlarına karşı zırlama etkinliği incelenmiştir. Araştırma, malzemenin 50 keV ile 150 keV arasındaki radyasyonu başarılı bir şekilde engellediğini ve kurşuna alternatif olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Literatürde 3D yazıcı kullanılarak PLA polimeri üzerine yapılan radyasyon zırlama çalışmaları oldukça sınırlıdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi literatür detaylı bir şekilde incelendiğinde 3D yazıcıların polimer malzeme kullanarak radyasyon zırlama alanında kullanımı oldukça özgün ve yeni bir yöntemdir. Bundan dolayı bu tez çalışmasının temel amacı, Er₂O₃ ve Gd₂O₃ katkılı PLA'nın radyasyondan korunma alanındaki potansiyelini araştırarak, kurşun gibi malzemelerin geleneksel hakimiyetine karşı alternatif bir radyasyon zırlı geliştirebilmektir. Elde edilen bulguların katkısız PLA polimeri ile kıyaslanarak nicel bir şekilde, katkılamanın radyasyon zırlama üzerindeki etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda hem PLA hem de katkılanmış türevleri radyasyon zırlama kabiliyetleri açısından deneyler sistemleri, teorik hesaplamalar ve Monte Carlo

simülasyonları kullanarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda katkısız PLA ve katkılı PLA kompozitleri çift vidalı filament ekstrüder kullanarak filament formuna getirilmiş ve 3D yazıcılar aracılığıyla zırhlama numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler için başarı ölçütü olarak homojenlikleri ifade edilebilmektedir. Bu kapsamda radyasyon zırhlama çalışmalarına geçmeden önce üretilen numunelerin yapısal karakterizasyonları SEM ve EDS analizleri ile yapılmıştır. Daha sonra HPGe dedektör sistemi, WinXCOM / EpiXS teorik hesaplamaları ve GEANT4/ FLUKA simülasyon programları kullanılarak geniş bir gama radyasyon enerji (59,5 keV – 1332,5 keV) aralığında üretilen numunelerin gama radyasyon zırhlama değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Diğer bir yandan üretilen numunelerin nötron zırhlama kabiliyetleri hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve GEANT4/ FLUKA hesaplamaları ile belirlenmiştir.

Bu tez çalışması, gama ve nötron radyasyonuna odaklanmış olmasına rağmen temel radyasyon kavramlarının ayrıntılı bir incelemesini sunan kapsamlı bir “Genel Bilgiler” bölümü ile başlamaktadır. Daha sonra, radyasyondan koruma kavramı, günümüzde sıklıkla kullanılan radyasyon zırhlama malzemeleri ve polimerlerin rolü üzerinde de durulmaktadır. “Materyal ve Yöntemler” bölümünde, PLA filamentinin genel özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmekte ve üretim süreci açıklanmaktadır. Bu bölüm aynı zamanda saf ve katkılı PLA’nın radyasyon zırhlama etkinliğini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon çalışmalarına da detaylı bir bakış sunmaktadır. “Bulgular” bölümünde ise gerçekleştirilen deneysel, teorik ve simülasyon çalışmalarının sonuçları aktarılmaktadır. Tez çalışmasının sonunda yer alan “Sonuç ve Tartışma” bölümü ise ana bulguları, bunların çıkarımlarını ve gelecekteki potansiyel araştırma konularına değinilmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölüm, tez çalışmasının temelini oluşturan teorik kavramlara genel bir bakış sunmaktadır. Amaç, çalışmanın metodolojisinin ve ardından gelen analizin üzerine inşa edildiği sağlam bir temel kurmaktır. Bu bilgiler, sonraki bölümlerde araştırmanın deneysel ve hesaplamalı yönlerinin anlaşılması için temel oluşturacaktır.

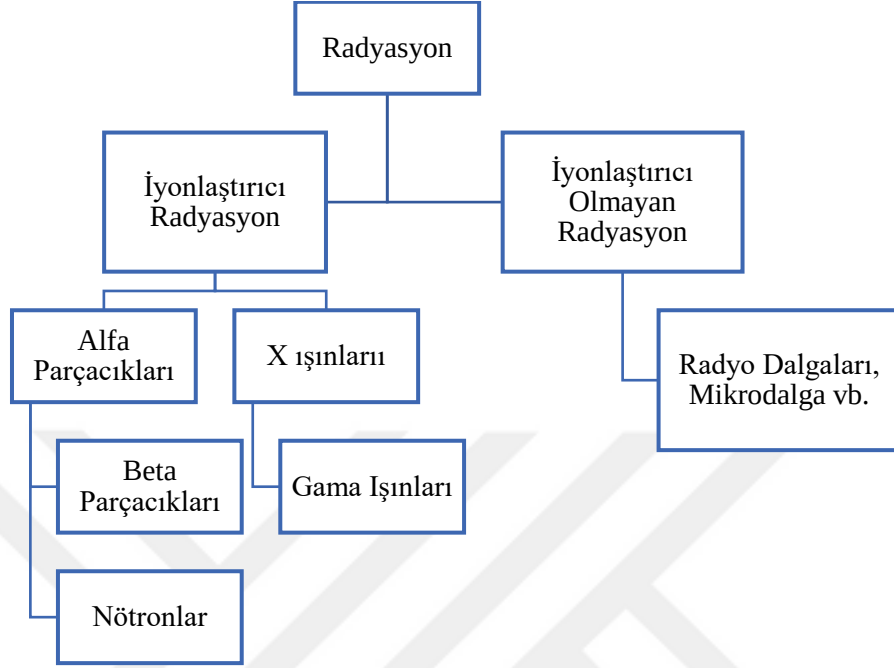
2.1.Radyasyon Kavramı ve Radyasyon Tipleri

Dünyadaki canlı ya da cansız tüm varlıklar temelde atomlardan oluşmaktadır. Her atomun kalbinde yani çekirdeğinde, pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar bulunurken, negatif yüklü elektronlar çekirdeği çevrelemekte ve söz konusu elektronlar çeşitli enerji seviyelerinde yer almaktadır. Çekirdek ve çevresindeki pozitif ve negatif yüklerin bu ilişkisi atoma bir denge hali kazandırmaktadır.

Bazı atomlar, barındırdıkları proton ve nötronların sayısındaki denge anlamına gelen bir kavram olan kararlılığı barındırır. Örneğin, protonlardan daha fazla nötrona sahip olan bir atom kararsız olarak sınıflandırılabilir. Kararlılığa ulaşmak için, bu atomlar genellikle beta bozunumu olarak bilinen bir süreçle nötronları protonlara dönüştürmektedir. Tersine, bir atom nötronlardan daha fazla proton barındırdığında, pozitif yüklü bir parçacık olan bir pozitron yayarak proton-nötron dengesini sağlamakta ve daha sonra bir protonu nötrona dönüşmektedir (Sürücü, 2021). Bu dönüşüme önemli miktarda enerji salınımı eşlik etmektedir. Kararsız çekirdek tarafından kararlı duruma geçebilmek için yayınlanan alfa, beta, pozitron gibi radyasyon olarak bilinen bu enerji, enerjinin bir ortamdan diğerine parçacıklar veya dalgalar şeklinde aktarılması olarak tanımlanmaktadır (Vural, 2019). Bu tür radyasyon yayan elementler radyoaktif elementler olarak adlandırılmakta, söz konusu dönüşüm süreci ise radyoaktif bozunma olarak tanımlanmaktadır. Bahsedilen radyoaktif bozunma sırasında salınımı mevzu bahis olan dört farklı temel addedilebilecek radyasyon türü mevcuttur. Bunlar alfa (α), beta (β), gama (γ) ve nötron radyasyonlarıdır (Tüfekçi, 2017)

Radyasyon, yayılım kaynağı, maddeler üzerindeki etkisi ve yayılımının doğası gibi çeşitli temel özelliklere göre kategorize edilmektedir (Belgin, 2017). Kaynağına bağlı olarak, radyasyon doğal veya yapay olarak nitelendirilmektedir. Madde üzerindeki etkisi açısından iyonlaştırıcı veya iyonlaştırıcı olmayan olarak ikiye ayrılabilir. Şekil

2.1'de gösterildiği gibi iyonlaştırıcı radyasyon türlerine alfa, beta, nötron, X ışınları ve gama ışınları örnek verilebilirken, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüne radyo dalgaları ve mikrodalga örnek verilebilmektedir.



Şekil 2.1 Radyasyon türleri (Belgin, 2017).

Parçacık tipi radyasyon, belirgin bir kütle ve enerji ile karakterize edilmekte ve yüksek hareketlilik sergilemektedir. Buna karşılık, dalga tipi radyasyon belirli bir enerji seviyesine sahiptir ancak kütlesi yoktur (Akıllı, 2019).

2.1.1. Gama ve nötron radyasyonuna giriş

İyonlaştırıcı radyasyon, atomların iyonlaşmasına neden olabilecek kadar yüksek enerjili dalga veya parçacıkları ifade etmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon X-ışınları ve γ ışınları gibi elektromanyetik ve yüklü α -parçacıkları veya yüksüz nötron parçacıkları gibi parçacık olmak üzere iki tür radyasyon bulunmaktadır (Lamarsh ve Baratta, 2001).

Yüksek enerjileri nedeniyle, bu dalgalar veya parçacıklar bir maddeye nüfuz ettiklerinde, özellikle enerjileri bu atomları bir arada tutan enerjiyi aşarsa, söz konusu maddedeki atomları bir arada tutan bağları kopartabilmektedir. Bu durum özellikle canlı dokularda zararlı olmasına rağmen X-ışınları ile tıbbi görüntüleme, gama ışını yoluyla endüstriyel görüntüleme gibi birçok uygulama bakımından da yararlıdır (Kınalır, 2011).

γ radyasyonu, kendine özgü yapısı ve davranışıyla α ve β parçacıkları gibi yüklü parçacık tipi radyasyon türlerinden ayrılmaktadır. Parçacıkların aksine γ radyasyonu, radyoaktif

çekirdeklerden yayılan elektromanyetik dalga olan yüksek enerjili fotonlardan oluşmaktadır. Bu fotonlar, kütle veya elektrik yükü taşımamaktadır (Tüfekçi, 2017).

Bununla birlikte γ radyasyonu, maddeye nüfuz etme konusundaki yüksek kabiliyeti sebebiyle de diğer radyasyon türlerinden ayırmaktadır. Maddenin derinliklerine nüfuz edebilmesi nedeniyle, γ radyasyonu sadece yolundaki herhangi bir malzeme tarafından durdurulamamaktadır. Bu radyasyon tipinin yoğunluğunu etkili bir şekilde azaltmak ve potansiyel zararlarından korunmak için özel zırhlama yöntemlerinin uygulanmasını gerektirmektedir (Tüfekçi, 2017).

Öte yandan nötronlar, bir atomun çekirdeğinde bulunan temel bir atom altı parçacıktır. Sırasıyla pozitif ve negatif yüklere sahip olan proton ve elektronların aksine nötronlar elektriksel olarak nötrdür. Kütlesi göz önünde bulundurulduğunda yüklü bir parçacık ve iyonlaştırıcı etkiye sahip proton kütlesine yakındır ve atomik kütlesi yaklaşık $1,67495 \times 10^{-27}$ kilogramdır (Lamarsh ve Baratta, 2001)

Nötronlar, bir maddenin hareketinden dolayı sahip olduğu enerji olan kinetik enerjinin farklı miktarlarına sahip olabilirler. Kinetik enerjileri 0,025 elektron volt (eV) gibi çok düşük bir değerden 20 milyon elektron volt (MeV) gibi oldukça yüksek bir değere kadar değişmektedir. Kinetik enerjilerine bağlı olarak nötronlar çeşitli türlere ayrılır. Örneğin, termal nötronlar son derece düşük kinetik enerjilere sahipken, hızlı nötronlar çok daha yüksek kinetik enerjilere sahiptir. Bu bağlamda yüksek kinetik enerjiye sahip nötronların maddeye nüfuz etme kabiliyetlerinin yüksek olduğunu ve yüksüz olmaları sebebiyle de maddeyi meydana getiren atomların elektriksel alanlarından etkilenmeden doğrudan çekirdek ile etkileşime girme ihtimallerinin yüksek olduğunu belirtmek mümkündür (Tuna, 2017).

2.1.2. Gama ve nötron radyasyonunun madde ile etkileşimi

Radyasyon madde ile etkileşime girdiğinde, bu etkileşimin özellikleri hem ilgili radyasyonun türüne hem de karşılaştığı maddenin türüne bağlı olarak değişebilmektedir. Genel olarak, bu etkileşimler atom içinde öncelikli olarak etkiledikleri unsurlara göre kategorize edilebilmektedir (Shultis, 2000).

Radyasyon bir elektrona isabet ettiğinde, gelen radyasyonun aktardığı enerji sebebiyle elektronun atomdan uzaklaştığı duruma iyonizasyon adı verilmektedir (Shultis, 2000).

Radyasyonun doğrudan atom çekirdeği ile etkileşime girdiği bazı durumlar da vardır. Çekirdek atomun derinlerinde güçlü kuvvetler ile denge halinde yerleşik olmasına ve

genellikle daha büyük bir moleküler yapının parçası olmasına rağmen, birçok etkileşim sırasında bu bağlardan arınmış gibi tepki verebilmektedir. Bu tür etkileşimler nükleer reaksiyonlara, çekirdeğin bölünmesi (filyon) gibi değışikliklere ve hatta parçacık yayınlanmasına yol açabilmektedir (Shultis, 2000).

Anlaşılabacağı üzere, radyasyonun maddeyle etkileşime girme şekli çok yönlü ve öncelikle atomun elektronlarıyla mı yoksa çekirdeğiyle mi etkileşime girdiğine ve bu elektron ya da atomun çekirdeğinin radyasyonun enerjisine nasıl tepki verdiğine bağlıdır (Shultis, 2000).

Radyasyonun bir madde içinde aldığı yol radyasyon türüne bağlı olarak değışmektedir. Nüfuz etme kabiliyetlerindeki farklılık, radyasyon türlerinin sınıflandırılmasında önemli bir kriter olmaktadır. Özellikle nötron ve γ -ışınlarının yüksüz olması madde içindeki transimyon (madde içinde kat ettiği yol) kapasiteye yüksektir. Yüksüz olmaları, atomik yapılarla minimum sapma ve etkileşim sağlayarak yüklü parçacıklara kıyasla daha derinlere nüfuz etmelerine olanak tanımaktadır. Bu özellik, belirli ortamlardaki yayılımlarını etkili bir şekilde zayıflatmak için özel zırhlama teknikleri gerektirir (O'Donnell ve Sangster, 1970).

Gama radyasyonu söz konusu olduğunda, söz konusu radyasyon tipinin madde ile etki dinamikleri Lambert-Beer yasası ile anlaşılabilir. Radyasyon bir malzemedan geçtiğinde saçılma ve soğrulma gibi etkileşimler göstererek şiddeti azalmaktadır. Bu Lambert-Beer matematiksel ifadesi denklem 2.1'de de görüldüğü üzere radyasyon bir malzemedan geçerken malzemenin özelliklerine ve içinden geçtiği kalınlığa bağlı olarak şiddetinde azalma meydana gelmektedir (Agar, 2019).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

Burada; I , maddeden geçen radyasyon yoğunluğu, I_0 , gelen radyasyon yoğunluğu, μ maddenin lineer zayıflatma katsayısı (LAC) ve x malzeme kalınlığını göstermektedir. μ lineer zayıflatma katsayısı maddenin yoğunluğu ile ilişkilidir. (Kinalır, 2011). Bu ilişki, aşağıdaki şekilde tanımlanan kütle zayıflama katsayısı (μ/ρ , MAC) ile daha da açıklığa kavuşturulabilir (Agar, 2019).

$$MAC = \mu/\rho \quad (2.2)$$

Burada, ρ malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir. Lineer zayıflatma ve kütle zayıflatma katsayıları aynı zamanda bir maddenin gama radyasyonu karşısında zırhlama

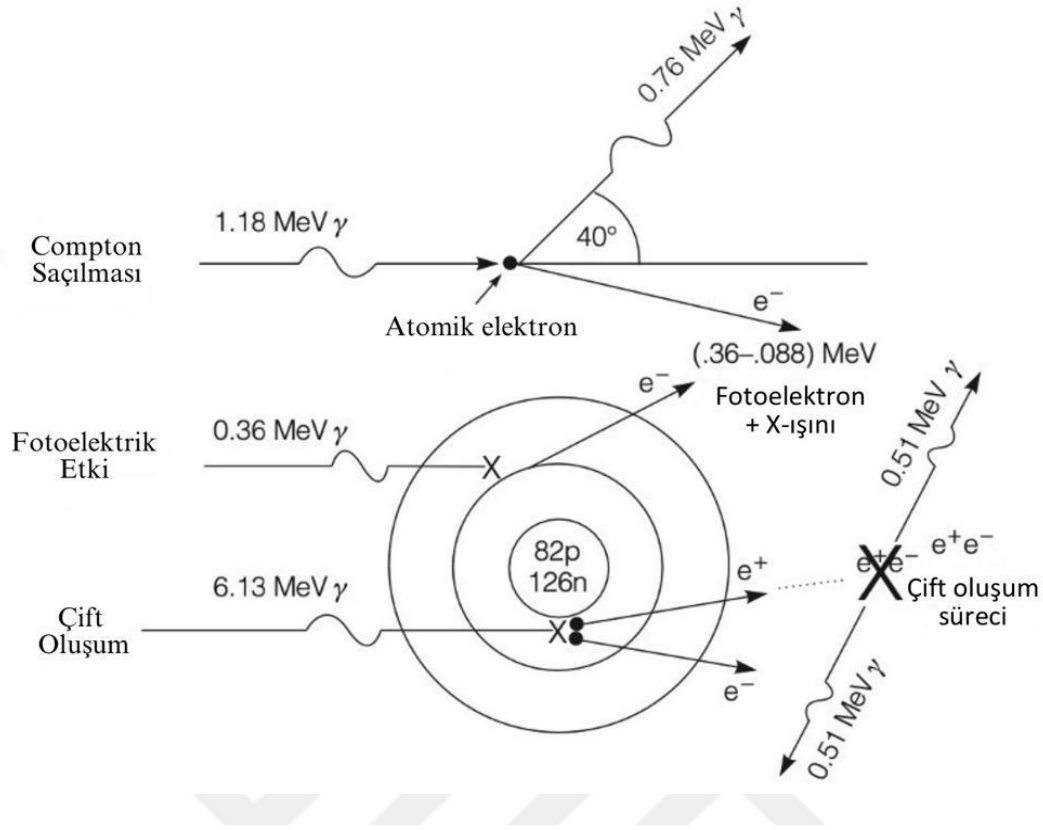
kabiliyetini gösteren pek çok parametrenin, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı gibi, türetilmesini sağlamak konusunda yardımcıdır (Hughes, 1973).

μ değeri maddeye ve gama radyasyonunun enerjisine özgü bir özelliktir ve elektromanyetik radyasyonun etkileşim mekanizmaları ile ilgili süreçlerin tamamıyla doğrudan ilgilidir. Bu süreçleri üç farklı başlık altında incelemek mümkündür, bunlar; fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumdur (Hughes, 1973).

Fotoelektrik etki, γ ışınının bir atomun elektron bulutu tarafından soğrulması ve ardından bir elektronun atomun yörüngesinden uzaklaştırılması ile tanımlanır. Tipik olarak, uzaklaştırılan bu elektron atomun iç yörüngelerinden olması muhtemeldir. Bu etkileşimde, foton tüm enerjisini elektrona aktarmak suretiyle sarf eder ve ortaya çıkan fotoelektronun enerjisi, fotonun başlangıç enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisi arasındaki eşitsizliği yansıtmaktadır (Knoll, 2010).

Fotoelektrik etkinin aksine, Compton saçılması ise gelen gama ışınının enerjisinin sadece bir kısmının atomun yörüngesindeki bir elektronun fırlatılmasında harcanmasına sebep olmaktadır. γ ışını böylesi bir etkileşimde kalan enerjisi ile birlikte saçılır. Gelen γ ışınının enerjisi yükseldikçe, Compton saçılması olasılığı azalmaktadır. Bu saçılmanın 100 keV ila 10 MeV enerji spektrumundaki elektromanyetik radyasyon türleri için birincil soğurma mekanizması olduğu varsayılmaktadır (Knoll, 2010).

Çift oluşumu ise, γ ışını enerjisinin 1,02 MeV'i, yani bir elektronun durgun kütle enerjisinin iki katını aştığında ortaya çıkan bir etkileşimdir. γ ışınının enerjisi arttıkça, bu olgunun gerçekleşme olasılığı da artar. Bu süreçte, bir çekirdekle etkileşime giren bir γ ışını fotonunun yerini bir elektron-pozitron ikilisi alır (Knoll, 2010).



Şekil 2.2 γ radyasyonunun madde ile etkileşim süreçlerinin gösterimi (Shapiro, 1990).

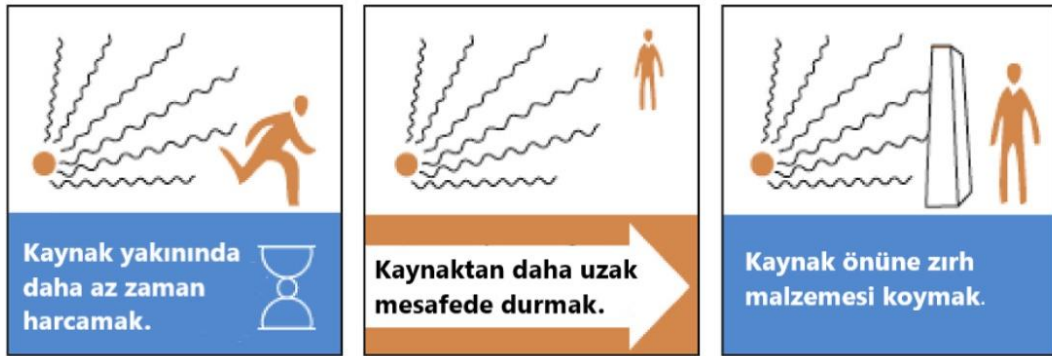
Şekil 2.2'de Compton saçılması, fotoelektrik etki ve çift oluşumu süreçleri gösterilmektedir. Şekilde gösterilen gelen foton enerjileri, kurşundaki her bir süreç için baskın etkileşimi temsil etmektedir. 'X' sembolü, gelen parçacıkların kaybolduğunu göstermektedir (Shapiro, 1990).

Hızlı nötronlar, ortaya çıktığında yaklaşık 1 eV ile 20 MeV enerji aralığında yüksek enerjiye sahiptirler. Genellikle bu hızlı nötronlar çevrelerindeki atomlarla elastik çarpışmalar geçirerek yavaşlamaktadır. Termal veya termal enerjiye yakın ($0,025 \text{ eV}$) enerjilere yavaşladıktan sonra, tipik olarak soğurucu ortamın çekirdekleri tarafından yakalanmaktadır. Çok sayıda potansiyel nötron reaksiyonu vardır, ancak baskın olanlar elastik saçılma ve çekirdek tarafından nötronun yakalanması reaksiyonlarıdır. Nötron yakalandıktan sonra, soğurucu çekirdek genellikle bir foton veya farklı bir parçacık yayarak kararlı duruma dönmeye çalışmaktadır (McGraw ve Hill, 2009).

2.2. Radyasyondan Korunma Konsepti

Radyasyon bilindiği üzere pek çok tıbbi ve endüstriyel uygulamaların yanı sıra nükleer güç santralleri, araştırma reaktörleri gibi çalışma alanlarında da karşımıza çıkmaktadır. Radyasyonun insan üzerindeki etkileri yıllardan beri bilinmektedir. Bu sebeple değinilmesi gereken en önemli hususlardan biri de radyasyondan korunma yollarıdır.

İyonlaştırıcı radyasyon uygulamaları alanında, faydaları en üst düzeye çıkarırken korunmayı yani radyasyon güvenliğini sağlamak yüksek öneme sahiptir. Bunun merkezinde 'Makul Ölçüde Ulaşılabilecek Kadar Düşük' anlamına gelen ALARA (as low as reasonably achievable) ilkesi yer almaktadır. Bu ilke maruz kalınan radyasyon dozlarının en aza indirilmesi gerekliliğinin altını çizmektedir (Zeyrek, 2013).



Şekil 2.3 ALARA prensibinin 3 temel uygulaması (Araz, 2020).

Böylesi bir korunmayı sağlamak konusunda Şekil 2.3'te de gösterilen üç farklı temel kriter ALARA prensibini meydana getirmektedir. Bunlar:

- Maruziyet süresi
- Mesafe
- Zırh

Olarak bilinmektedir (Akçaalan, 2015).

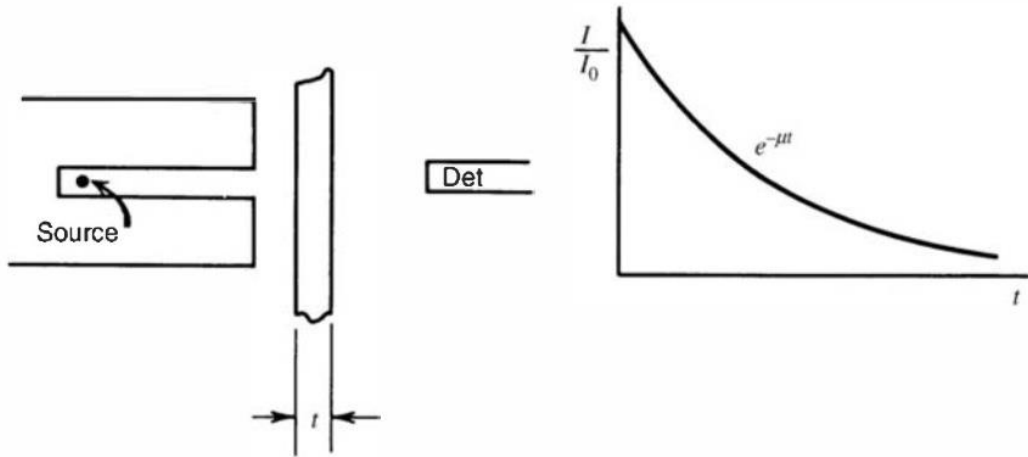
Maruziyet süresi ve mesafe, radyasyon etkilerinin minimize edilebilmesi adına maruziyet süresinin sınırlandırılmasının ve radyasyon kaynağından güvenli bir mesafenin korunmasının önemini vurgulamaktadır. Bu kılavuz ilkeler, bireyleri potansiyel radyasyon tehlikelerinden korumayı amaçlamaktadır. (Shapiro, 1990)

Mesafe ve maruziyet kısıtlamaları radyasyonun zararlı etkilerini aza indirebilmek için faydalar sunarken, zırhlama en güvenilir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bununla

birlikte, uygulanan zırlamanın ölçütleri genellikle maliyet değerlendirmeleri ile beklenen koruyucu faydalar arasında mantıklı bir dengeye dayanmaktadır. (Gollnick, 1994)

Bir maddenin/malzemenin zırlama konusunda yetkinliğini tespit edebilmek adına birkaç parametrenin incelenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerden başlıcaları yukarıda da bahsedildiği üzere, μ ve μ/ρ 'dır (Gollnick, 1994).

Nitekim tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin gama radyasyonu karşısındaki zırlama kabiliyetlerinin tespitini gerçekleştirmek amacıyla radyasyon koruma verimliliği (RKV), elektron yoğunluğu (N_e) yani gram başına elektron sayısı, etkin atom numarası (Z_{etk}), yarı değer kalınlığı (YDK) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Nötron radyasyonuna karşı zırlama etkinliğinin anlaşılabilmesi adına ise malzemeye gelen ve malzemeden geçen parçacık yoğunluğu ile etkin uzaklaştırma tesir kesiti incelenmiştir (Gollnick, 1994).



Şekil 2.4 Gama radyasyonu için üstel transmisyon eğrisi (Gollnick, 1994).

Şekil 2.4'te tek enerjili bir gama ışını demetinin bir soğurucudan bir detektöre doğru yönlendirildiği bir iletim deneyi görülmektedir. Şekil 2.4'te de görüleceği üzere soğurucu malzemenin kalınlığına bağlı olarak γ ışını üstel bir zayıflamaya uğramaktadır. Bu zayıflamanın seviyesi γ ışınlarının maruz kaldığı çeşitli etkileşimlere bağlıdır ve bu etkileşimlerin olasılıklarının toplamı μ olarak adlandırılır. Denklem 2.3'te etkileşim türlerine göre μ değerindeki değişim verilmektedir (Knoll, 2010).

$$\mu = \tau(\text{fotoelektrik}) + \rho(\text{Compton}) + \kappa(\text{çift oluşum}) \quad (2.3)$$

γ radyasyonu ışınları bir soğurucu madde içinden geçerken hemen etkileşime girmezler, ancak herhangi bir etkileşim gerçekleşmeden önce ortalama bir mesafe kat ederler. Bir gama ışını fotonunun soğurucu malzeme ile etkileşime girmeden önce kat ettiği mesafeyi temsil eden bu ortalama mesafe "ortalama serbest yol" olarak adlandırılmakta aynı zamanda λ ya da MFP ile sembolize edilmektedir (Kumar, 2017).

$$\lambda = 1 / \mu \quad (2.4)$$

μ değeri, γ ışınının nüfuz ettiği soğurucu malzeme yol boyunca aynı olsa bile soğurucunun yoğunluğuyla değişmektedir. Bu sebeple, μ/ρ değeri çok daha yaygın olarak kullanılır ve Denklem 2.2'deki gibi kullanılmaktadır (Dilsiz vd., 2021).

μ ve μ/ρ ile birlikte RKV de önemli bir diğer zayıflatma parametresidir. RKV Denklem 2.5'te verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır (Dilsiz vd., 2021).

$$RKV = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad (2.5)$$

Radyasyona maruz bırakılan numunenin karışım, bileşik, alaşım ya da bir kompozit olduğu durumlarda, Z_{etk} belirlenmesi oldukça önemli hale gelmektedir. Bu parametre, malzemelerin gama ışını zayıflatma özellikleri hakkında fikir vermektedir (Murty ve Cooper, 1999). Z_{etk} 'nin formülüzasyonu denklem 2.6'da verilmektedir (Dilsiz vd., 2021).

$$Z_{etk} = \sigma_{atomik} / \sigma_{elektronik} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da gösterilen σ_{atomik} atom başına hedefle etkileşime girme olasılığı, $\sigma_{elektronik}$ ise elektron başına etkileşime girme ihtimalini ifade etmektedir (Araz, 2020).

Z_{etk} 'nin hesaplanması yoluyla N_e denklem 2.7'de belirtildiği şekilde yazılabilmektedir.

$$N_E = N_A \frac{Z_{etkin}}{A} \quad (2.7)$$

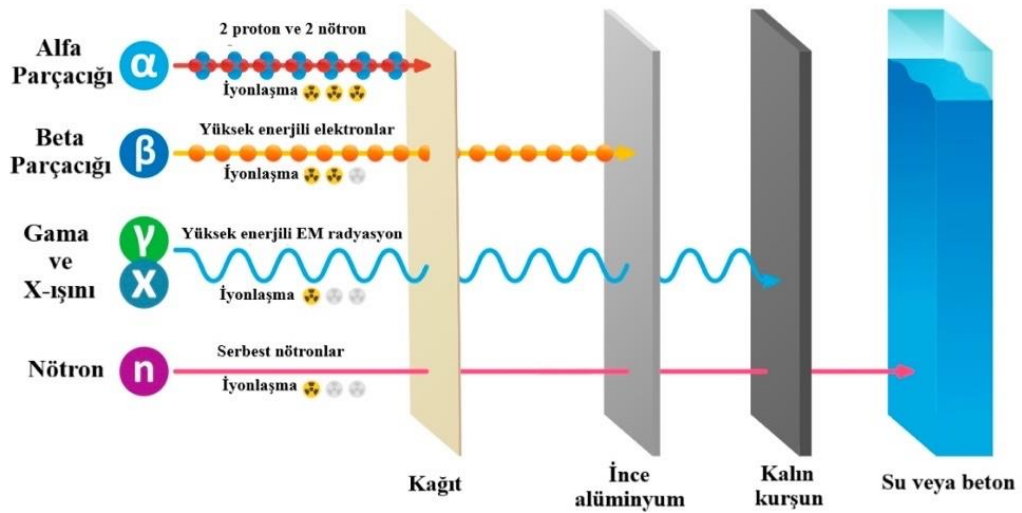
Tüm bu parametrelere ek olarak YDK da γ radyasyonu ışınının maruziyeti söz konusu olduğunda malzemenin zırhlama kabiliyetinin tespiti için önemli parametrelerdendir. Malzemeye gelen radyasyonun şiddetinin yarısının zayıflatılabildiği kalınlığa yarı değer kalınlığı ya da yarı değer katmanı adı verilmektedir. Mesafe birimi cinsinden ölçülen bu parametre, zayıflama katsayısına benzer şekilde γ ışınının enerjisine göre değişkenlik göstermektedir. Bu ışınların enerjisi daha nüfuz edici hale geldikçe, malzemenin YDK'sı da buna bağlı olarak artmaktadır. (Akkurt vd., 2012)

Nötron radyasyonuna karşı davranışların incelenmesi adına yukarıda da bahsedildiği üzere uzaklaştırma tesir kesiti gibi parametreler tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Etkin uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R), nötronun sahip olduğu enerji fark etmeksizin, bir nötronun ilk etkileşime girme olasılığını tanımlamaktadır. Bu parametre nötronların malzemelerden geçerken sergiledikleri davranışı anlamaya yardımcı olmaktadır. (Kaplan, 1989)

2.2.1. Radyasyondan korunmada kullanılan güncel malzemeler

Radyasyon zırhları için tasarımlar hazırlanırken, doğru malzemenin seçilmesi kritik bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Seçim, hedeflenen radyasyonun türü ve enerjisi gibi birçok husus etrafında şekillenmektedir. Zırhlama malzemesinin seçimi, maliyet, dayanıklılık ve ağırlık gibi pratik hususlara kadar çeşitli faktörlere bağlıdır.

Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere farklı radyasyon tiplerinin farklı zırh malzemeleri yoluyla engellenmelerinin sağlanması gerekliliği aşıkardır. Bir malzemenin etkili bir şekilde koruma sağlama kabiliyeti, gelen radyasyonla etkileşim dinamikleri tarafından belirlenmektedir. Örneğin, yoğun malzemeler X-ışınları ve γ -ışınlarına karşı zırh malzemesi olarak kullanımda üstünlük sağlarken, nötronlar daha hafif yoğunluktaki maddeler yoluyla durdurulabilmektedir (Araz, 2020).



Şekil 2.5 Farklı radyasyon tipleri için yaygın olarak kullanılan zırh malzemeleri (Araz, 2020).

Kurşun, paslanmaz çelik, tungsten, beton ve cam temelli malzemeler yaygın olarak γ radyasyonuna karşı zırhlama malzemelerinin tasarımlarında kullanılmaktadır. Bu

malzemelerin kullanımlarının esas sebebi elbette atom numaraları ve yüksek yoğunluklarıdır. Özellikle kurşun bu alanda kullanılan yaygın malzemelerdendir. Kurşunun radyasyondan korunmada öne çıkması sadece γ ve X-ışını radyasyonu için gösterdiği üstün zayıflatma katsayısından kaynaklanmamaktadır. Kolay şekil verilebilmesi, uygun fiyatlı oluşu, imalat kolaylığı, korozyon direnci ve termal iletkenliği gibi çok yönlü faydaları onu radyasyondan korunma alanında zırh malzemesinin gerekli olduğu ortamlarda vazgeçilmez kılmaktadır. Bu avantajların başında kurşunun imalat kolaylığı gelmektedir. Bu özelliği, zırhlama çözümlerinin çeşitli ve özel ihtiyaçlara göre nispeten basit bir şekilde uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca kurşun, korozyona karşı yüksek direnciyle öne çıkmakta ve zorlu ortamlarda bile uzun ömürlü olmasını mümkün kılmaktadır. Kayda değer termal iletkenliği ile birleştiğinde kurşun, çeşitli nükleer uygulamalar için her şeyi kapsayan bir seçim haline gelmektedir (Araz, 2020).

Ancak günümüzde kurşunun toksik özellikleri olduğu bilinmektedir. Malzeme bilimi açısından bakıldığında, kurşunun kendine özgü sınırlamaları vardır. Düşük erime noktası onu yüksek sıcaklıklarda daha az kararlı hale getirmektedir. Buna ek olarak, yüksek yoğunluğu, nakliye ve kurulumda lojistik zorluklara yol açabilmektedir. Yumuşak yapısı, düşük mukavemeti ve yüksek işlenebilirliği ile birleştiğinde, bu özellikler belirli uygulamalar için kurşun seçerken dikkatli olunması gerektiğinin önemini vurgulamaktadır (Araz, 2020).

Tungsten ise erime noktası 3387°C 'ye kadar çıktığı için işlenmesi veya dökülmesi zor bir malzemedir (Kobayashi vd., 1997). Tungsten radyasyon zırhlama söz konusu olduğunda dikkate değer bir verimlilik sergilemektedir. Dikkat çekici bir şekilde, kurşun ile aynı koruma performansını elde etmek için tungsten kullanıldığında kalınlığın sadece %60'ı gereklidir (Araz, 2020).

Kurşun ve tungstene ek olarak çok yönlü ve uygun maliyetli bir koruyucu malzeme olarak faydalanılan beton, γ ışınlarına ve nötronlara karşı eş zamanlı koruma sağlamaktadır. Özellikle alanın sınırlı olmadığı ve yapısal sağlamlığın çok önemli olduğu durumlarda beton tercih edilen bir çözüm haline gelmektedir. Düşük zırhlama etkinliği genellikle çelik veya kurşun gibi daha yüksek zırhlama etkinliğe sahip malzemeler ile güçlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Daungwilailuk vd., 2022).

Tungsten'nin temel avantajı, yeterli kalınlıklarda kullanıldığında maliyet-koruma oranında görülür. Ancak büyük hacmi, yaşlanmaya bağlı bozulma potansiyeli ve bazı

yapısal uygulamalardaki kısıtlamalar nedeniyle betonla ilgili potansiyel zorluklar ortaya çıkmaktadır (Araz, 2020).

Beton gibi cam da özellikle gama ve nötron radyasyonu zırhlama ve nükleer teknoloji çalışmalarının merkezinde yer almaktadır (Khanna vd., 1996). Araştırmacılar, γ ışınları ve nötronlar gibi iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerine karşı çalışanların/gözlemcilerin güvenliğini sağlamak için şeffaflık ve radyasyon emiliminin ikili gereksinimlerini ustalıkla dengeleyen camlar geliştirmiştir (Rothwell, 1958). Bor ve kadmiyum gibi elementler bakımından zengin cam bileşimleri, termal nötronları absorbe etme özellikleri yüksek olan elementlerdir (Melnick vd., 1951).

Ancak, yoğun radyasyona maruz kalındığında, bu şeffaf zırhların bazılarının renk değişikliği, gaz salınımı ve hatta çatlama gibi sorunlar ortaya çıkarabileceğini belirtmek gerekmektedir (Khanna vd., 1996).

Nötron radyasyonuna karşı zırhlama söz konusu olduğunda, γ ve X-ışını zırhlamasını belirleyen ilkelerden farklı bir dizi ilkeye göre işlemektedir. Madde ile elektromanyetik radyasyonun etkileşimleri genellikle atom numarası ve enerjiye bağlı olarak öngörülebilir varyasyonlara sahipken, nötron etkileşimleri nispeten daha karmaşıktır. Tesir kesitleri elementler arasında ciddi farklılıklar gösterebildiği gibi genellikle enerji seviyelerinden etkilenen karmaşık rezonans yapıları sergilerler. Yüksek hızlı nötronları kontrol altına almak yani yavaşlatabilmek yahut malzemeden geçişlerini engelleyebilmek için hidrojen içeriği yüksek ve su, parafin mum, polietilen ve berilyum gibi atom numarası düşük malzemeler tercih edilmektedir. Daha zorlu termal nötronlar için bor ve kadmiyum ile katkılanmış maddeler tercih edilmektedir (Price vd., 1957; Araz, 2020).

2.2.2. Radyasyondan korunmada polimerlerin rolü

Tarihsel olarak, kurşun ve beton radyasyon zırhlamada kullanılan temel malzemelerdendir. Ancak, son gelişmeler polimerleri ve kompozitlerini bu alanda umut verici alternatifler olarak ön plana çıkarmaktadır. Hafiflikleri, dayanıklılıkları ve esneklikleriyle dikkat çeken bu malzemeler, üstün fiziksel, mekanik ve gözle görülür özellikleriyle de diğerlerinden ayrılmaktadır. Aynı zamanda radyasyona karşı direnç sergilemeleri, onları geleneksel koruyucu malzemelerin uygulanabilir ve belki de daha verimli alternatifleri olarak konumlandırmaktadır (More vd., 2021).

Tipik olarak, daha yoğun malzemeler radyasyon karşısında daha iyi zırhlama özelliği gösterme eğilimindedir. Radyasyon ve organik bileşikler arasındaki dinamik; oksidasyon,

gaz halinde yan ürün oluşumu ve depolimerizasyon gibi mekanizmalar öncelikli olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Tsepelev vd., 2019; Wady vd., 2020).

Polimerler açısından, radyasyona karşı direnç büyük ölçüde malzeme içinde bulunan oksijen miktarı ve hacminden etkilenmektedir. Bu organik polimerler düşük ağırlık, korozyona karşı direnç, minimum dielektrik sabitleri ve doğal hafiflik gibi özelliklerle karakterize edilmektedir. Bu özellikler, radyasyona maruz kalmanın potansiyel bir risk olduğu çeşitli uygulamalarda onları özellikle değerli kılmaktadır (More vd., 2021)

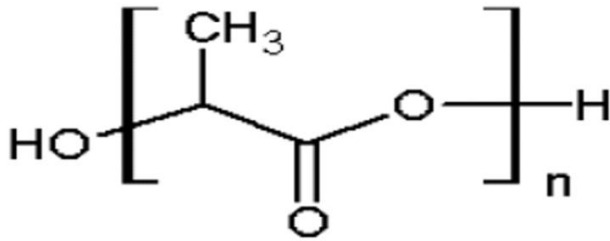
Bunlara ek olarak, polimerlerin doğasında var olan dikkat çekici bir özelliği vardır: yüksek atom numaralı (yüksek Z) malzemelerle sorunsuz bir şekilde katkılanarak kompozit malzemeler elde edilebilmektedir. Bu polimer bazlı kompozitler, radyasyona karşı gelişmiş bir mukavemet kabiliyeti gösterebilecek hem polimerlerin hem de yüksek Z malzemelerinin avantajlı özelliklerinden yararlanarak gelişmiş radyasyon koruma etkinliğine sahiptir (Atashi vd., 2018)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.PLA Filamenti ve Polimerlerin Genel Özellikleri

Atıkların depolanması ve geri dönüştürülmesine ilişkin artan zorluklar günümüz dünyasında büyük bir yer tutmaktadır. Termoplastiklerin çoğunun biyolojik olarak çözünememesi, buna bağlı çevre tahribatı gibi bariz çevresel sonuçların ötesinde, geri dönüşüm, enerji ve işçilik maliyetleri başta olmak üzere kendi ekonomik muammalarını da beraberinde getirmektedir (Zehir vd., 2022).

Bu bağlamda doğada çözünebilir olması sebebiyle öne çıkan bir termoplastik olan Polilaktik asit (PLA) göze çarpmaktadır. Kimyasal formülü $(C_3H_4O_2)_n$ olarak verilmektedir. (Mahapatro, 2011) Ağırıklı olarak mısır, nişasta ve şeker kamışı gibi bitki bazlı ürünlerden elde edilen PLA, polimer malzemelerin kullanıldığı alanlarda giderek daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Çevre dostu olması, şekillendirmeye uygunluğu, üretim sırasında enerji verimliliği ve etkili dayanıklılığı ile birleştiğinde, termoplastiklerin kullanımı söz konusu olduğunda PLA önem kazanmaktadır (Caner, 2020) Dahası, bir biyopolimer olarak PLA'nın biyolojik varlıklarla etkileşimi zararlı etkilerden yoksundur, bu nedenle uygulanabilirliği genişir (Çömez, 2019). Şekil 3.1'de PLA'nın kimyasal yapısı yer almaktadır.



Şekil 3.1 PLA'nın kimyasal yapısı (Mahapatro, 2011)

PLA, camsı forma geçiş sıcaklığı 65-70 °C ve erime sıcaklığı yaklaşık 160-170 °C olan bir polimerdir (Termek, 2021). 200 °C üzerindeki sıcaklıklarda PLA bağlarında zincir kırılması ve bağlarındaki açılmadan kaynaklanan molekül ağırlık kaybı gibi değişimler gerçekleşmektedir. Ayrıca PLA polimerlerini çözmek için benzen, kloroform gibi çözücü bileşikler kullanılmaktadır (Caner, 2020). Bununla birlikte en önemli avantajlarından biri olan doğada kolay çözünebilmesine örnek vermek gerekirse petrol bazlı plastiklerden olan polistiren ve polietilen malzemelerinin doğada çözünmesi yaklaşık 500 ile 1000 yılları arasında sürerken PLA'da bu bozunma 2 ayda gerçekleşmektedir (Termek, 2021).

PLA yapısı gereği parlak bir görünüme sahip olmasının yanı sıra insanların ten ile teması sonucunda sağlığa herhangi bir zararı söz konusu olmaması sebebiyle günlük hayatta birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin çocuk oyuncakları, mutfak araç ve gereçleri, şekilli kurabiye kalıpları, ambalaj, tarım ürünleri, saklama kutuları gibi temasın sık olduğu gereçlerde kullanımı mevcuttur (Çömez, 2019).

PLA elastiklik özelliği ve mukavemet yeteneği yüksek bir malzemedir. Bu bahsi geçen avantajlarının yanında erime sıcaklığının düşük olması, kristalleşme hızındaki yavaşlık, darbelere karşı direncinin zayıf olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Kaya M. , 2016). Bahsi geçen dezavantajların hafifletilmesi mümkün olursa giderilmesi için kopolimerizasyon, diğer polimerlerle karıştırma, katı dolgu maddesi ekleme gibi yöntemler uygulanmaktadır. (Tokdemir, 2022). Bu tez çalışmasında katı dolgu maddesi katkılanarak yeni bir kompozit malzeme oluşturulması tekniği kullanılmıştır. PLA polimerinin genel özellikleri Tablo 3.1’de daha detaylı görülmektedir (Zehir vd., 2022).

Tablo 3.1 PLA’nın ayrıntılı özellikleri (Zehir vd., 2022),

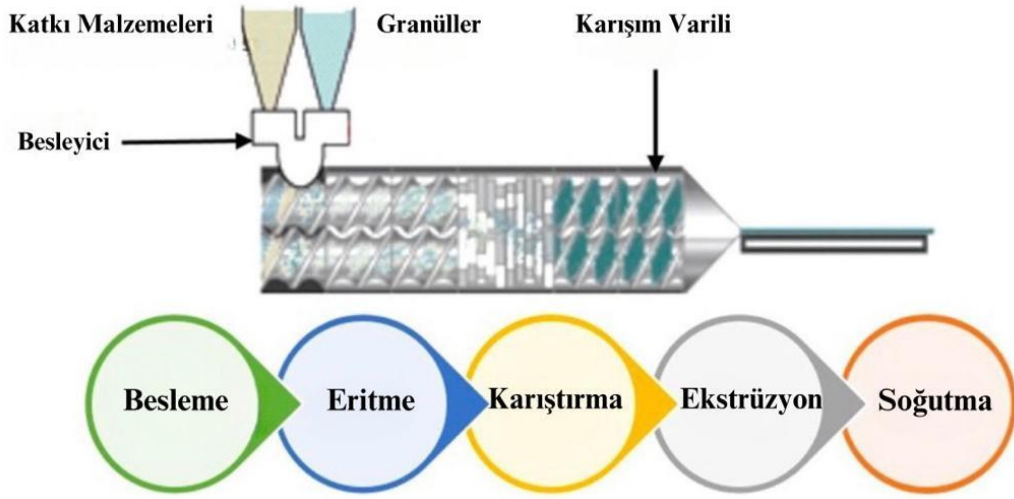
Teknik isim ve kimyasal formül	Polilaktik asit, (C ₃ H ₄ O ₂) _n
Mekanik Özellikler	
Çekme dayanımı (MPa)	61-66
Kopma uzaması (%)	10-100
Eğilme mukavemeti (MPa)	48-110
Termal Özellikler	
Erime sıcaklığı (°C)	157-170
Enjeksiyon kalıplama sıcaklığı (°C)	178-240
Isı sapma sıcaklığı (°C)	40-45,135
Cam geçiş sıcaklığı (°C)	55-56
Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,22
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,25
Erime akış hızı (g/10 dak)	4,3-2,4

3.2. PLA Filamentlerinin Üretimi

Gelişen teknoloji ile günümüzde 3D yazıcı kullanımı giderek daha popüler hale gelmiştir. 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak birçok karmaşık yapıların üretimi yapılabilmektedir. Bilgisayar ortamında CAD programı gibi tasarım programları kullanılarak tasarımı yapılan malzemelerin daha sonra üç boyutlu yazıcı kullanılarak fiziksel üretime geçilmesi, fazladan ham madde kullanımından, zamandan ve enerjiden çok büyük tasarruf sağlamaktadır. Filament üretiminde istenilen ürünün özelliklerine göre kullanılan çeşitli ham maddeler vardır. Örneğin Akrilonitril Bütadin Sitren (ABS), Polilaktik Asit (PLA), Polivinil Alkol gibi hammaddelerin kullanımı söz konusudur. Seçilen hammadde kullanılması istenilen alana göre değişiklik göstermektedir. Bu hammaddelerden PLA, doğal yollarla üretimi, 3D yazıcı ile kolay basılması ve çevre dostu olması sebebiyle en sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca filament üretim sırasında herhangi bir zararlı gaz salınımı oluşmamaktadır (Yavuz, 2023).

PLA filamenti yenilenebilir malzemelerden, özellikle mısır nişastası veya şeker kamışından elde edilmektedir. Bir fermantasyon süreciyle bu malzemeler laktik aside dönüştürülür. Daha sonra laktik asit polimerizasyona uğratılmakta ve ham PLA oluşturulmaktadır. Bir üretim ortamında, bu ham PLA işlenerek küçük peletler haline getirilmektedir. Bu peletler daha sonra eritmeye tabi tutulur ve ince iplikler oluşturmak için ekstrüde edilir. Ekstrüzyondan sonra bu iplikler hemen soğutulur ve uygun şekilde makaralara sarılır ve 3D baskıda kullanıma hazır hale getirilir (Mikula vd., 2021). Anlatılan üretim prosedürü Şekil 3.2’de çift vidalı bir ekstrüder veya karıştırıcı ile ana nano katkı maddelerinin bir polimer tozu ile doğrudan karıştırılmasını, karışımın bir pelet haline getirilmesini ve eritilmesini içeren eriyik işleme ekstrüzyon tekniğini göstermektedir.

Şekil 3.3’te ise bu tez çalışması kapsamında hizmet alımı ile 3D yazıcı kullanılarak üretilen saf PLA filament gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Ekstrüzyon tekniğinin şematize edilmiş hali (More, 2021).



Şekil 3.3 Üretimi gerçekleştirilen saf PLA filamenti

3.2.1. PLA'nın radyasyon zırlama uygulaması

Radyasyon uygulamalarının tehlikeli etkilerinden korunabilmek, istenmeyen sonuçların önüne geçebilmek adına radyasyon şiddetini azaltabilecek mümkünse durdurabilecek radyasyon zırhlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Cam, kil, polimerler gibi malzemeler zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu zırh malzemelerinden birinin kesin olarak üstün olduğunu iddia etmek veya herhangi birini 'en iyi' malzeme olarak etiketlemek uygun değildir. Bu durum, her bir malzemenin farklı alanlarda uygulama alanı bulmasından ve genellikle diğerlerini tamamlamaya hizmet etmesinden kaynaklanmaktadır.

Radyasyon zırh malzemelerinin üretiminde polimerlerin kullanılmasının avantajları, esnek yapıları, kimyasal kararlılıkları, hafif olmaları ve düşük maliyetleri şeklinde sıralanabilir. Bu avantajları sayesinde birçok radyasyon zırlama alanında çalışan araştırmacıların dikkatini çekmeyi başarmıştır. Son zamanlarda, çeşitli katkı maddeleri ile güçlendirilmiş polimerler, daha fazla fayda sağlayan gelişmiş radyasyon zırlama malzemeleri geliştirmek için bir araç olarak ilgi görmeye başlamıştır (Mann vd., 2015)

Katkılanacak malzemeler farklı polimer türlerinden (PLA, ABS vb.) ve katkı malzemesi nano ve mikron gibi farklı boyutlarda seçilebilmektedir. Katkılama sonucunda üretilen yeni malzemelerin gama ve nötron radyasyonlarına koruyucu malzeme geliştirilmesinde fayda sağlamaktadır. (Akman, vd., 2020). Tüm bu bilgiler ile genekselleşen kalıpla üretim tekniklerindeki üretim zorlukları ve istenilen karmaşık geometrileri oluşturma zorlukları da göz önünde bulundurulduğunda 3D yazıcılarda katkılı polimerlerin kullanımı radyasyon zırlama alanında giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında PLA polimerine Er_2O_3 ve Gd_2O_3 bileşikleri farklı oranlarda katkılanarak filament üretimleri hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Katkılı PLA filamentinde kullanılan maddeler

Bu tez çalışması kapsamında bir önceki başlıkta da ifade edildiği üzere PLA filamentine katkılanmak üzere nano parçacık boyutunda gadolinyum oksit (Gd_2O_3) ve erbiyum oksit (Er_2O_3) bileşikleri seçilmiştir. Nano boyutta katkılanan malzemenin, yoğunluğu arttırması ve bu sayede gelen radyasyonun malzeme ile etkileşim ihtimalinin artmasının sağlanmasıdır (Malekie ve Hajiloo, 2017). Seçilen katkı bileşiklerinden biri olan Gd_2O_3 'te bulunan gadolinyum (Gd) elementi yüksek bir termal nötron soğurma kesitine sahiptir. Fisyon dağılımının homojenliğini korumak için nükleer reaktörlerdeki kontrol çubuklarında kullanılmaktadır. Bu özellik, termal nötronları yakalamada önemli

avantajlar sunduğundan, seçimi için birincil motivasyon kaynağıdır. Bu sıralanan özelliklere ek olarak nükleer tıpta görüntüleme cihazı olarak kullanılan MR (manyetik rezonans) kullanılırken görüntü kalitesinin artırılması amacıyla hasta vücuduna gadolinyum içeren kontrast ajanı enjekte edilmektedir. Bu bilgi ışığında gadolinyumun insan sağlığı için diğer toksik bileşenlere nazaran güvenli olduğu ve kullanılabilir olduğu çıkarımı yapılabilmektedir (Feifei, vd, 2019). Er_2O_3 bileşiğinin yapısında bulunan Erbiyum (Er) elementi nötron emici kontrol çubuklarının yapısında bulunmaktadır (Lamarsh ve Baratta, 2001; Mann vd., 2015). Er ve Gd elementleri atom numaraları yüksek olması sebebiyle gama zırhlamada pozitif etki sunmaları beklentisi sebebiyle tercih edilmiştir. Bu elementlerin oksit formlarının seçilmesinin sebebi ise hem Gd hem de Er, polimer matristeki ametallerle bağlanma eğilimi göstermektedir ve bu da doyumluğa ulaşıldığında ametal gazların salınımını tetikleyebilmektedir. Bu olgu, ametallerin artan elektronegatifliğine karşın Gd ve Er'in belirgin elektropozitifliğinden kaynaklanmaktadır (Obregón vd., 2013). Bütün bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasında seçilen polimer olan PLA malzemesine polimer malzemelerin γ ve nötron zırhlama fonksiyonlarını geliştirebilmek adına Gd_2O_3 ve Er_2O_3 bileşikleri ile sırasıyla %5, %10, %20 ve %10 Er_2O_3 -%5 Gd_2O_3 karışık oranlarda olacak şekilde katkılanmıştır.

3.2.3. PLA Filamentlerinin karakterizasyonu ve karşılaşılan zorluklar

Hem üründen hem zamandan tasarruf sağlamak amacıyla seyreltme yolu ile üretim yapılması planlanmıştır. PLA filamentleri üretme sürecinde, ilk aşamada ağırlık oranı %20 olan granüller oluşturulmuştur. Bu granüller daha sonra homojen bir filament dağılımı elde etmek için %10 ve %5 oranlarında polimerlerle seyreltilmiştir. Saf PLA filamentlerinin üretimi sırasında süreç sorunsuz ilerlemiş; ancak ekstrüzyon sırasında PLA karışımına Er_2O_3 eklendiğinde zorluklar ortaya çıkmıştır. Bu zorluklar, malzemenin makine kafasından ekstrüzyonunda yaşanan sorunlar ve üründe belirgin bir kırılma olarak kendini göstermiştir. Örneğin, %90 PLA ile %10 Er_2O_3 birleştirilip bu karışım ekstrüzyon makinesine verildiğinde, ortaya çıkan filament formda düzensizlikler görülmüş ve kırılma eğilimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu zorlukları gidermek için ekstrüzyon sıcaklığı 10 derece düşürülmüştür. Sonrasında karışım %80 PLA, %10 bağlayıcı (Termoplastik Poliüretan ve Etil Vinil Asetat) ve %10 Er_2O_3 olarak değiştirilmiştir. İlk sonuçlar tatmin edici olmamış ve ürün kırılma eğilimine sahip olmuştur. Bunun üzerine bağlayıcı oranı artırılmış ve sıcaklık 5 derece daha düşürülmüştür. Tüm bu çabalara rağmen %20 katkılı kompozit malzemenin filamente

dönüştürülmesi kırılganlıklar, makineden homojen bir ekstrüzyonun alınamaması sebebiyle gerçekleştirilememiştir.

Yapılan gözlemlerin sonucunda Er_2O_3 'in PLA'nın moleküler bütünlüğünü olumsuz yönde etkilediği ve polimerin kendine has özelliklerini değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Bu durum, filament ekstrüzyon sürecindeki zorluklardan anlaşılmaktadır. Bazı durumlarda filament ekstrüzyona girmezken, diğerlerinde aşırı kırılganlık sergilemiştir.

Bunun tam aksine, Gd_2O_3 katkılı filamentlerin üretiminde çok az sorunla karşılaşmıştır. Değişen Gd_2O_3 katkı oranları ile yapılan diğer denemeler sonucunda, katkının PLA ile uyumluluğu doğrulanmış ve yüksek kaliteli filamentler elde edilmiştir.

Bununla birlikte, Er_2O_3 ve Gd_2O_3 PLA ile birleştirildiğinde, üretilen filamentin fiziksel yapısı yoğun akışkan olmuş ve bu filament oluşumunu zorlaştırmıştır. Ayrıca elde edilen filamentlerin çıktısı 1,55mm- 1,98mm arası değişen çap aralığına sahiptir. Bu da ticari olarak piyasada bulunan filamentler ile örtüşmektedir.

3.3. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen metal tozları ile katkılanmış kompozit polimer malzemeler, gama radyasyonu zırhlama etkinliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayan deneysel testlere tabi tutulmuştur. Üretilen polimer kompozit malzemelerin yoğunluklarının tespit edilebilmesi için Arşimet yöntemi tercih edilmiş ve radyasyona maruz bırakıldıkları testler HPGe (Yüksek Safılıkta Germanyum) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Numunelerin hazırlanması

Bu tez çalışmasında filament üretimi hizmet alımı yoluyla Kayseri Erciyes Üniversitesi himayesinde bulunan Erciyes Üniversitesi Nano Teknoloji Araştırma Merkezi (ERNAM) tarafından Tablo 3.2'de bulunan değerler baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Satın alınan PLA granülleri ve Er_2O_3 ekstrüder makinasına verilmeden karıştırılmasına Şekil 3.4'te yer verilmiştir. Bu granüller satın alınan 890 nanometre Er_2O_3 ve 95 nanometre Gd_2O_3 tanecik boyutlarındaki tozlar ile %5, %10 ve %20 oranlarında katkılanmak suretiyle filament üretimleri gerçekleştirilmiştir. Metal tozların resmi Şekil 3.5'te yer verilmiştir.



Şekil 3.4 PLA granülleri ve nano boyuttaki Er_2O_3 tartımı

Er_2O_3 ve Gd_2O_3 nano tozları “Nanografi Nano Technology” firması aracılığı ile temin edilmiş olup firmanın belirttiği üzere metal tozlarının saflıkları %99,99 olarak bilinmektedir.



Şekil 3.5 1) Er_2O_3 ve 2) Gd_2O_3 nano boyutta metal tozu

Tablo 3.2’de üretilen polimer kompozit numunelerin Er_2O_3 ve Gd_2O_3 kütlece yüzde katkı oranlarına yer verilmiştir. Bu katkı oranları %5, %10 ve %20 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2 Kompozit malzemenin yüzde katkı oranları

Polimer Matris Yüzdesi (%)	Nano Toz Katkı Yüzdesi (%)	
PLA	Er ₂ O ₃ (Erbiyum Oksit)	Gd ₂ O ₃ (Gadolinium Oksit)
100	-	-
95	5	-
95	-	5
90	10	-
90	-	10
85	10	5
85	5	10
80	20	-
80	-	20

ERNAM bünyesinde bulunan çift vidalı ekstrüder cihazı kullanılarak kompozit polimer filament üretimi yapılmıştır. Çift vidalı ekstrüder makinaları polimer kompozit malzeme üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu ekstrüder makinası çift vidaya sahiptir ve bu vidalar farklı hızlarda dönerek ileri doğru hareket etmektedir. Bu şekilde polimerin homojen bir şekilde katkı maddesi ile karıştırılması sağlanmaktadır. Çift vidalı ekstrüder makinası malzeme akışını düzenleyerek, malzemenin aniden yükselen viskozitesinden kaynaklanan dalgalanmaları önlemektedir. Bu şekilde üretimin şekil bozuklukları, homojenlik kusuru gibi sorunlardan kaynaklı malzeme üretiminin aksamasındaki ihtimaller giderilmiş olmaktadır.

Kullanılan çift vidalı ekstrüder makinası özelliklerine Tablo 3.3'te yer verilmiştir. Cihaz markası Gülnar Makinedir. Şekil 3.6'da ERNAM'da kullanılan ekstrüder makinası yer almaktadır. Makinada besleme yapıldıktan sonra polimer kompozit bileşenlerinin maruz kaldığı giriş sıcaklığı 100 °C iken filament formuna gelip ekstrüder ucundan çıkış sıcaklığı 200 °C'dir. Ancak Tablo 3.3'te de görülebileceği üzere ayarlanabilir maksimum sıcaklık 300 °C'dir. Dolayısıyla cihaz farklı sıcaklıklarda üretim kolaylığı sağlamaktadır.

Tablo 3.3 ERNAM’da kullanılan ekstrüder makinasının özellikleri

TEKNİK ÖZELLİKLER		GM TWIN 16/40
VİDA ÇAPI	mm	16
KOVAN UZUNLUĞU	L/D	40
VİDA HIZI	RPM	0-300
KURULU GÜÇ	kW	5,6
SICAKLIK	°C	300
TORK	NM	1x30
MİN. BESLEME	gr/saat	100
MAX. KAPASİTE (PP)	kg/saat	4,5
SOĞUTMA SUYU	lt./dk	1



Şekil 3.6 Çift vidalı ekstrüder cihaz resmi (ERNAM).

Üretim süreci şu sırayla gerçekleşmiştir: İlk olarak, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ağırlık ölçümleri Tablo 3.2'den elde edilen metal tozu katkı yüzdeleri kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra granüller ve metal tozları ekstrüder makinesine verilerek filament oluşumu sağlanmıştır. Bu filamentlerin homojenliğini arttırmak için tekrar granül haline getirilmişlerdir. Takip eden aşamada, bu granüller başka bir ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra makaralara sarılan katkı filamentleri elde edilmiştir. Bu aşamaların şekilsel bir gösterimi Şekil 3.6'da bulunabilir.

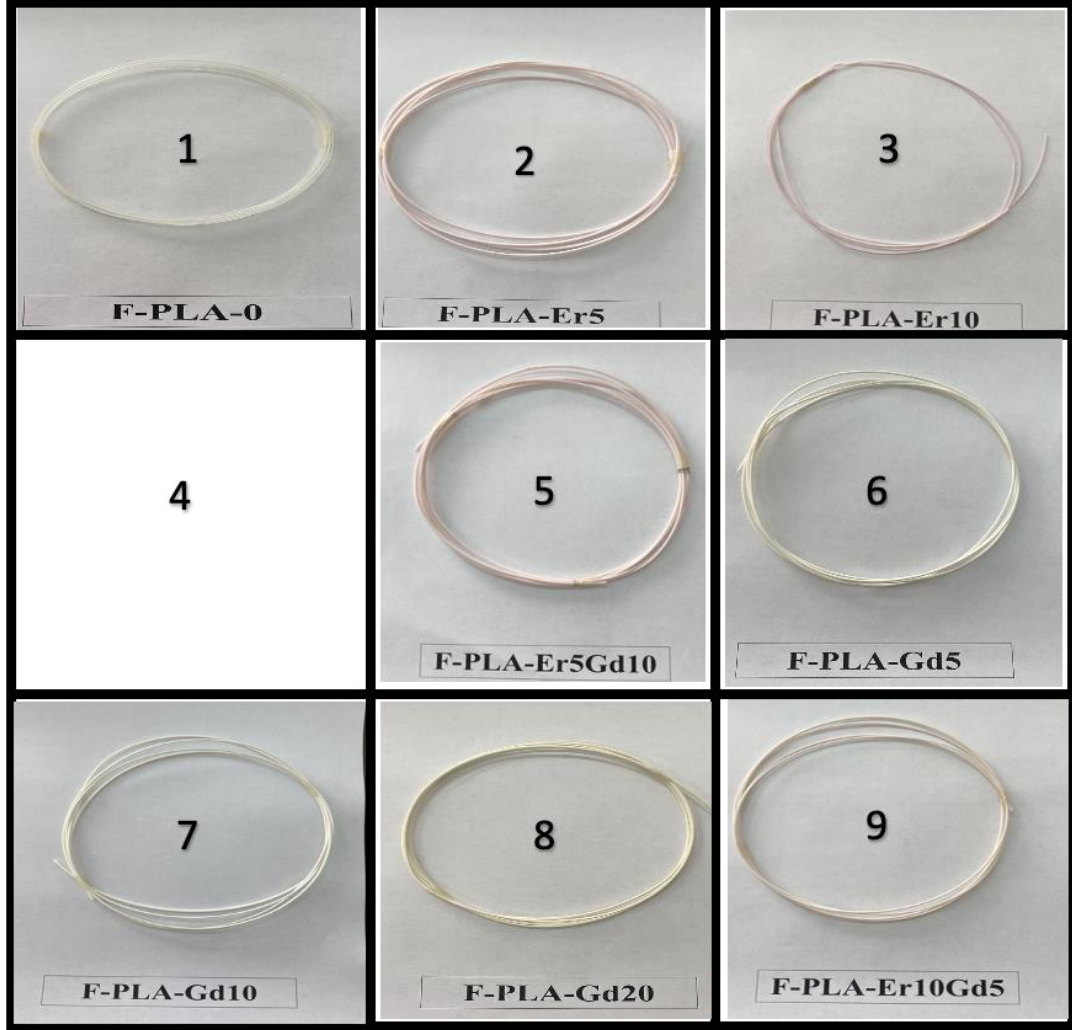


Şekil 3.7 Filamentlerin üretim aşamaları

Ortaya çıkan filamentlerin görsel bir sunumunu sağlayan Şekil 3.7’de PLA polimerinin ve katkı malzemelerinin bileşim aşamaları görülmektedir. Ayrıca üretilen filamentlerin çapları 1,55 mm ile 1,98 mm arasında değişmektedir. Piyasada bulunan filamentlerin tipik olarak yaklaşık 1,75 mm çapa sahip olduğu göz önüne alındığında, bu çalışmada üretilen filamentler ticari uygulanabilirliğe sahiptir.

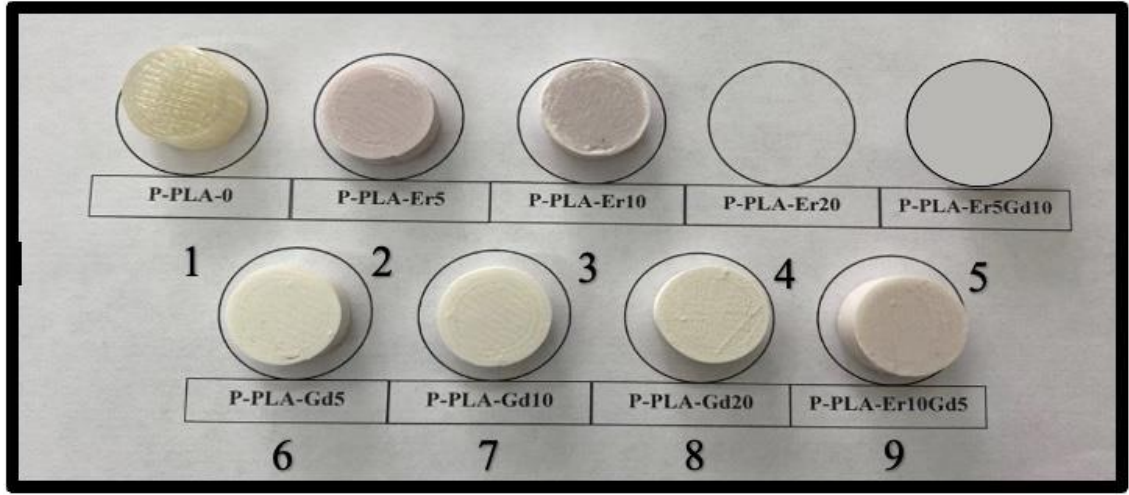
Şekil 3.8’de 3D baskı için hazırlanmış filament serisi gösterilmektedir: F-PLA-0 (saf PLA), F-PLA-Er5 (%5 Er_2O_3 katkılı), F-PLA-Er10 (%10 Er_2O_3 katkılı), F-PLA-Er5Gd10 (%5 Er_2O_3 ve %10 Gd_2O_3 karışımı), F-PLA-Gd5 (%5 Gd_2O_3 katkılı), F-PLA-Gd10 (%10 Gd_2O_3 katkılı), F-PLA-Gd20 (%20 Gd_2O_3 katkılı) ve F-PLA-Er10Gd5 (%10 Er_2O_3 ve %5 Gd_2O_3 karışımı) ve. İdeal olarak, dördüncü filament olan F-PLA-Er20 (%20 Er_2O_3 ile katkı yapılması amaçlanmıştır) dahil edilmiş olması gerekmesine karşın malzemenin yapısındaki bozulmalar nedeniyle üretimi mümkün olmamıştır.

Bu konu ile ilgili detaylı açıklamalara PLA filamentlerinin karakterizasyonu ve karşılaşılan zorluklar başlığında değinilmiştir. Son filament olan dokuz numaralı görselde ise F-PLA-Gd20 (%20 Gd₂O₃ katkılı) filamenti yer almaktadır. Malzemelerin isimlendirilmesi yapılırken malzemeye filament kelimesinin baş harfı olan 'F' harfi kullanılmıştır.



Şekil 3.8 3D yazıcı için üretilen Gd₂O₃ ve Er₂O₃ katkılı filamentler

Şekil 3.8'de gösterilen filamentler kullanılarak, Creality CR-10 Smart Pro 3D Direct Drive Printer üzerinde %100 doluluk sağlamak için makine ayarları kalibre edilerek Şekil 3.9'da gösterilen numuneler baskı almak suretiyle üretilmiştir. Şekilde sergilenen örnekler 'Printed' teriminden türetilmiş bir baş harf olan 'P' harfini taşımaktadır.



Şekil 3.9 3D yazıcı ile üretilen numuneler

Şekil 3.7’de gösterilen numune baskıları sırasıyla şunlardır:

- P-PLA-0 (Saf PLA),
- P-PLA-Er5 (%5 Er_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Er10 (%10 Er_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Er20 (%20 Er_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Er5Gd10 (%5 Er_2O_3 ve %10 Gd_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Gd5 (%5 Gd_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Gd10 (%10 Gd_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Gd20 (%20 Gd_2O_3 katkılı),
- P-PLA-Er10Gd5 (%10 Er_2O_3 ve %5 Gd_2O_3 katkılı).

Tamamlanan numunelerin yoğunlukları sonraki simülasyonlarda kullanılmak üzere hesaplanmıştır. Yoğunluk ölçümleri için Arşimet yöntemi kullanılmıştır. Bu ölçümler sırasında saf su daldırma sıvısı olarak kullanılmış ve yoğunluğu hesaplamalarda 1 g/cm^3 olarak kullanılmıştır.

Basımı tamamlanan numunelerin yoğunlukları eşitlik 3.1 kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\rho = \frac{H}{H-S} \rho_W \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de ifade edilen H değeri numunenin havadaki ağırlığını S ise sudaki ağırlığını ifade etmektedir. ρ_W değeri ise suyun yoğunluğuna karşılık gelmektedir. Bu hesaplama akabinde elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4 Arşimet tekniği kullanılarak ölçülen yoğunluk sonuçları

Numune	P-serisi Yoğunlukları (g/cm ³)
P-PLA-0	1,2271
P-PLA-Er5	1,1923
P-PLA-Gd5	1,1800
P-PLA-Er10	1,1778
P-PLA-Gd10	1,1780
P-PLA-Er10Gd5	1,2399
P-PLA-Er5Gd10	-
P-PLA-Er20	-
P-PLA-Gd20	1,2791

Tablo 3.4'ten de anlaşılacağı üzere baskısı gerçekleştirilen tüm numuneler birbirine yakın yoğunluklarda olmakla birlikte üretim sürecinde filament haline getirmek konusunda zorluklar yaşanan %20 Er₂O₃ katkılı PLA numunesi ve %5 Er₂O₃ + %10 Gd₂O₃ katkılı PLA numunesinin üretimi gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple yoğunlukları hesaplanamamıştır.

3.3.2. SEM ve EDS analizlerinin yapılması

Üretilen numunelerin detaylıca yapısal değerlendirilmesi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) görüntüleme teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizler hizmet alımı yoluyla Karadeniz Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerinde yüksek çözünürlüklü görüntüleme özelliğine sahip, JEOL, JSM-5300 elektron mikroskobu kullanılmıştır.

SEM görüntülemesinden önce her bir numune, altın-paladyum alaşımıyla püskürtme yöntemi kullanılarak kaplandıkları bir hazırlık prosedüründen geçirilmiştir. Denetimli bir şekilde kontrol edilen vakum ortamında uygulanan bu kaplama, numunelerin yüksek kaliteli SEM görüntülemesi için bir ön koşul olarak elektriksel iletken hale getirilmesini sağlamıştır. Daha sonrasında alınan SEM görüntüleri 100 mikrometrelik (µm) bir görüş alanı oluşturacak şekilde büyütülerek görüntüler alınmıştır. SEM görüntüleme tekniğindeki bu detay seviyesi, numunelerin yüzey morfolojisi hakkında detaylı bilgi edinebilmeyi sağlamaktadır. Görüntüleme sonucunda numunelerin bütünlüğünü ve

performansını etkileyebilecek potansiyel çatlaklar, boşluklar veya deformasyonlar da dahil olmak üzere herhangi bir yüzey bozukluğunun varlığını saptamak kolaylaşmaktadır.

Bu tespit sürecinde SEM ile EDS nokta haritalaması da kullanılmıştır. EDS, numunelerin element bileşiminin saptanmasında kullanılan bir tekniktir. EDS nokta haritalama yoluyla katkı maddelerinin numuneler içerisindeki dağılımını tespit etmek mümkün olmuştur.

Katkı maddelerinin bir malzeme matrisi içinde eşit dağılımı büyük önem taşımaktadır. Bu tür bir homojenlik, malzeme numunesi boyunca tutarlı mekanik, termal ve diğer önemli özellikleri sağlar. Dağılımdaki herhangi bir tutarsızlık, malzeme içinde matrisin geri kalanından farklı özellikler sergileyen bölgeler olan lokalize kümelenmelere yol açabilir. Bu kümelenmiş bölgeler, dış kuvvetlere veya uyaranlara maruz kaldıklarında zayıf noktalar veya farklı davranışlara sahip alanlar oluşturabilir. Bu tür sapmalar numunelerin mekanik bütünlüğünü, işlevselliğini ve genel güvenilirliğini ciddi şekilde tehlikeye atabilir.

Teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasında genellikle bir ayrım vardır. Teorik modeller bilgilendirici olmakla birlikte varsayımlara ve ideal koşullara dayanmaktadır. Yani teorik hesaplamalar gerçek dünyadaki tüm değişkenleri dikkate almayabilir. Öte yandan, deneysel sonuçlar ekipman kalibrasyonu, ortam koşulları ve test edilen malzemelerin değişkenliği gibi çeşitli gerçek dünya faktörlerinden etkilenmektedir. Bu nedenle bir malzemenin nasıl bir davranış göstereceğini tam olarak anlamak için hem teorik bilgilere hem de deneysel testlere ihtiyaç vardır.

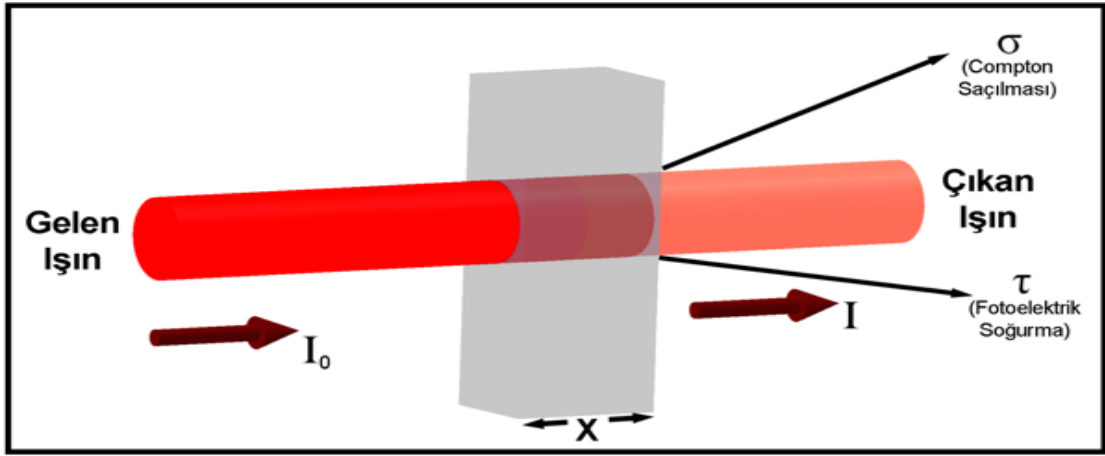
3.3.3. Zırhlama özelliklerinin belirlenmesi

Gama radyasyonu zırhlamasının etkinliğini değerlendirmek için kompozit malzemelerin bazı parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle, μ ve μ/ρ değerleri zırhlama performansını değerlendirmek için oldukça önemlidir. Bu parametrelerin hesaplanmasına yönelik matematiksel ifadeler Bölüm 2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

μ değerinin birimi cm^{-1} dir. Lambert-Beer yasasını açıklamak için geliştirilen eşitlikte yer alan I_0 zırh malzemesi üzerine düşen radyasyonun şiddetini ifade etmektedir (O'Donnell ve Sangster, 1970). Bahsi geçen terimler Şekil 3.10'da yer almaktadır.

μ değeri, bir malzemenin γ radyasyonuna karşı etkinliğinin bir göstergesi olarak tanımlanabilir. Esasen, daha yüksek bir μ değeri daha etkili bir zırhlama malzemesi anlamına gelmektedir. Muhtemel zırh malzemesinin yoğunluğu bilindiğinde, kütle zayıflatma katsayısı, lineer zayıflatma katsayısının bu yoğunluğa bölünmesiyle elde

edilebilir. Sonuç olarak, kütle zayıflatma katsayısı için birim cm^2/g 'dır. Bu birimden de anlaşılacağı üzere μ/ρ yoğunluktan bağımsız bir parametredir (Dilsiz, vd., 2021)

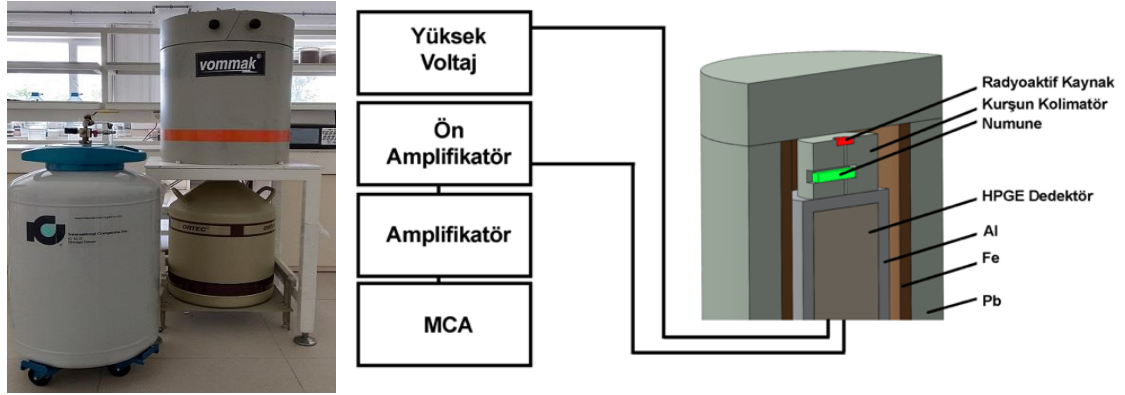


Şekil 3.10 Gelen ışının madde ile etkileşimi (Dilsiz, vd., 2021)

YDK (Yarı Değer Kalınlığı) ve MFP (Ortalama Serbest Yol) değerleri de dahil olmak üzere diğer radyasyon zırhlama parametrelerine ilişkin ayrıntılı formülasyonlar ve kapsamlı tartışmalar bu tezin ikinci bölümünde yer almaktadır. Bu tür parametreler, seçilen bir malzemenin RKV değerine ilişkin genel bir bakış sağlar. İncelenen malzemenin etkin atom numarası (bu bağlamda genellikle " Z_{etk} " olarak anılacaktır), N_e ve RKV gibi parametrelerin değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

Üretilen polimer kompozit malzemelere ilişkin yukarıda bahsedilen radyasyon zırhlama parametrelerinin deneysel olarak türetilmesi için, HPGe dedektörü ile belirli noktasal radyasyon kaynakları seçilmiştir. Ölçüm aşamasında ^{241}Am (59.5 keV), ^{133}Ba (80.9, 276.3, 302.8, 356.0 ve 383.8 keV), ^{22}Na (511.0 ve 1274.5 keV), ^{137}Cs (661.6 keV) ve ^{60}Co (1173.2 ve 1332.5 keV) gibi çeşitli noktasal gama kaynakları kullanılmıştır. Bu noktasal kaynakların kullanımı esnasındaki aktiviteleri sırasıyla 0,99 μCi (Am-241), 0,832 μCi (Ba-133), 0,505 μCi (Na-22), 0,2355 μCi (Cs-137), 0,716 μCi (Co-60)'dir. Radyasyon yoğunluğu değerlerini (hem I hem de I_0) tespit etmek için dedektör, numunenin hem varlığında hem de yokluğunda 1000 saniye süreyle sayımlar yapmıştır. Bu sayımlardan elde edilen spektrumlar MAESTRO yazılımı ile incelenmiş ve böylece hazırlanan kompozit malzemeler için gama radyasyonu zırhlama parametreleri elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmalarda kullanılan HPGe dedektör düzeneğinin bir görüntüsü Şekil 3.11de bulunabilir.

Gama zırhlama parametrelerini belirlemek için kullanılan HPGe dedektörünün detaylı teknik özelliklerine ise Tablo 3.5’te yer verilmiştir.



Şekil 3.11 HPGe dedektörü düzeneği

Tablo 3.5 HPGe dedektörünün detaylı teknik özellikleri

Teknik özellikler	
Marka	ORTEC
Model	GEM40P4-83
Aralık	40 keV - 10 MeV
Verim	40%
Çözünürlük	1,85 keV / 1.33 MeV (^{60}Co – FWHM)

3.4. Simülasyon Çalışmaları

Nano boyutlu Gd_2O_3 ve Er_2O_3 metal tozları ile katkılanmış PLA polimer kompozit malzemelerin gama ve nötron radyasyonlarına karşı zırhlama kabiliyetlerini araştırmak için simülasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu bağlamda simülasyon, sadece atomik ve moleküler ölçeklerdeki karmaşık etkileşimlere bakmak için bir fırsat sunmakla kalmaz, aynı zamanda deneysel verileri teorik modellerle doğrulamak, karşılaştırmak ve ilişkilendirmek için bir imkân sağlamıştır. Deney ve simülasyon arasındaki uyum, malzemelerin performanslarının bütünsel olarak anlaşılmasını sağlayan sağlam bir dayanak görevi görmektedir.

3.4.1. Monte Carlo kodları ve deterministik hesaplama araçları kullanımı

Monte Carlo yöntemi, özellikle karmaşık analitik çözümler gerektiren kompleks matematiksel problemlerle karşılaşıldığında, istatistiksel simülasyonlar alanında çok önemli bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel olarak Monte Carlo yöntemi, olasılıksal simülasyonlar kullanarak doğrudan analitik çözümleri atlamak için bir yol sunmaktadır. Tekil, deterministik bir sonucu tanımlamak yerine, yöntem çok sayıda potansiyel sonucu araştırır ve bir dizi olası sonucu kapsayan bir dağılım oluşturur. Monte Carlo programlarının göze çarpan bir özelliği, parçacık etkileşimlerini simüle etmedeki maharetleridir. Olasılıklı senaryoları göz önünde bulundurma yeteneğine sahip olan bu programlar, çeşitli malzemelerden geçen parçacıkların potansiyel yörüngelerini titizlikle izleyebilir. Bu tür ayrıntılı modelleme, karmaşık yapıların etkileşimleri ve davranışları hakkında ayrıntılı bilgiler sağlar.

Tekniğin özü büyük ölçüde rastgele sayıların kullanımına dayanır. Pehlivan (2019) ve Karaman (2013) tarafından bahsedildiği üzere, Monte Carlo yönteminin becerisi çok yönlü problemleri incelerken ortaya çıkmaktadır. Yöntem, her biri benzersiz bir rastgele sayı dizisi tarafından yönetilen farklı senaryoları simüle ederek, zorlukların sistematik olarak daha izlenebilir bileşenlere ayrıştırılmasına olanak tanır.

Monte Carlo yöntemi zaman içinde parçacık fiziği ve radyasyon transport mekanizmaları çalışmalarında önemli bir yer edinmiştir. Olasılıksal simülasyonlardaki temelleri göz önüne alındığında, bu teknik, bu alanlarda ortaya çıkan karmaşık zorlukların üstesinden gelmek için kullanılmaktadır. Monte Carlo yönteminin en kayda değer uygulamalarından biri, gama radyasyonu soğurma senaryolarının anlaşılmasında kullanılmasıdır. Genellikle Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift üretimi gibi süreçleri kapsayan gama ışınlarının madde ile etkileşimleri, bu tür simülasyonlar ile detaylı şekilde incelenebilmektedir.

Nötronların madde ile etkileşimi söz konusu olduğunda ise hem elastik hem de elastik olmayan saçılma tesir kesitlerinin, nötron yayılımlarının ve etkin uzaklaştırma tesir kesiti gibi alakalı diğer parametrelerin hesaplanması Monte Carlo simülasyonlarının yardımıyla daha kolay hale gelmektedir.

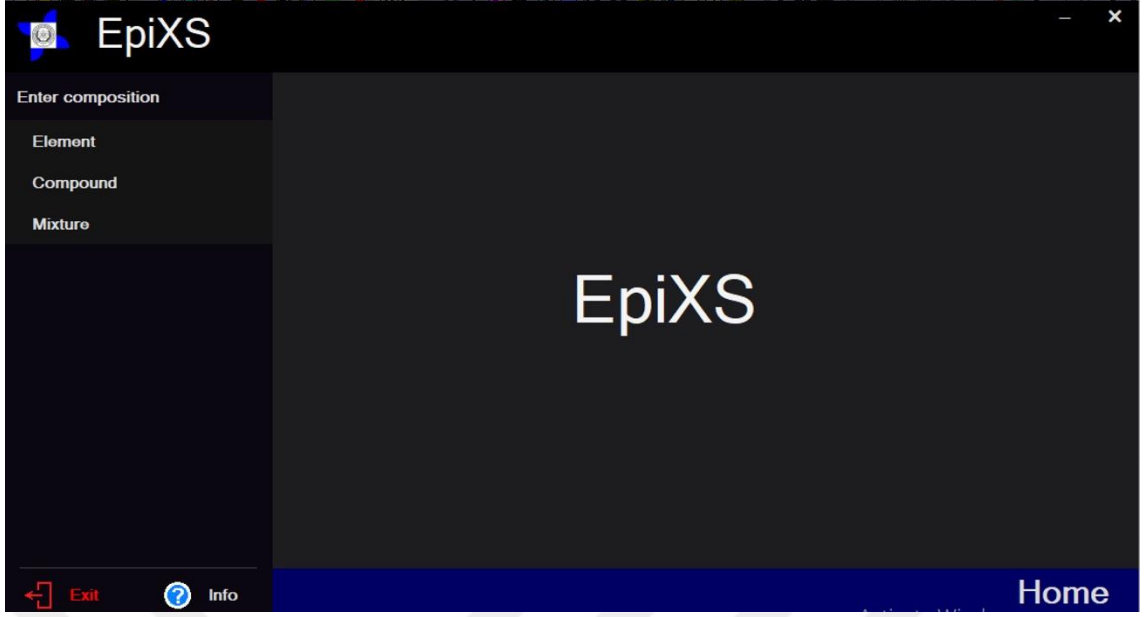
Monte Carlo tekniği ile kullanılan rastlantısal yaklaşım, radyasyonun malzemelerden geçerken izlediği yörüngelerin ve etkileşimlerin derinlemesine anlaşılmasını mümkün kılmaktadır. Radyasyon-madde etkileşimlerinin çok yönlü doğası ve ortaya çıkabilecek sayısız süreç dikkate alındığında, klasik matematiksel yöntemler genellikle

uygulanabilirlik sınırlarına ulaşır. Buna karşılık Monte Carlo yöntemi, geleneksel analitik tekniklerin katılığı ve kısıtlamalarını atlayarak daha uyarlanabilir bir yaklaşım sunar. Monte Carlo yöntemi sadece bir alternatif değil, aynı zamanda radyasyon yayılımı ve etkileşim olaylarının modellenmesi ve anlaşılması ile ilgili uzun süredir devam eden zorluklara karşı tercih edilen bir çözümdür (Bozkurt, 2015). Monte Carlo tekniği esasen, parçacıkların ve dalga tipi radyasyonların yörüngesinin ve madde ile etkileşimlerinin olasılıksal olarak belirlendiği ve bunların simüle edilmesi yoluyla analizin gerçekleştirilmesi ilkesine dayanmaktadır.

Bununla birlikte, yöntemin doğasında bulunan rastgelelik, güçlü yanı olmakla birlikte, çıktıda bir dalgalanma kaynağı da teşkil edebilmektedir. Bu rastlantısal nitelik genellikle önemli hesaplama gereksinimlerine yol açmakta ve gelişmiş bilgisayarlar ve özel Monte Carlo yazılımlarında bile hesaplama sürelerinin uzamasına neden olabilmektedir. Yıllar geçtikçe, araştırmacılar bu dalgalanmaları azaltmayı ve yöntemin çıktısını daha da iyileştirmeyi amaçlayan özel teknikler geliştirmişlerdir (Karaman, 2013).

Temel düzeyde Monte Carlo yöntemi, rastgele sayıların üretilmesiyle çalışmaktadır. Bu sayılar 0 ile 1 arasında yer alır ve sonraki simülasyonlarda seçilme olasılıkları farklıdır. İdeal olarak, her sayı eşit bir seçilme olasılığı gösteriyorsa, toplu tekdüze bir dağılıma sahip olarak tanımlanabilir. Bu simülasyonların çalıştığı ölçek göz önüne alındığında, genellikle çok sayıda rastgele sayı gerektirdiğinden, hesaplama desteği vazgeçilmez hale gelir (Pehlivan, 2019).

Aralarında MARS, MCNP, GEANT4 ve FLUKA'nın da bulunduğu çeşitli yazılım araçları Monte Carlo tekniğinden faydalanmaktadır. Her birinin kendine özgü bir alanı olsa da, hepsi ortak temel ilkelere sahiptir. Bu araçlar ENDIF, JNDL ve ENEA CLES gibi kapsamlı veri kütüphanelerinden yararlanarak derinlemesine radyasyon ile madde etkileşimi çalışmalarını kolaylaştırmaktadır (Aygün, 2015)



Şekil 3.12 EpiXS programının arayüz görüntüsü

Bu tez kapsamında, gama zırlama araştırmalarında sıklıkla tercih edilmesi nedeniyle teorik değerlendirmeler için WinXCOM programı (Kumar vd., 2018) kullanılmıştır. WinXCOM'dan elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemek için elde edilen sonuçlar EpiXS'ten elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. WinXCOM sorunsuz bir şekilde çalışsa da karşılaştırmalı bir analiz sonuçların genel olarak güvenilir olduğunu desteklemiştir. Hem WinXCOM hem de EpiXS, kendi iç kütüphanelerindeki element verilerini kullanarak malzemeler için μ/ρ değerini hesaplamada başarı göstermektedir. EpiXS programının arayüz görüntüsü Şekil 3.12'de sunulmaktadır.



Element/Compound/Mixture Selection

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:

[Help](#)

Identify material by:
☐ Element
☐ Compound
☒ Mixture

Method of entering additional energies: (optional)
☒ Enter additional energies by hand
☐ Additional energies from file (Note: Your browser must be file-upload compatible)



Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:						
H2O 0.9 NaCl 0.1						
Note: Weights not summing to 1 will be normalized.						
<table><tr><td>C 85.2623</td></tr><tr><td>H 8.1891</td></tr><tr><td>N 6.6286</td></tr></table>		C 85.2623	H 8.1891	N 6.6286		
C 85.2623						
H 8.1891						
N 6.6286						
Optional output title: M-ABS-0						
Graph options:	Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)					
☒ Total Attenuation with Coherent Scattering	Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.					
☐ Total Attenuation without Coherent Scattering	<table><tr><td>0.0595</td></tr><tr><td>0.0889</td></tr><tr><td>0.2763</td></tr><tr><td>0.3028</td></tr><tr><td>0.356</td></tr></table>	0.0595	0.0889	0.2763	0.3028	0.356
0.0595						
0.0889						
0.2763						
0.3028						
0.356						
☐ Coherent Scattering	☐ Include the standard grid					
☐ Incoherent Scattering						
☐ Photoelectric Absorption						
☐ Pair Production in Nuclear Field						
☐ Pair Production in Electron Field						
☐ None						
	Energy Range:					
	Minimum: 0.001 MeV					
	Maximum: 100000 MeV					

Şekil 3.13 WinXCOM programının arayüz görüntüsü

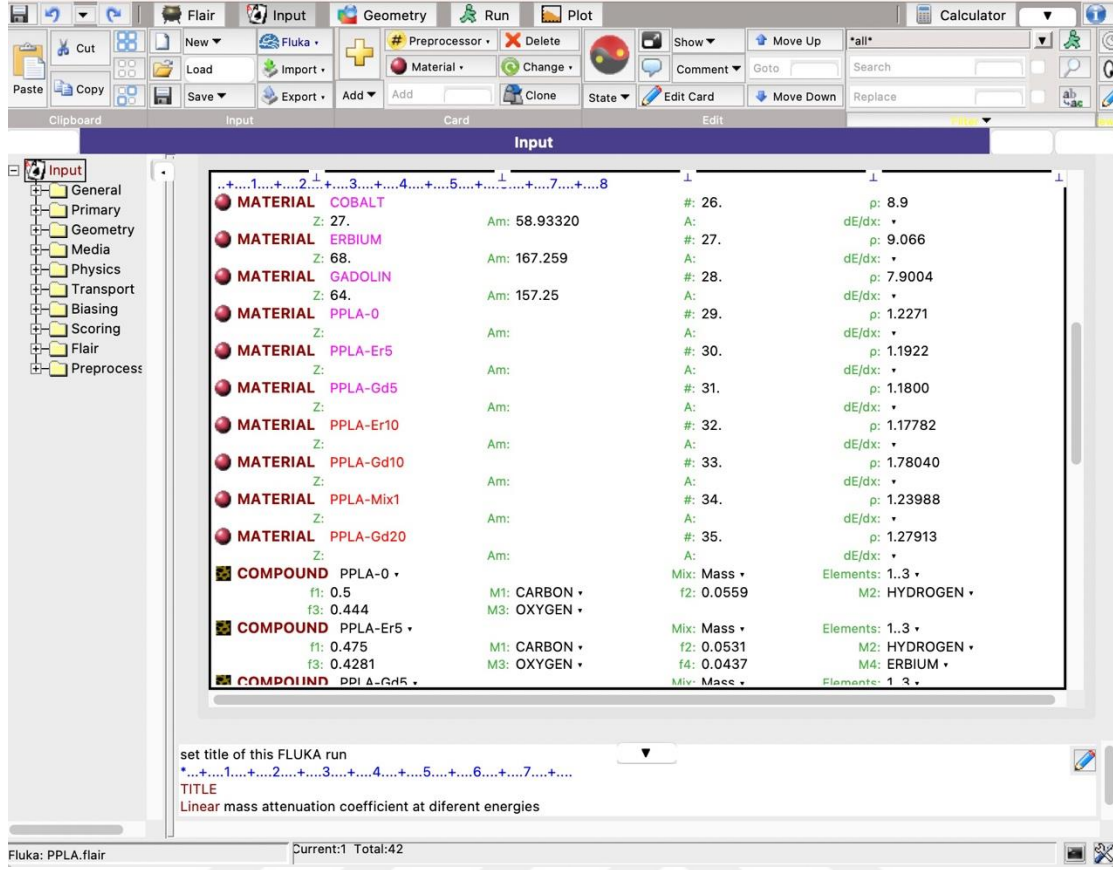
WinXCOM programı, karmaşık hesaplamaları hassas bir şekilde kolaylaştırmak için tasarlanan arayüzü, kullanıcı dostu bir deneyim sunarak verimli veri girişine ve sonuçların net bir şekilde görselleştirilmesine olanak tanımaktadır. WinXCOM programının arayüzünün düzeni ve işlevsel unsurları gösteren ekran görüntüsü Şekil 3.13'te görülebilir.

Tablo 3.6 Kompozit malzemelerin içerdği elementlerin yüzdeleri

Malzeme (Kodu)	Hazırlanan PLA Kompozitlerinin Kimyasal İçerikleri (%)					
	C	H	O	Er	Gd	TOPLAM
PLA-0	50,0012	5,5946	44,4042	0,0000	0,0000	50,0012
PLA-Er5	47,5011	5,3149	42,8114	4,3726	0,0000	47,5011
PLA-Gd5	47,5011	5,3149	42,8473	0,0000	4,3367	47,5011
PLA-Er10	45,0011	5,0351	41,2186	8,7452	0,0000	45,0011
PLA-Gd10	45,0011	5,0351	41,2904	0,0000	8,6734	45,0011
PLA-Er10Gd5	49,9000	5,6000	39,2000	4,4000	1,3000	49,9000
PLA-Er5Gd10	49,9000	5,6000	39,5000	2,2000	2,8000	49,9000
PLA-Er20	40,0009	4,4757	38,0327	17,4905	0,0000	40,0009
PLA-Gd20	40,0009	4,4757	38,1767	0,0000	17,3467	40,0009

WinXCOM'a girilen kompozit malzemelerin spesifik element bileşimleri Tablo 3.6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Radyasyon araştırmalarının çok disiplinli yapısı içinde, ileri düzeyde hesaplama araçlarına duyulan ihtiyaç son derece önemlidir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında gama ve nötron radyasyonu karşısında üretilen kompozit polimer malzemelerin radyasyon mukavemetinin tespiti için FLUKA programı Monte Carlo metodu ile çalışması nedeniyle tercih edilmiştir. FORTRAN altyapısı ile desteklenen FLUKA programı, zırh malzemesi tasarımı, elektron hızlandırıcıları için hedef tasarımı, yüksek enerji fiziği ve kozmik ışın çalışmalarından dozimetri, radyasyondan korunma, tıbbi fizik ve radyobiyojiye kadar sayısız alanda yaygın olarak kullanılan bir araçtır (Karaman, 2013) FLUKA'yı diğerlerinden ayıran özelliği, çok çeşitli parçacık ve dalga tipi radyasyonun madde ile etkileşimlerini simüle etme konusundaki kabiliyetidir. Termal ve düşük enerjili nötronların, ağır iyonların, protonların ve elektronların etkileşimini 1 keV-1000 TeV enerji aralığında gerçekleştirebilmektedir. FLUKA'nın dikkat çeken özelliklerinden biri de beraberindeki arayüz programı Flair'dır. Daha kolay bir kullanıcı deneyimi sağlayan Flair, FLUKA'da gerçekleştirilen hesaplamalara dayalı grafiksel gösterimler ve veri çözümlemeleri sunmaktadır (Aygün, 2015). İşbu tez çalışmasında kullanılan Flair arayüzünün ekran görüntüsü Şekil 3.14'te sunulmaktadır.



Şekil 3.14 FLUKA/Flair programının ara yüzü ve input dosyasının görünümü

FLUKA programında birden çok çeşitte dedektör kullanılmaktadır. Programın içerisinde bulunan kartlara çalışılmak istenilen bölgenin hacmi, parçacıkların oluşturduğu akı değerleri, hangi parçacıkların kullanıldığı gibi parametreler için dedektör kartları bulundurmaktadır (Pehlivan, 2019).

Tez çalışması kapsamında kompozit malzemelerin gama ve nötron radyasyonları karşısındaki etkinliğini belirleyebilmek için GEANT4 simülasyon programı da kullanılmıştır. GEANT4 (GEometry ANd Tracking) programı Monte Carlo yöntemi ile radyasyonun madde ile saçılma ve soğrulma gibi etkileşimlerini ve malzeme içerisinde kat edilen menzili simüle edebilen bir yazılım programıdır (Özge, 2019)

GEANT4 programı çeşitli alanlarda sayısız işleve yönelik kullanılmaktadır. Parçacık fiziğinde, hızlandırıcılardaki deneysel kurulumları modellemekte ve dedektör tasarımlarını performans ve parçacık izleme analizi için simüle etmektedir. Nükleer enerjide GEANT4, radyasyonun madde üzerine etkilerinin analiz edilmesine, nötron ve gama radyasyonlarının özelliklerinin incelenmesine, reaktör tasarımına ve radyasyona

maruz kalma dozu hesaplamalarına yardımcı olarak nükleer tesis güvenliğinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, sağlık fiziğinde, görüntüleme sistemlerinde, hasta tedavileri için dozimetride ve radyoterapi cihazlarının değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır.

Simülasyonları başlatmak için, malzemelerin GEANT4'te element, bileşik veya karışım olup olmadıklarına göre tanımlanması gerekir; bu da doğru hesaplamalar için atom numaraları veya ağırlık oranları gibi özel bilgiler içerir. GEANT4'ün çalıştırılması, 'Dedecor Construction.cc' dosyasında malzemeye özgü özellikler ve 'Primary Generator Action.cc' dosyasında radyasyon nitelikleri dahil olmak üzere simülasyon için temel ayrıntıları içeren 'src' klasörüyle birlikte bir dizi dosya kullanılmasını gerektirir (Aygün, 2015; Kaya, 2021).

GEANT4 simülasyon programı için oluşturulan “DetectorConstruction.cc” dosyası Şekil 3.15'te görülebileceği üzere ilk adım olarak kullanılacak materyalin içerdiği elementlerin isimleri, sembolleri, atom numaraları ve atomik yoğunlukları (gram/mol cinsinden) girilmesi yoluyla oluşturulmuştur.

```
G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", z= 1., a= 1.01*g/mole);
G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z= 7., a= 14.01*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", z= 8., a= 16.00*g/mole);
G4Element* Na = new G4Element("Sodium", "Na", z=11., a= 22.99*g/mole);
G4Element* C = new G4Element("Karbon", "C", z=6., a= 12.01*g/mole);
G4Element* Ge = new G4Element("Germanium", "Ge", z=32., a= 72.59*g/mole);
G4Element* I = new G4Element("Iodine", "I", z=53., a= 126.90*g/mole);
G4Element* Bi = new G4Element("Bismuth", "Bi", z=83., a= 208.98*g/mole);
G4Element* Er = new G4Element("Erbium", "Er", z=68., a= 167.20*g/mole);
G4Element* Gd = new G4Element("Gadolinium", "Gd", z=64., a= 156.9*g/mole);
G4Element* Pb = new G4Element("Kurşun", "Pb", z=82., a= 207.2*g/mole);
```

Şekil 3.15 GEANT4 DedecorConstruction.cc dosyasında tanımlanan elementler

Her iki simülasyon programında da belirli enerji aralıklarına sahip bir dizi γ ışını kompozit numunelere gönderilmiştir. Simülasyonlar, bu ışınların malzemelerden geçerken gösterdiği zayıflamayı takip ederek Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkılı PLA kompozitlerinin gama radyasyonuna karşı zırhlamada ne kadar etkili olduğuna dair veriler sağlamıştır. Bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar daha sonra kompozitlerimizin performansını test edebilmek için standart bir zırhlama malzemesi olan kurşun bloğun bilinen zayıflatma özellikleriyle mukayese edilmiştir.

Simülasyonların ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması, Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkılı PLA kompozitlerinin alternatif gama radyasyonu zırhlama malzemesi olarak potansiyeline ilişkin öngörü sağlamaktadır.

Tez çalışması kapsamında olması sebebiyle, γ radyasyonuna karşı etkinliklerinin simüle edildiği gibi nötronların da üretilen polimer kompozit malzemeler ile etkileşiminin anlaşılabilmesi ve etkinliğinin belirlenebilmesi adına GEANT4 ve FLUKA programları yoluyla simülasyonlar ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Amaç, nötron incelemeleri için gama zırhı olarak uygun olan seçilmiş kompozit malzemelerin nötron zırhı için de uygun olup olmadığını belirlemektir. Teorik değerlendirmeler etkin nötron tesir kesitlerinin hesaplanmasını içermektedir. Etkin nötron tesir kesiti arttıkça, malzemenin nötron zırhlama özelliği artmaktadır. Bu hesaplamaların ardından, Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkılı PLA kompozit malzemeden elde edilen sonuçlar, nötron zırhlamada kullanılan geleneksel kurşun bloklarla karşılaştırılmıştır.

Üretilen numunelerin nötron zırhlama kabiliyetleri GEANT4 ve FLUKA programları kullanılarak yapılan simülasyonlarla değerlendirilmiştir. FLUKA'nın nötron simülasyonlarında kullanılmasının esas amacı GEANT4 ile ulaşılan sonuçların doğruluğunun teyit edilebilmesidir.

GEANT4'te Hadr03 paketi kullanılırken, FLUKA ile gerçekleştirilen simülasyonlarda nötron zırhlama hesaplamalarında Flair arayüzü kullanılmıştır. Her biri 4,5 MeV enerjiye sahip ve sayıları 10 milyonu bulan nötronlar, malzemelere yönlendirilerek geçebilecekleri sayı tespit edilmiştir. Sonuçlar daha sonra standart bir kurşun blok ile karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirme, nötron enerjisinin bir aralıkta değiştirilmesiyle genişletilmiştir: 0.1 MeV, 0.5 MeV, 1 MeV, 3 MeV, 4.5 MeV, 6 MeV ve 10 MeV, bu farklı enerji seviyelerinde malzemeden geçebilen nötronların sayısını ayırt etmeyi amaçlamaktadır.

Son bir değerlendirmede, 4,5 MeV nötron enerjisi korunurken, malzeme kalınlığı 2 mm'lik artışlarla 1 mm'den 19 mm'ye kadar bir aralıkta değiştirilmiştir. Amaç, bu değişen kalınlıklara nüfuz edebilecek nötron sayısını belirlemektir. Bu sonuçlar daha sonra kıyaslama yapabilmek için kurşun blok ile karşılaştırılmıştır.

3.4.2. Simülasyon çalışmalarının araştırmadaki rolü ve önemi

Simülasyonların avantajı, gerçek dünya senaryolarını kontrollü bir şekilde bilgisayar ortamında yeniden oluşturabilme kapasitesidir. Bu sadece sonuçların tahmin edilmesine yardımcı olmakla kalmamakta, aynı zamanda özellikle doğrudan gözlemin karmaşık ve

potansiyel olarak tehlikeli olabileceği radyasyon fiziki gibi alanlarda etkileşim mekanizmalarının belirlenmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, GEANT4 ve FLUKA gibi tanınmış yazılım araçlarını kullanarak, Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkılı PLA kompozitleri gibi yeni malzemelerin davranışını, bu durumda kurşun blok gibi yerleşik standartlarla karşılaştırmak mümkün hale gelmektedir. Bu tür karşılaştırmalar, yeni malzemelerin göreceli olarak etkinliklerini değerlendirmek için bir kıyaslama ölçütü sunmak bakımından oldukça önemlidir.

Üretilen polimer kompozit malzemelerin özellikle nötron radyasyonuna maruz bırakılmasının deneysel olarak mümkün olmadığı bu tez çalışmasında nötronların enerjisi veya kompozit numunenin kalınlığı gibi parametreleri ayarlamak simülasyon ortamında oldukça kolay şekilde gerçekleştirilebilmiştir Dolayısıyla çeşitli senaryoların hızlı bir şekilde incelenmesine olanak tanıyarak kompozitlerin farklı koşullar altında nasıl tepki verdiğinin etraflı bir şekilde anlaşılmasını sağlar.

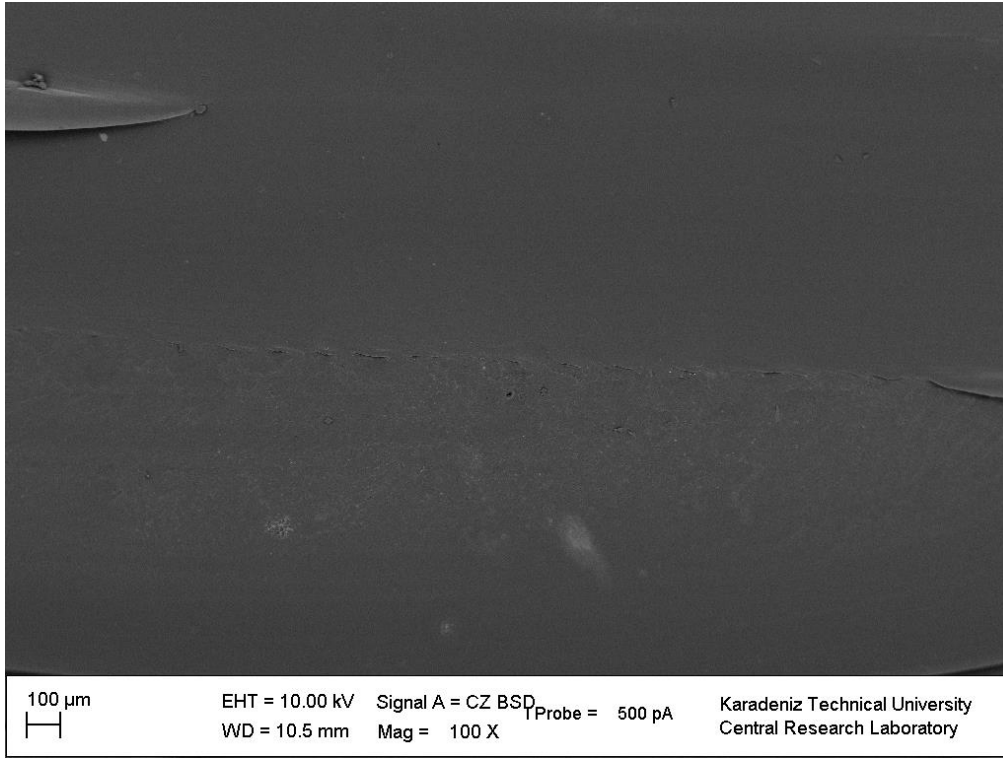
4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen PLA filamentlerinin saf ve farklı oranlarda Gd_2O_3 ve Er_2O_3 bileşikleri ile katkılanarak 3D yazıcı ile 'P' serisinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim süreci sonucunda PPLA-0, %5 Er_2O_3 katkılı P-PLA-Er5, %5 Gd_2O_3 katkılı P-PLA-Gd5, %10 Er_2O_3 katkılı P-PLA-Er10, %10 Gd_2O_3 katkılı P-PLA-Gd10, %10 Er_2O_3 ve %5 Gd_2O_3 katkılı P-PLA-Er10Gd5 ve son olarak %20 Gd_2O_3 katkılı P-PLA-Gd20 polimer kompozit malzemeler imal edilebilmiştir. Hedeflenen numune sayısı 9 iken üretimi gerçekleştirilebilen numune sayısı 7 olmuştur. Üretilen numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet metodu kullanılarak oda sıcaklığında, üretim sırasıyla aynı olacak şekilde P-PLA-0 için $1,2271 \text{ g/cm}^3$ P-PLA-Er5 için $1,1923 \text{ g/cm}^3$ P-PLA-Gd5 için $1,1800 \text{ g/cm}^3$ P-PLA-Er10 için $1,1778 \text{ g/cm}^3$ P-PLA-Gd10 için $1,1780 \text{ g/cm}^3$ P-PLA-Er10Gd5 için $1,2399 \text{ g/cm}^3$ ve P-PLA-Gd20 için $1,2791 \text{ g/cm}^3$ hesaplanmıştır.

Hesaplama sonucundan da anlaşılabacağı üzere yoğunluğu en yüksek numune P-PLA-Gd20 iken yoğunluğu en düşük numune ise P-PLA-Er10 olmuştur. Daha sonra üretimi gerçekleştirilen bu numunelerin SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Bu bölümün devamında hem deneysel hem de simülasyon programları ile gerçekleştirilen hesaplamalara ait bulgular ayrıntılı şekilde açıklanacaktır.

4.1.SEM ve EDS Analizleri

3D baskı aracılığıyla üretilen numunelerin yüzey görünümü Şekil 4.1 ve 4.2’de yer almaktadır. Görüntülemeler SEM analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Katkısız olarak üretimi gerçekleştirilen PLA-0 numunesinin iki farklı tabakanın birleşimi şeklinde oluşum SEM görüntüsü Şekil 4.1’de yer almaktadır.

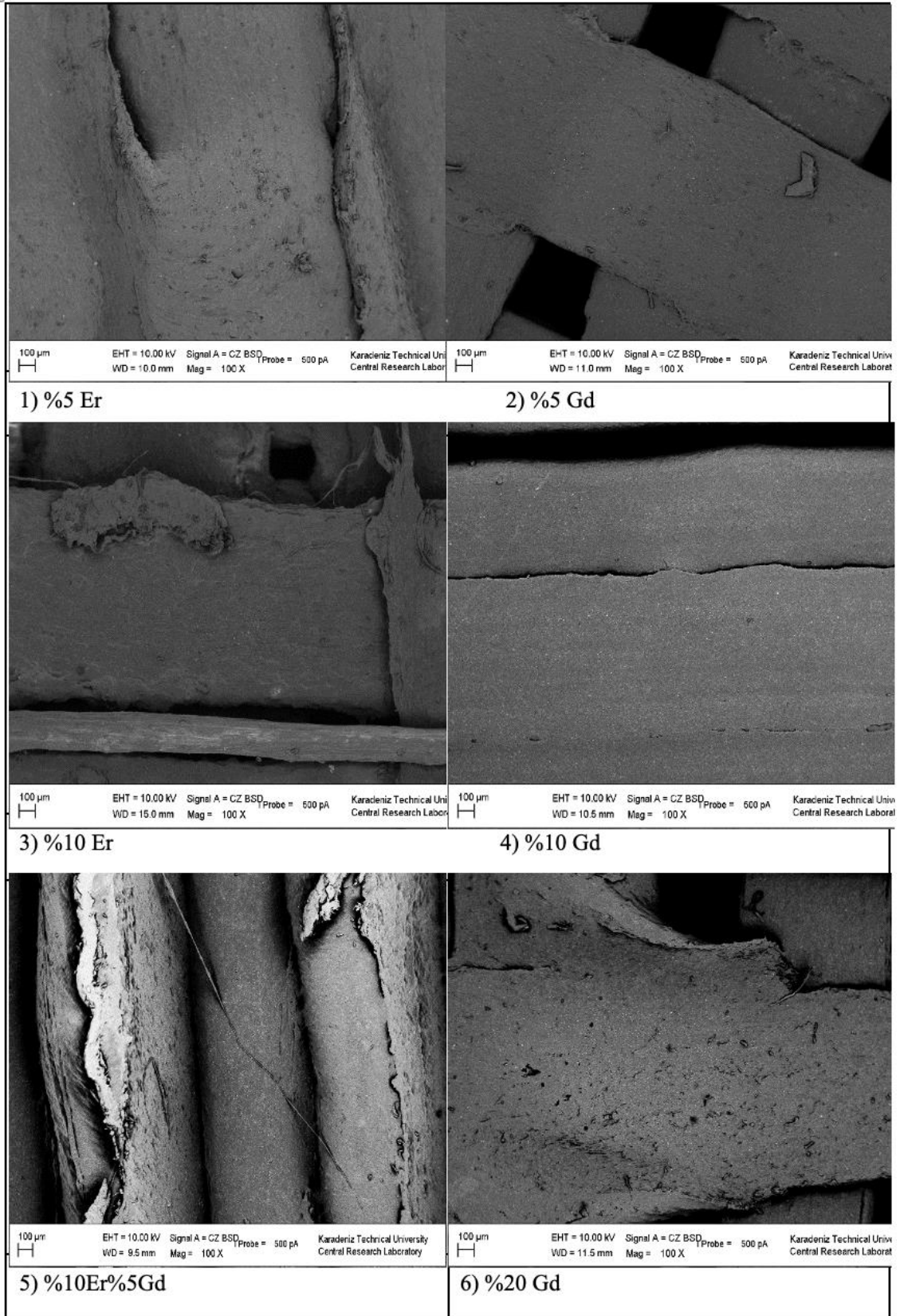


Şekil 4.1 PLA-0 numunesine ait SEM görüntüsü

3D baskı aracılığıyla üretilen numunelerin yüzey görünümü Şekil 4.1 ve 4.2’de yer almaktadır. Görüntülemeler SEM analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Katkısız olarak üretimi gerçekleştirilen PLA-0 numunesinin iki farklı tabakanın birleşimi şeklinde oluşum SEM görüntüsü Şekil 4.1’de yer almaktadır.

Şekil 4.2 de yer alan PLA-Er5 numunesinde birleşim tabakasının çok daha belirgin ve hava boşluklarının daha fazla görülmektedir. Bir diğer numune olan PLA-Gd5 SEM görüntüsünde ise katmanlar çok daha belirgindir. PLA-Er5 ve PLA-Gd5 numunelerinin yüzeylerinde herhangi bir deformasyona rastlanmamıştır.

%10 ve %20 Gd katkılı numunelerde hava boşlukları giderek belirginleşmektedir. İkili katkılama yapılan PLA-Er10Gd5 numunesini oluşturan katmanlarda çatlaklar göze çarpmaktadır. Ayrıca PLA-Er10Gd5 numunesinde yüzey kırıklarına benzer kırıklara rastlanmıştır.

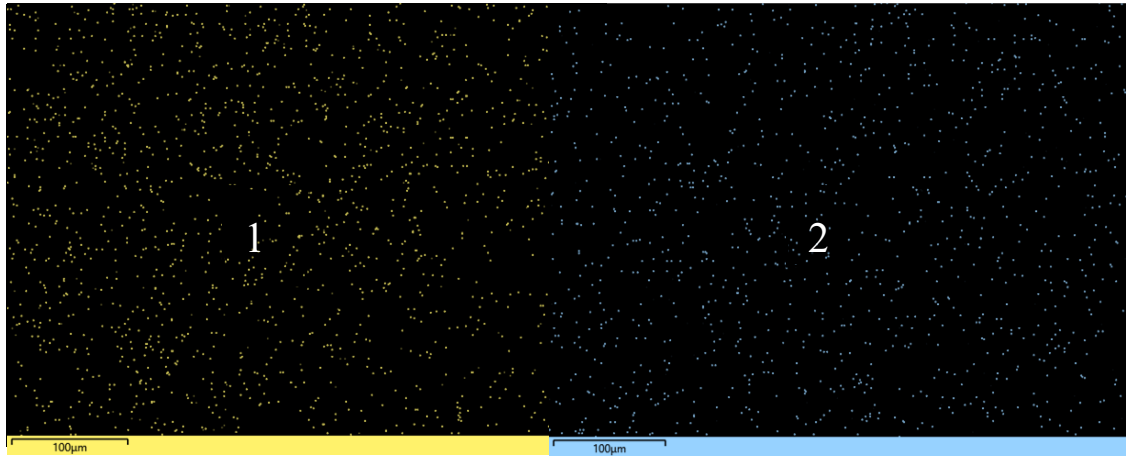


Şekil 4.2 3D baskı yöntemi ile üretilen katkılı PLA numunelerin SEM görüntüleri

1) %5Er, 2) %5 Gd, 3)%10 Er, 4) %10 Gd, 5) %10 Er %5 Gd ve 6) %20Gd

Tablo 4.1 3D baskı yöntemi ile elde edilen numunelerin EDS analizleri

Numuneler	C	O	Er	Gd
P-PLA-0	53,4	46,6	-	-
P-PLA-Er5	58,3	37,7	3,9	-
P-PLA-Gd5	59,2	38,8	-	1,9
P-PLA-Er10	49,1	44,3	6,6	-
P-PLA-Gd10	62,1	35,7	-	2,2
P-PLA-Er10Gd5	50,9	39,5	7,3	2,4
P-PLA-Gd20	59,5	34,4	-	6,1



Şekil 4.3 1) PLA-Er5 ve 2) PLA-Gd5 element dağılımı

Yüzey özelliklerine odaklanan bir yöntem olan EDS analizinin görüntüleme detayını artırmak için nokta bazlı bir değerlendirme yerine topografik bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu topografik yöntem, numunenin yüzeyinin ayrıntılı bir haritasını çıkarmayı ve elementlerin yüzey boyunca dağılımını gösterebilmektedir. Bu topografik değerlendirmeden elde edilen görüntüler element dağılımı Şekil 4.3'te verilmiştir Tablo 4.1 ve Şekil 4.3'teki bilgiler birlikte değerlendirildiğinde 3D baskı tekniği kullanılarak üretilen numunelerin element dağılımının homojen olduğu görülmektedir.

4.2.Gama Zırhlama

Bu çalışmada, farklı oranlarda Er_2O_3 ve Gd_2O_3 ile katkılanmış polimer kompozit malzemelerin gama radyasyonu zırhlamasına ait kütle zayıflatma katsayısı, lineer zayıflatma katsayısı, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, radyasyondan korunma verimliliği, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve yığılma faktörü parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler hem deneysel hem teorik yoldan hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Deneysel kısımda gama radyasyonuna karşı zırhlama kabiliyetinin tespiti için gerçekleştirilen ölçümler 59,5 keV ile 1332,5 keV enerjileri arasında ^{241}Am (59,5 keV), ^{133}Ba (80,9, 276,3, 302,8, 356 ve 383,8 keV), ^{22}Na (511 ve 1274,5 keV), ^{137}Cs (661,6 keV) ve ^{60}Co (1173,2 ve 1332,5 keV) noktasal gama kaynakları ve HPGe dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Teorik hesaplamalar ise radyasyon zırhlama çalışmalarında sıklıkla tercih edilen FLUKA, GEANT4, WinXCOM, EpiXS programları kullanılmıştır.

4.2.1. Lineer zayıflatma katsayısı

Bu tez çalışması kapsamında üretimi gerçekleştirilen numunelerin lineer zayıflatma katsayısı değerleri deneysel olarak 59,5 keV ile 1332,5 keV arasında değişiklik gösteren 11 farklı enerji seviyesinde Yüksek Saflıkta Germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak elde edilen spektrumlar kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel bulguların doğruluğunun sağlamasını yapmak için bulgular Monte Carlo metodunu kullanan simülasyon programları tarafından da hesaplanmıştır.

Tablo 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'te üretimi gerçekleştirilen polimer kompozit malzemelerinin lineer zayıflatma katsayılarına ait bulguları içermektedir. Tablolardan da anlaşılaçağı üzere gama enerjisindeki artış ile lineer zayıflatma katsayısı değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca bulgulardaki deneysel, teorik ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile yakın değerlerde olduğı dikkat çekmektedir.

Tablo 4.2 P-PLA-0 ve P-PLA-Er5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları

Lineer Zayıflatma Katsayısı (cm ⁻¹)												
Enerji (keV)	P-PLA-0						P-PLA-Er (5%)					
	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,2234	0,0090	0,2346	0,2204	0,2350	0,2346	0,9056	0,0094	0,9425	0,9060	0,9354	1,0369
80,9	0,1990	0,0112	0,2107	0,2025	0,2111	0,2107	0,5099	0,0106	0,5237	0,5054	0,5233	0,5699
276,3	0,1473	0,0107	0,1425	0,1411	0,1423	0,1424	0,1473	0,0102	0,1490	0,1466	0,1488	0,1505
302,8	0,1331	0,0104	0,1377	0,1367	0,1378	0,1377	0,1411	0,0112	0,1419	0,1400	0,1419	0,1431
356,0	0,1317	0,0102	0,1295	0,1291	0,1000	0,1294	0,1277	0,0096	0,1308	0,1297	0,1308	0,1314
383,8	0,1236	0,0095	0,1258	0,1253	0,1255	0,1257	0,1256	0,0097	0,1260	0,1251	0,1259	0,1267
511,0	0,1176	0,0094	0,1119	0,1123	0,1118	0,1118	0,1142	0,0096	0,1101	0,1102	0,1101	0,1103
661,6	0,1015	0,0105	0,1000	0,1006	0,1000	0,0999	0,0939	0,0091	0,0976	0,0980	0,0974	0,0976
1173,2	0,0752	0,0097	0,0761	0,0762	0,0760	0,0760	0,0710	0,0099	0,0736	0,0736	0,0735	0,0735
1274,5	0,0691	0,0095	0,0730	0,0732	0,0728	0,0729	0,0713	0,0098	0,0706	0,0708	0,0704	0,0704
1332,5	0,0755	0,0104	0,0713	0,0716	0,0711	0,0712	0,0705	0,0106	0,0690	0,0692	0,0688	0,0688

Tablo 4.3 P-PLA-Er10 ve P-PLA-Gd5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları

Lineer Zayıflatma Katsayısı (cm ⁻¹)												
Enerji (keV)	P-PLA-Er (%10)						P-PLA-Gd (5%)					
	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	1,6485	0,0105	1,6384	1,5795	1,6241	1,8235	0,8085	0,0108	0,8352	0,8025	0,8310	0,9235
80,9	0,7994	0,0097	0,8330	0,8032	0,8317	0,9239	0,4705	0,0097	0,4729	0,4533	0,4707	0,5127
276,3	0,1510	0,0100	0,1576	0,1543	0,1575	0,1607	0,1437	0,0103	0,1455	0,1432	0,1454	0,1467
302,8	0,1443	0,0111	0,1482	0,1453	0,1479	0,1505	0,1363	0,0090	0,1389	0,1370	0,1386	0,1398
356,0	0,1384	0,0100	0,1340	0,1322	0,1340	0,1354	0,1288	0,0100	0,1284	0,1273	0,1283	0,1288
383,8	0,1196	0,0104	0,1284	0,1268	0,1238	0,1296	0,1216	0,0094	0,1239	0,1230	0,1238	0,1244
511,0	0,1082	0,0104	0,1103	0,1099	0,1101	0,1107	0,1048	0,0093	0,1086	0,1087	0,1084	0,1087
661,6	0,0944	0,0098	0,0968	0,0970	0,0966	0,0969	0,0944	0,0089	0,0963	0,0968	0,0963	0,0963
1173,2	0,0702	0,0096	0,0724	0,0723	0,0723	0,0723	0,0694	0,0098	0,0728	0,0728	0,0727	0,0727
1274,5	0,0648	0,0099	0,0694	0,0695	0,0692	0,0692	0,0670	0,0097	0,0698	0,0700	0,0697	0,0696
1332,5	0,0697	0,0095	0,0678	0,0680	0,0677	0,0676	0,0697	0,0102	0,0682	0,0684	0,0680	0,0680

Tablo 4.4 P-PLA-Gd10 ve P-PLA-Er10Gd5 numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları

Lineer Zayıflatma Katsayısı (cm ⁻¹)												
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (10%)						P-PLA-Er (10%) Gd (5%)					
	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	1,4011	0,0092	1,4325	1,3908	2,1652	1,6186	1,1245	0,0096	1,1719	1,1303	1,1642	2,6528
80,9	0,7290	0,0095	0,7376	0,7101	1,1138	0,8214	0,6493	0,0095	0,6300	0,6074	0,6296	1,2985
276,3	0,1492	0,0093	0,1535	0,1504	0,2318	0,1561	0,1528	0,0102	0,1581	0,1556	0,1578	0,1794
302,8	0,1419	0,0112	0,1449	0,1423	0,2185	0,1469	0,1459	0,0104	0,1500	0,1476	0,1500	0,1662
356,0	0,1346	0,0091	0,1319	0,1303	0,1993	0,1330	0,1379	0,0091	0,1376	0,1363	0,1375	0,1472
383,8	0,1236	0,0092	0,1266	0,1252	0,1911	0,1276	0,1317	0,0108	0,1324	0,1314	0,1322	0,1401
511,0	0,1062	0,0098	0,1094	0,1092	0,1650	0,1097	0,1183	0,0096	0,1140	0,1149	0,1152	0,1177
661,6	0,0948	0,0099	0,0963	0,0966	0,1454	0,0963	0,1047	0,0094	0,1018	0,1019	0,1017	0,1022
1173,2	0,0702	0,0100	0,0723	0,0724	0,1091	0,0721	0,0735	0,0100	0,0767	0,0769	0,0767	0,0756
1274,5	0,0713	0,0097	0,0692	0,0695	0,1046	0,0691	0,0779	0,0088	0,0735	0,0737	0,0734	0,0724
1332,5	0,0697	0,0093	0,0677	0,0677	0,1023	0,0675	0,0738	0,0098	0,0718	0,0719	0,0718	0,0707

Tablo 4.5 P-PLA-Gd20 numunesinin lineer zayıflatma katsayıları

Enerji (keV)	Lineer Zayıflatma Katsayısı (cm ⁻¹)					
	P-PLA-Gd (20%)					
	DENEY	BELİRSİZLİK	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	2,7369	0,0106	2,8678	2,7899	2,8667	3,2705
80,9	1,3489	0,0097	1,3827	1,3309	1,3826	1,5642
276,3	0,1751	0,0104	0,1848	0,1796	0,1845	0,1907
302,8	0,1671	0,0100	0,1711	0,1666	0,1709	0,1756
356,0	0,1588	0,0097	0,1514	0,1484	0,1512	0,1541
383,8	0,1358	0,0097	0,1439	0,1411	0,1438	0,1461
511,0	0,1190	0,0101	0,1209	0,1200	0,1206	0,1217
661,6	0,1006	0,0099	0,1049	0,1048	0,1048	0,1051
1173,2	0,0760	0,0087	0,0776	0,0775	0,0776	0,0774
1274,5	0,0779	0,0102	0,0743	0,0744	0,0743	0,0741
1332,5	0,0763	0,0102	0,0726	0,0727	0,0723	0,0723

Tablo 4.6’da üretimi gerçekleştirilen P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10, P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin deneysel olarak hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları yer almaktadır. Tablodan da anlaşılacağı üzere gama enerjisi arttıkça lineer katsayısında düşüş meydana gelmektedir. Lineer zayıflatma katsayısı parametresinin yüksek olması, zırh malzemesinin zırhlama etkinliği açısından iyi sonuç vermesi demek olduğu düşünüldüğünde özellikle 59,5 ve 80,9 keV enerjilerde numunelerin zırhlama başarısının daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6 Numunelerin deneysel olarak lineer zayıflatma katsayıları

Numunelerin lineer Zayıflatma Katsayısının Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması (cm ⁻¹)							
Enerji (keV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
59,5	0,2234	0,9056	0,8085	1,6485	1,4011	1,1245	2,7369
80,9	0,1990	0,5099	0,4705	0,7994	0,7290	0,6493	1,3489
276,3	0,1473	0,1473	0,1437	0,1510	0,1492	0,1528	0,1751
302,8	0,1331	0,1411	0,1363	0,1443	0,1419	0,1459	0,1671
356,0	0,1317	0,1277	0,1288	0,1384	0,1346	0,1379	0,1588
383,8	0,1236	0,1256	0,1216	0,1196	0,1236	0,1317	0,1358
511,0	0,1176	0,1142	0,1048	0,1082	0,1062	0,1183	0,1190
661,6	0,1015	0,0939	0,0944	0,0944	0,0948	0,1047	0,1006
1173,2	0,0752	0,0710	0,0694	0,0702	0,0702	0,0735	0,0760
1274,5	0,0691	0,0713	0,0670	0,0648	0,0713	0,0779	0,0779
1332,5	0,0755	0,0705	0,0697	0,0697	0,0697	0,0738	0,0763

4.2.2. Kütle zayıflatma katsayısı

Kütle zayıflatma katsayısı, lineer zayıflatma katsayısının malzeme yoğunluğuna oranı şeklinde ifade edilmektedir. Kütle zayıflatma katsayısı zırh malzemesi olarak kullanılacak malzemenin yoğunluğuna bağlı olmaması sebebiyle lineer zayıflatma katsayısına göre çok daha kullanışlı bir parametredir. X-ışını veya gama radyasyonu gibi iyonlaştırıcı radyasyonunun enerjisi bilindiğinde bu radyasyonlara maruz kalınan doz miktarının belirlenmesi için kütle zayıflatma katsayısı önemli bir parametredir.

Tablo 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10’da üretimi gerçekleştirilen polimer kompozit malzemelerinin kütle zayıflatma katsayıları verilmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 de ise kütle zayıflatma katsayılarının gama radyasyon enerjilerine karşı değişimi görülmektedir. Grafikler ve tablolardan da anlaşılabacağı üzere gama radyasyonunun enerjisindeki artışın neticesinde kütle zayıflatma katsayısında düşüş gözlemlenmiştir.

Tablo 4.7 P-PLA-0 ve P-PLA-Er5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları

Kütle Zayıflatma Katsayısı (cm ² /g)										
Enerji (keV)	P-PLA-0					P-PLA-Er (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,1820	0,1912	0,1796	0,1772	0,1912	0,7595	0,7906	0,7600	0,7846	0,7697
80,9	0,1621	0,1717	0,1650	0,1720	0,1717	0,4276	0,4392	0,4239	0,4389	0,4781
276,3	0,1201	0,1161	0,1150	0,1159	0,1160	0,1236	0,1250	0,1230	0,1248	0,1262
302,8	0,1085	0,1122	0,1114	0,1123	0,1122	0,1184	0,1190	0,1174	0,1190	0,1200
356,0	0,1073	0,1055	0,1052	0,0815	0,1054	0,1071	0,1097	0,1087	0,1097	0,1102
383,8	0,1007	0,1025	0,1021	0,1023	0,1025	0,1054	0,1057	0,1049	0,1056	0,1062
511,0	0,0959	0,0912	0,0915	0,0911	0,0911	0,0958	0,0924	0,0924	0,0923	0,0925
661,6	0,0827	0,0815	0,0820	0,0815	0,0814	0,0788	0,0818	0,0822	0,0817	0,0818
1173,2	0,0613	0,0620	0,0621	0,0619	0,0619	0,0596	0,0618	0,0617	0,0617	0,0617
1274,5	0,0563	0,0595	0,0597	0,0594	0,0594	0,0598	0,0592	0,0594	0,0591	0,0591
1332,5	0,0615	0,0581	0,0584	0,0580	0,0580	0,0591	0,0578	0,0580	0,0577	0,0577

Tablo 4.8 P-PLA-Er10 ve P-PLA-Gd5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları

Kütle Zayıflatma Katsayısı (cm ² /g)										
Enerji (keV)	P-PLA-Er (%10)					P-PLA-Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	1,3996	1,3910	1,3411	1,3789	1,5482	0,6851	0,7078	0,6801	0,7043	0,7261
80,9	0,6787	0,7072	0,6820	0,7062	0,7445	0,3987	0,4008	0,3842	0,3989	0,4345
276,3	0,1282	0,1338	0,1310	0,1337	0,1364	0,1218	0,1233	0,1213	0,1232	0,1243
302,8	0,1225	0,1258	0,1234	0,1256	0,1278	0,1155	0,1177	0,1161	0,1174	0,1185
356,0	0,1175	0,1138	0,1123	0,1137	0,1150	0,1092	0,1088	0,1079	0,1087	0,1092
383,8	0,1015	0,1090	0,1076	0,1051	0,1100	0,1030	0,1050	0,1042	0,1049	0,1054
511,0	0,0918	0,0936	0,0933	0,0934	0,0940	0,0888	0,0920	0,0921	0,0919	0,0921
661,6	0,0801	0,0822	0,0824	0,0820	0,0823	0,0800	0,0816	0,0820	0,0816	0,0816
1173,2	0,0596	0,0615	0,0614	0,0614	0,0614	0,0588	0,0617	0,0617	0,0616	0,0616
1274,5	0,0550	0,0589	0,0590	0,0587	0,0588	0,0568	0,0591	0,0593	0,0591	0,0590
1332,5	0,0591	0,0575	0,0577	0,0574	0,0574	0,0590	0,0578	0,0580	0,0576	0,0576

Tablo 4.9 P-PLA-Gd10 ve P-PLA-Er10Gd5 numunelerinin kütle zayıflatma katsayıları

Kütle Zayıflatma Katsayısı (cm ² /g)										
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (10%)					P-PLA-Er (10%) Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	1,1894	1,2160	1,1807	1,2381	1,2740	0,9069	0,9453	0,9117	0,9391	0,9396
80,9	0,6188	0,6261	0,6028	0,6455	0,6973	0,5236	0,5081	0,4899	0,5078	0,4725
276,3	0,1266	0,1303	0,1277	0,1468	0,1325	0,1233	0,1275	0,1255	0,1273	0,1447
302,8	0,1205	0,1230	0,1208	0,1255	0,1247	0,1177	0,1210	0,1191	0,1210	0,1341
356,0	0,1142	0,1120	0,1106	0,1192	0,1129	0,1113	0,1110	0,1099	0,1109	0,1187
383,8	0,1049	0,1075	0,1063	0,1022	0,1083	0,1063	0,1068	0,1060	0,1066	0,1130
511,0	0,0901	0,0928	0,0927	0,0901	0,0931	0,0960	0,0919	0,0927	0,0929	0,0950
661,6	0,0805	0,0818	0,0820	0,0834	0,0818	0,0844	0,0821	0,0822	0,0820	0,0824
1173,2	0,0596	0,0614	0,0614	0,0626	0,0612	0,0593	0,0619	0,0620	0,0618	0,0610
1274,5	0,0605	0,0588	0,0590	0,0588	0,0586	0,0646	0,0593	0,0594	0,0592	0,0584
1332,5	0,0591	0,0574	0,0574	0,0569	0,0573	0,0595	0,0579	0,0580	0,0579	0,0570

Tablo 4.10’da P-PLA-Gd20 numunesine ait kütle zayıflatma katsayısına ait hesaplamalar yer almaktadır. Diğer üretilen numunelere kıyasla P-PLA-Gd20 numunesinin MAC değerlerinin daha yüksek olduğu ve bu olguyu deneysel, simülasyon ve teorik sonuçların desteklediği görülmektedir.

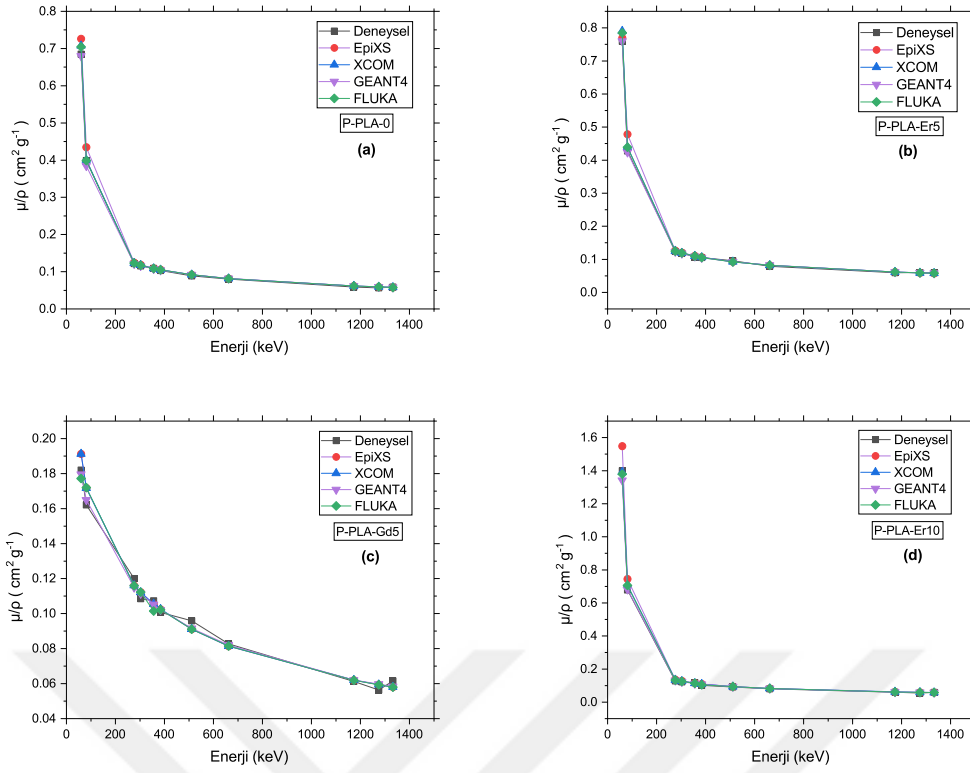
Tablo 4.10 P-PLA-Gd20 numunesinin kütle zayıflatma katsayısı

Kütle Zayıflatma Katsayısı (cm ² /g)					
Enerji(keV)	P-PLA-Gd (20%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	2,1397	2,2421	2,1811	2,2412	2,5568
80,9	1,0545	1,0810	1,0405	1,0810	1,2228
276,3	0,1369	0,1445	0,1404	0,1443	0,1491
302,8	0,1306	0,1338	0,1302	0,1336	0,1373
356,0	0,1242	0,1184	0,1160	0,1182	0,1205
383,8	0,1062	0,1125	0,1103	0,1124	0,1142
511,0	0,0930	0,0945	0,0938	0,0943	0,0951
661,6	0,0787	0,0820	0,0820	0,0819	0,0822
1173,2	0,0594	0,0607	0,0606	0,0607	0,0605
1274,5	0,0609	0,0581	0,0582	0,0581	0,0579
1332,5	0,0597	0,0568	0,0569	0,0565	0,0565

Tablo 4.11’de P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10, P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin deneysel olarak hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları yer almaktadır. Tabloda ifade edildiği üzere gama enerjisi arttıkça kütle katsayısında düşüş meydana gelmektedir. Kütle zayıflatma katsayısı, malzemenin yoğunluğundan bağımsız bir parametredir ve bu parametrenin yüksek olması, zırh malzemesinin zırhlama etkinliği açısından iyi sonuç vermesi demek olduğu düşünüldüğünde özellikle 59,5 ve 80,9 keV enerjilerde numunelerin zırhlama başarısının daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer numunelere kıyasla P-PLA-Gd20 numunesinin kütle zayıflatma katsayısının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

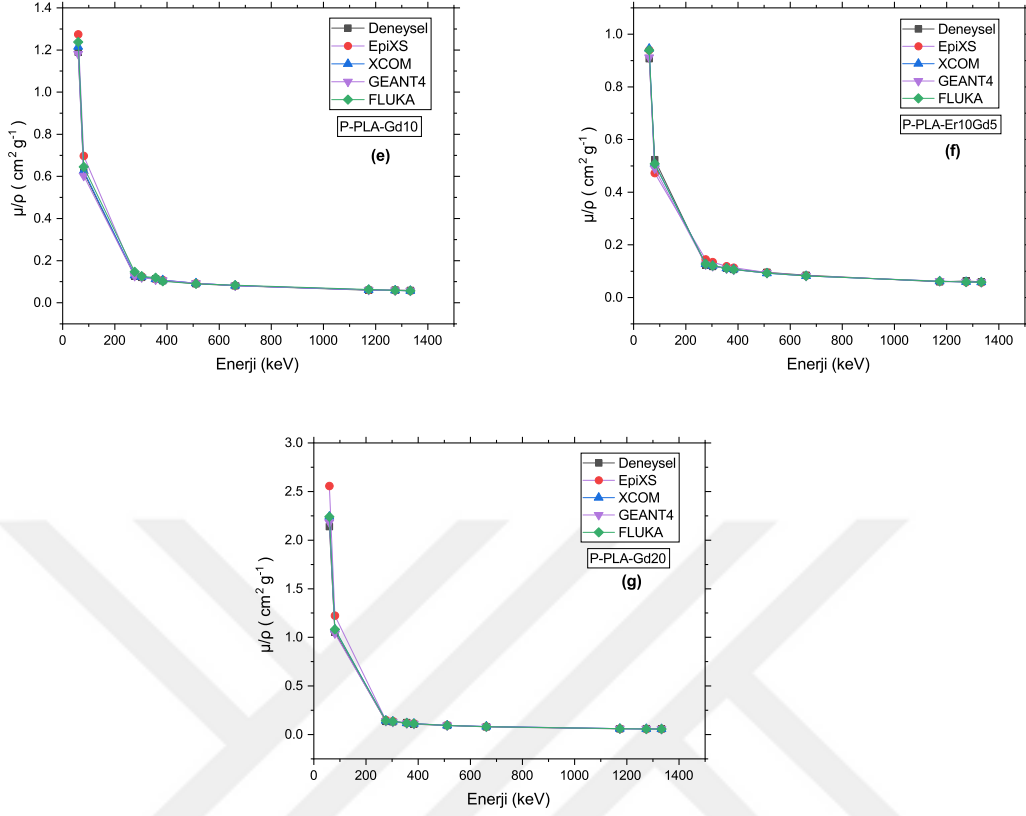
Tablo 4.11 Numunelerin deneysel olarak lineer zayıflatma katsayıları

Numunelerin Kütle Zayıflatma Katsayısının Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması (cm ² /g)							
Enerji (keV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
59,50	0,1820	0,7595	0,6851	1,3996	1,1894	0,9069	2,1397
80,90	0,1621	0,4276	0,3987	0,6787	0,6188	0,5236	1,0545
276,30	0,1201	0,1236	0,1218	0,1282	0,1266	0,1233	0,1369
302,80	0,1085	0,1184	0,1155	0,1225	0,1205	0,1177	0,1306
356,00	0,1073	0,1071	0,1092	0,1175	0,1142	0,1113	0,1242
383,80	0,1007	0,1054	0,1030	0,1015	0,1049	0,1063	0,1062
511,00	0,0959	0,0958	0,0888	0,0918	0,0901	0,0960	0,0930
661,60	0,0827	0,0788	0,0800	0,0801	0,0805	0,0844	0,0787
1173,20	0,0613	0,0596	0,0588	0,0596	0,0596	0,0593	0,0594
1274,50	0,0563	0,0598	0,0568	0,0550	0,0605	0,0646	0,0609
1332,50	0,0615	0,0591	0,0590	0,0591	0,0591	0,0595	0,0597



Şekil 4.4 P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10 numunelerinin MAC grafikleri

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayılarına ait grafikler yer almaktadır. Grafikler deneysel, teorik (XCOM, EpiXS) ve simülasyon (GEANT4, FLUKA) sonuçlarını içermektedir. Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere numunelerin MAC değerleri özellikle düşük enerjilerde daha yüksek sonuç vermektedir. Zırhlama performansı olarak MAC değerleri ile kıyaslama yapılacak olursa en iyi sonucu P-PLA-Gd20 numunesi vermiştir. Bütün teorik, simülasyon ve deneysel sonuçlar bunu destekler niteliktedir.



Şekil 4.5 P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin MAC grafikleri

4.2.3. Yarı değer kalınlığı

Yarı değer kalınlığı, başlangıçtaki radyasyon şiddetinin yarısının hedef zırh malzemesi tarafından soğurulduğu kalınlığı tanımlamaktadır. Farklı miktarda katkı maddesi eklenmiş PLA numunelerine ait yarı değer kalınlık değerleri Tablo 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca bulgular sonucunda çizilen grafikler Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de yer almaktadır.

Tablo 4.12 P-PLA-0 ve P-PLA-Er5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları

Yarı Değer Kalınlığı (cm)										
Enerji (keV)	P-PLA-0					P-PLA-Er (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT 4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	3,1029	2,9543	3,1455	3,1787	2,9540	0,7654	0,7354	0,7651	0,7410	0,6685
80,9	3,4839	3,2898	3,4230	3,2840	3,2904	1,3595	1,3237	1,3715	1,3247	1,2162
276,3	4,7041	4,8653	4,9133	4,8720	4,8686	4,7041	4,6509	4,7284	4,6574	4,6063
302,8	5,2064	5,0344	5,0703	5,0308	5,0332	4,9117	4,8854	4,9524	4,8844	4,8445
356,0	5,2628	5,3541	5,3683	6,9313	5,3585	5,4300	5,2995	5,3462	5,3002	5,2760
383,8	5,6074	5,5109	5,5304	5,5225	5,5134	5,5169	5,5001	5,5417	5,5064	5,4727
511,0	5,8925	6,1957	6,1719	6,1998	6,2002	6,0672	6,2931	6,2892	6,2984	6,2834
661,6	6,8266	6,9334	6,8883	6,9313	6,9393	7,3793	7,1053	7,0737	7,1159	7,1049
1173,2	9,2204	9,1048	9,0996	9,1184	9,1189	9,7584	9,4117	9,4155	9,4289	9,4307
1274,5	10,025	9,4983	9,4644	9,5163	9,5094	9,7203	9,8236	9,7954	9,8428	9,8396
1332,5	9,1835	9,7189	9,6776	9,7434	9,7357	9,8339	10,052	10,0187	10,070	10,075

Tablo 4.13 P-PLA-Er10 ve P-PLA-Gd5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları

Yarı Değer Kalınlığı (cm)										
Enerji (keV)	P-PLA-Er (%10)					P-PLA-Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,4205	0,4231	0,4388	0,4268	0,3801	0,8573	0,8299	0,8638	0,8341	0,7506
80,9	0,8671	0,8322	0,8629	0,8334	0,7502	1,4733	1,4656	1,5291	1,4725	1,3521
276,3	4,5902	4,3983	4,4926	4,4017	4,3142	4,8233	4,7641	4,8415	4,7677	4,7263
302,8	4,8024	4,6780	4,7698	4,6856	4,6049	5,0847	4,9907	5,0586	5,0020	4,9578
356,0	5,0075	5,1713	5,2414	5,1740	5,1183	5,3798	5,3990	5,4445	5,4021	5,3805
383,8	5,7968	5,3991	5,4682	5,5996	5,3491	5,7006	5,5944	5,6366	5,5996	5,5738
511,0	6,4074	6,2867	6,3050	6,2979	6,2638	6,6125	6,3842	6,3789	6,3940	6,3775
661,6	7,3444	7,1611	7,1438	7,1773	7,1543	7,3444	7,1978	7,1628	7,1968	7,1996
1173,2	9,8733	9,5691	9,5805	9,5837	9,5917	9,9909	9,5204	9,5218	9,5392	9,5393
1274,5	10,6953	9,9932	9,9716	10,0173	10,0129	10,3500	9,9359	9,9060	9,9392	9,9519
1332,5	9,9510	10,2276	10,1982	10,2451	10,2548	9,9510	10,1663	10,1286	10,1965	10,1900

Yarı değer kalınlığı, malzemeye gelen radyasyonun şiddetinin yarısının zayıflatılabildiği kalınlık olduğu düşünüldüğünde Yarı değer kalınlığının azalması daha iyi bir zırhlama performansı sağlaması sebebiyle zırh malzemesinin etkinliğini belirlemek konusunda oldukça mühim bir parametredir. Bu bilgiler ışığında Tablo 4.15'te yer alan P-PLA-Gd20 numunesinin daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

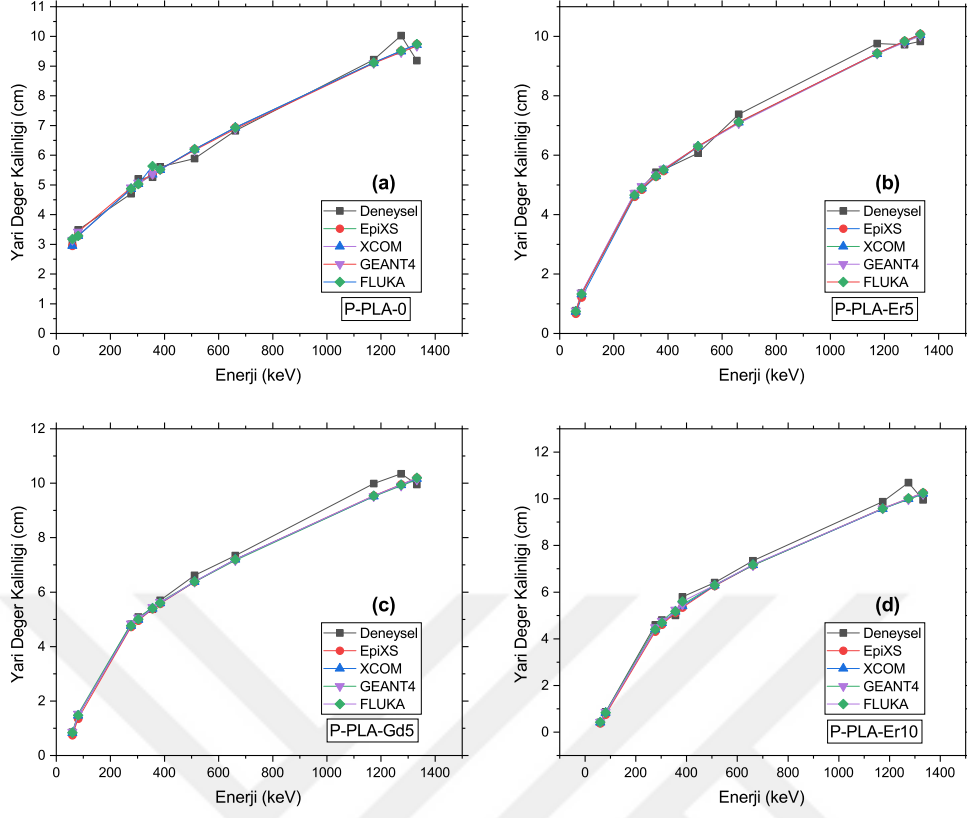
Tablo 4.14 P-PLA-Gd10 ve P-PLA-Er10Gd5 numunelerinin yarı değer kalınlıkları

Yarı Değer Kalınlığı (cm)										
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (10%)					P-PLA-Er (10%) Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,4947	0,4839	0,4984	0,4301	0,4282	0,6164	0,5915	0,6132	0,5954	0,2613
80,9	0,9508	0,9398	0,9762	0,9223	0,8439	1,0676	1,1003	1,1411	1,1010	0,5338
276,3	4,6465	4,5157	4,6087	4,5079	4,4391	4,5351	4,3846	4,4558	4,3926	3,8641
302,8	4,8840	4,7837	4,8708	4,8976	4,7170	4,7494	4,6202	4,6947	4,6218	4,1702
356,0	5,1505	5,2535	5,3205	5,3188	5,2101	5,0250	5,0364	5,0871	5,0393	4,7082
383,8	5,6074	5,4734	5,5373	5,3982	5,4318	5,2613	5,2345	5,2757	5,2426	4,9492
511,0	6,5290	6,3377	6,3495	6,3445	6,3194	5,8587	6,0812	6,0316	6,0172	5,8874
661,6	7,3099	7,1966	7,1743	7,1889	7,1950	6,6213	6,8068	6,7990	6,8161	6,7806
1173,2	9,8733	9,5876	9,5775	9,5767	9,6123	9,4286	9,0357	9,0186	9,0395	9,1662
1274,5	9,7203	10,0100	9,9683	9,8971	10,0323	8,9034	9,4321	9,4056	9,4413	9,5728
1332,5	9,9510	10,2436	10,2459	9,7745	10,2737	9,3909	9,6536	9,6340	9,6501	9,8053

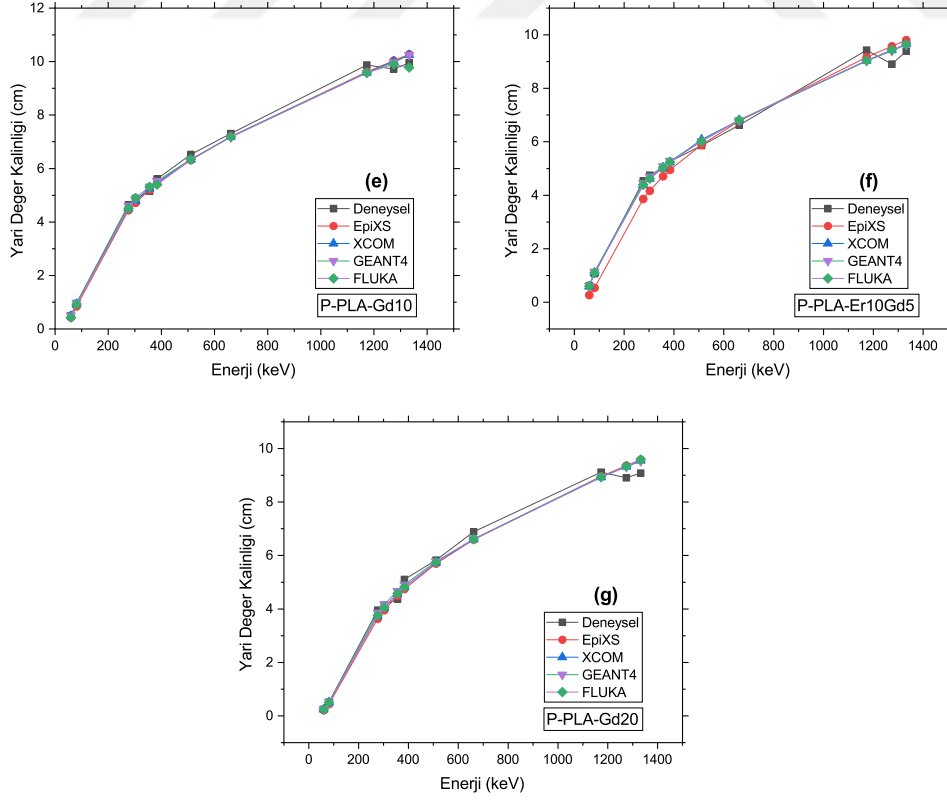
Tablo 4.15 P-PLA-Gd20 numunesinin yarı değer kalınlığı

Yarı Değer Kalınlığı (cm)					
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (20%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,2533	0,2417	0,2484	0,2418	0,2119
80,9	0,5139	0,5013	0,5208	0,5013	0,4431
276,3	3,9585	3,7501	3,8598	3,7560	3,6351
302,8	4,1477	4,0500	4,1613	4,0549	3,9482
356,0	4,3638	4,5767	4,6711	4,5851	4,4989
383,8	5,1029	4,8168	4,9115	4,8213	4,7453
511,0	5,8253	5,7336	5,7774	5,7471	5,6974
661,6	6,8875	6,6051	6,6123	6,6134	6,5961
1173,2	9,1196	8,9288	8,9453	8,9348	8,9597
1274,5	8,9034	9,3268	9,3139	9,3341	9,3592
1332,5	9,0831	9,5487	9,5316	9,5836	9,5870

Şekil 4.6 ve 4.7’de numunelerin yarı değer kalınlığına ait grafikler yer almaktadır. Grafikler deneysel, teorik ve simülasyon sonuçlarını içermektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere numunelerin YDK değerleri özellikle düşük enerjilerde (59,5 keV ve 80,9 keV) daha iyi sonuç vermektedir. Zırhlama performansı olarak YDK değerleri ile kıyaslama yapılacak olursa en iyi sonucu P-PLA-Gd20 numunesi vermiştir. Bütün teorik, simülasyon ve deneysel sonuçlar bunu destekler niteliktedir.



Şekil 4.6 P-PLA-0, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er10 numunelerinin YDK grafikleri



Şekil 4.7 P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5 ve P-PLA-Gd20 numunelerinin YDK grafikleri

4.2.4. Ortalama serbest yol

Radyasyon bir madde ile temasa girdiği zaman malzemenin atomları ile hemen etkileşime girmez; bir etkileşim gerçekleştirmeden önce ortalama bir mesafe kat ederler. Gama radyasyonunun soğurucu malzeme ile ilk etkileşimine girmeden önce kat ettiği mesafeyi ortalama serbest yol parametresi temsil etmektedir. Bu değer eşitlik 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama serbest yola ait bulgular Tablo 4.16 ile Tablo 4.19 arasında yer almaktadır.

Ortalama serbest yolun kısa olması malzeme içerisinde radyasyonun kısa mesafede etkileşime girmeye başlayacağını ifade etmektedir. Bu nedenle gelen radyasyon malzeme ile etkileşime girdikçe enerjisini aktaracağı için ortalama serbest yolun düşük bir değerde olması radyasyon zırlama açısından iyi bir sonuç vermektedir. Tablo 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19’unda fark edileceği üzere düşük gama enerjilerinde ortalama serbest yolun daha kısa olduğu, yüksek gama enerjilerinde ise ortalama serbest yolun daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 4.16 P-PLA-0 ve P-PLA-Er5 numunelerine ait ortalama serbest yolları

Enerji (keV)	Ortalama Serbest Yol (cm)									
	P-PLA-0					P-PLA-Er (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	4,4765	4,2622	4,5380	4,2554	4,2617	1,1043	1,0610	1,1037	1,0690	0,9644
80,9	5,0262	4,7462	4,9383	4,7379	4,7471	1,9613	1,9097	1,9786	1,9111	1,7546
276,3	6,7866	7,0192	7,0884	7,0288	7,0238	6,7866	6,7098	6,8216	6,7192	6,6455
302,8	7,5113	7,2631	7,3150	7,2579	7,2614	7,0861	7,0481	7,1448	7,0467	6,9891
356,0	7,5926	7,7244	7,7449	9,9997	7,7306	7,8338	7,6456	7,7130	7,6466	7,6116
383,8	8,0897	7,9505	7,9787	7,9672	7,9542	7,9592	7,9349	7,9950	7,9441	7,8954
511,0	8,5011	8,9385	8,9041	8,9445	8,9450	8,7531	9,0790	9,0734	9,0867	9,0650
661,6	9,8487	10,0028	9,9377	9,9997	10,011	10,646	10,250	10,2052	10,2661	10,250
1173,2	13,3022	13,1355	13,1279	13,1551	13,155	14,078	13,578	13,5837	13,6030	13,605
1274,5	14,4639	13,7031	13,6542	13,7291	13,719	14,023	14,172	14,1317	14,2001	14,195
1332,5	13,2490	14,0214	13,9619	14,0567	14,045	14,187	14,503	14,4540	14,5280	14,535

Tablo 4.17 P-PLA-Er10 ve P-PLA-Gd5 numunelerinin ortalama serbest yolları

Ortalama Serbest Yol (cm)										
Enerji (keV)	P-PLA-Er (%10)					P-PLA-Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,6066	0,6104	0,6331	0,6157	0,5484	1,2369	1,1973	1,2461	1,2033	1,0829
80,9	1,2509	1,2005	1,2449	1,2023	1,0823	2,1255	2,1144	2,2060	2,1244	1,9506
276,3	6,6223	6,3455	6,4815	6,3503	6,2240	6,9586	6,8731	6,9848	6,8783	6,8186
302,8	6,9284	6,7490	6,8814	6,7598	6,6435	7,3356	7,2001	7,2981	7,2164	7,1525
356,0	7,2243	7,4607	7,5617	7,4645	7,3842	7,7614	7,7891	7,8547	7,7935	7,7624
383,8	8,3631	7,7892	7,8889	8,0785	7,7171	8,2242	8,0710	8,1319	8,0785	8,0413
511,0	9,2439	9,0698	9,0963	9,0859	9,0367	9,5398	9,2104	9,2028	9,2246	9,2009
661,6	10,5957	10,3313	10,3063	10,3546	10,321	10,5957	10,3842	10,3337	10,3828	10,3869
1173,2	14,2442	13,8053	13,8217	13,8264	13,838	14,4138	13,7350	13,7371	13,7622	13,7622
1274,5	15,4301	14,4171	14,3859	14,4519	14,445	14,9319	14,3344	14,2913	14,3393	14,3575
1332,5	14,3563	14,7554	14,7129	14,7805	14,794	14,3563	14,6669	14,6125	14,7104	14,7011

Tablo 4.18 P-PLA-Gd10 ve P-PLA-Er10Gd5 numunelerinin ortalama serbest yolları

Ortalama Serbest Yol (cm)										
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (10%)					P-PLA-Er (10%) Gd (5%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,7137	0,6981	0,7190	0,7618	0,6178	0,8893	0,8533	0,8847	0,8589	0,3770
80,9	1,3717	1,3558	1,4083	1,3978	1,2174	1,5402	1,5873	1,6463	1,5884	0,7701
276,3	6,7035	6,5147	6,6489	6,3132	6,4042	6,5428	6,3257	6,4284	6,3372	5,5748
302,8	7,0461	6,9014	7,0270	6,9765	6,8051	6,8519	6,6655	6,7730	6,6679	6,0164
356,0	7,4306	7,5792	7,6759	7,4577	7,5166	7,2495	7,2660	7,3391	7,2702	6,7925
383,8	8,0897	7,8964	7,9887	7,4324	7,8364	7,5905	7,5517	7,6112	7,5635	7,1402
511,0	9,4193	9,1433	9,1603	9,0593	9,1170	8,4523	8,7733	8,7018	8,6810	8,4937
661,6	10,5459	10,3824	10,3503	10,8767	10,380	9,5525	9,8201	9,8089	9,8336	9,7823
1173,2	14,2442	13,8320	13,8174	13,7944	13,867	13,6026	13,0358	13,0111	13,0412	13,2240
1274,5	14,0235	14,4414	14,3812	14,5629	14,473	12,8449	13,6077	13,5694	13,6209	13,8106
1332,5	14,3563	14,7783	14,7817	14,773	14,821	13,548	13,927	13,8990	13,922	14,146

Tablo 4.19 P-PLA-Gd20 numunesinin ortalama serbest yolları

Ortalama Serbest Yol (cm)					
Enerji (keV)	P-PLA-Gd (20%)				
	DENEY	XCOM	GEANT4	FLUKA	EpiXS
59,5	0,3654	0,3487	0,3584	0,3488	0,3058
80,9	0,7413	0,7232	0,7514	0,7233	0,6393
276,3	5,7109	5,4102	5,5685	5,4187	5,2443
302,8	5,9838	5,8429	6,0035	5,8499	5,6960
356,0	6,2956	6,6028	6,7389	6,6149	6,4905
383,8	7,3619	6,9491	7,0858	6,9557	6,8460
511,0	8,4041	8,2719	8,3351	8,2913	8,2196
661,6	9,9365	9,5292	9,5395	9,5411	9,5161
1173,2	13,1568	12,8815	12,9053	12,8902	12,9261
1274,5	12,8449	13,4557	13,4371	13,4663	13,5025
1332,5	13,1042	13,7758	13,7512	13,8262	13,8311

4.2.5. Z_{etk} ve N_e

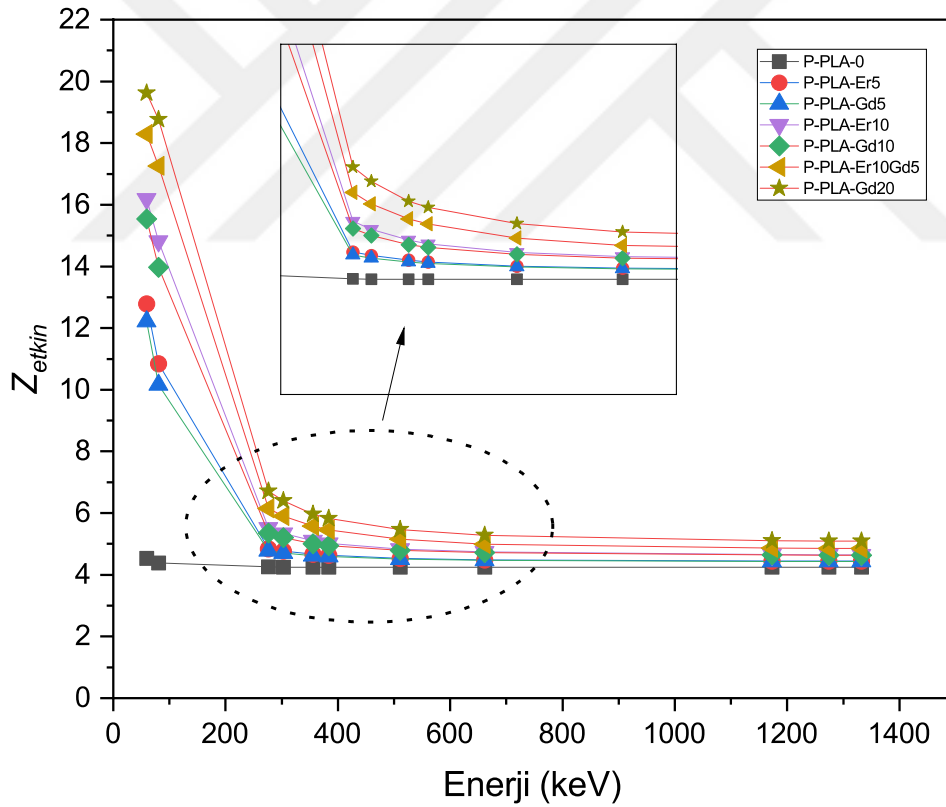
Bir malzemenin içindeki atomların etkin atom numarası (Z_{etk}), radyasyonla etkileşimlerini belirleyen bir faktördür. Düşük Z_{etk} değerlerine sahip malzemeler daha az radyasyon soğurur ve daha az enerji aktarır, bu da radyasyonun etkilerini artırabilir. Yüksek Z_{etk} değerlerine sahip malzemeler daha fazla enerji transferini sağlayabilmekte ve radyasyonu etkili bir şekilde azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, radyasyon zırhlamasında kullanılan malzemelerin Z_{etk} değeri, radyasyon zırhlama kabiliyetlerinin anlaşılması adına oldukça yararlı bir parametredir. Uygun malzemelerin tercih edilmesi ile radyasyonun risklerinden kaynaklanan istenmeyen etkilerini azaltmak mümkündür. Z_{etk} incelemesine ait bulgular Tablo 4.20’de verilmekte ve ayrıca ilgili grafikler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da yer almaktadır.

Etkin elektron yoğunluğu ($N_e \times 10^{23}$), malzemenin her birim kütlesi başına denk gelen elektron sayısı olarak ifade edilebilir.

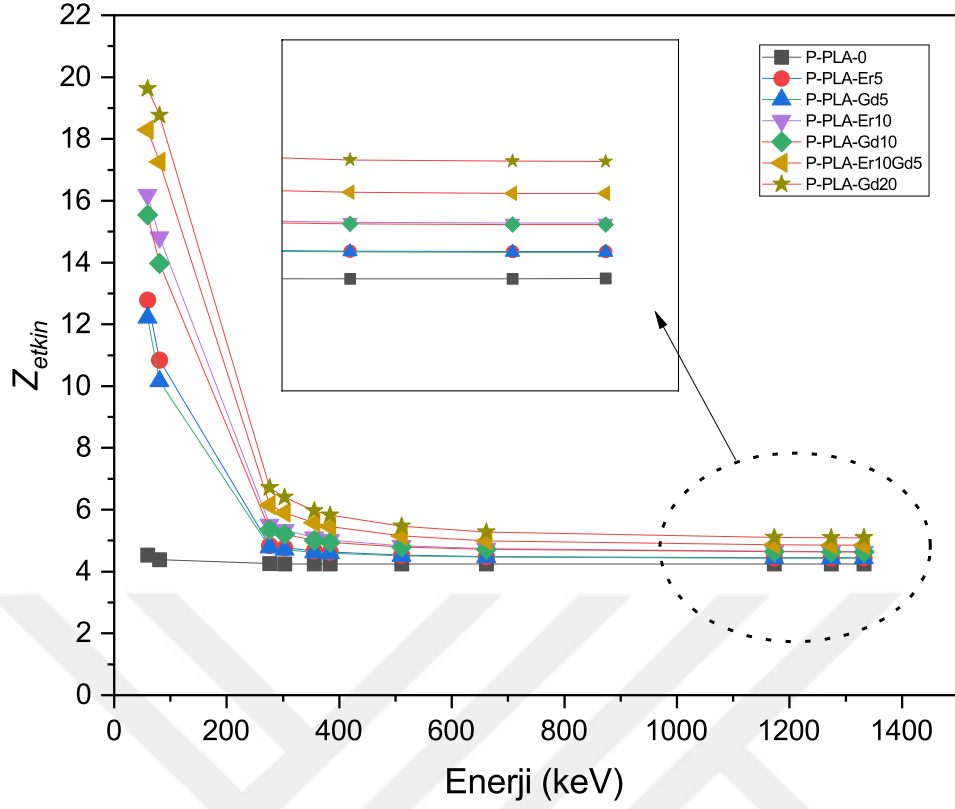
Bir malzemenin elektron yoğunluğu ne kadar yüksekse, gelen radyasyonla etkileşime girme ve onu zayıflatma olasılığı da o denli yüksek olacaktır. Bunun nedeni, radyasyon ve elektronlar arasındaki etkileşimlerin, radyasyonun enerjisinin saçılma ve soğurulma reaksiyonları ile azaltmasıdır. Etkin elektron yoğunluğuna ait bulgular Tablo 4.21’da verilmekte ve ayrıca ilgili grafik Şekil 4.10’da görülebilir.

Tablo 4.20 Z_{etk} değerine ait teorik sonuçlar

Enerji (keV)	Z _{etk} Değeri						
	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
59,5	4,5288	12,7925	12,2189	16,1899	15,5393	18,2871	19,6269
80,9	4,3802	10,8478	10,1544	14,8190	13,9683	17,2613	18,7661
276,3	4,2528	4,8480	4,7783	5,5174	5,3590	6,1551	6,7129
302,8	4,2512	4,7702	4,7120	5,3423	5,2084	5,8962	6,3942
356,0	4,2488	4,6663	4,6238	5,1054	5,0056	5,5747	5,9612
383,8	4,2479	4,6291	4,5925	5,0194	4,9447	5,4570	5,8252
511,0	4,2460	4,5345	4,5132	4,8331	4,7910	5,1490	5,4668
661,6	4,2450	4,4875	4,4735	4,7411	4,7132	4,9931	5,2812
1173,2	4,2439	4,4415	4,4356	4,6503	4,6382	4,8653	5,0994
1274,5	4,2441	4,4394	4,4339	4,6458	4,6347	4,8588	5,0903
1332,5	4,2445	4,4389	4,4336	4,6444	4,6338	4,8569	5,0876



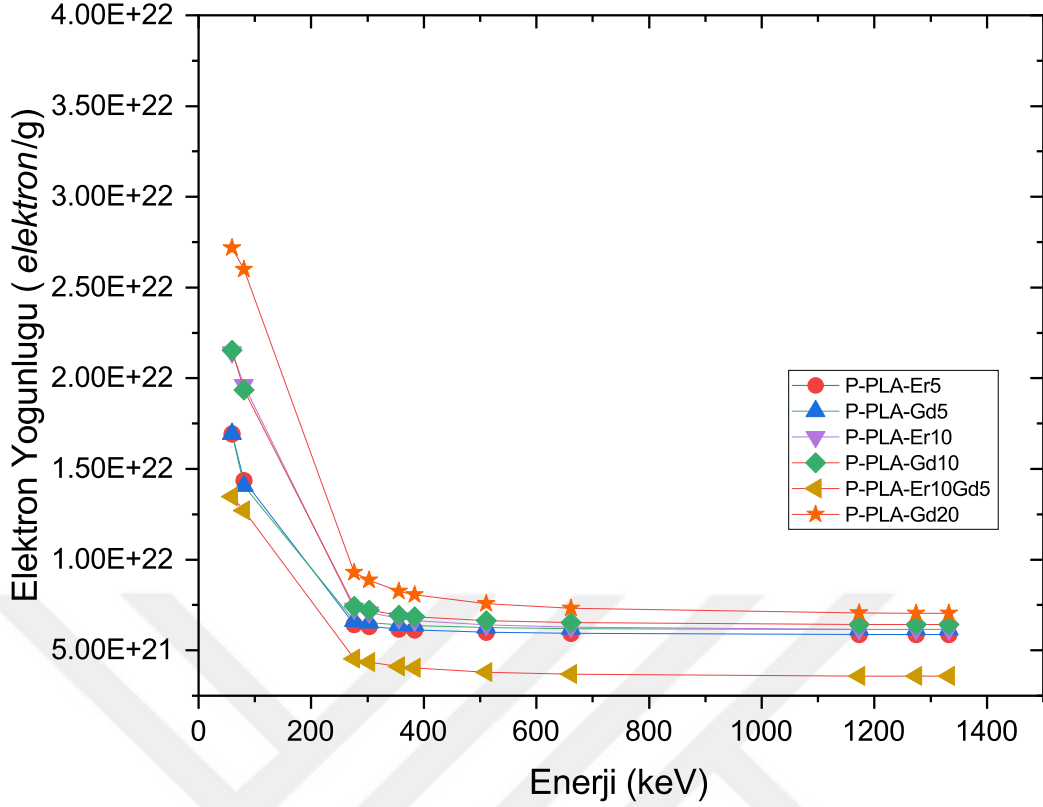
Şekil 4.8 Z_{etk} sonuçlarının 356-661,6 keV değeri arası yakınlaştırılmış grafik



Şekil 4.9 Z_{etkin} sonuçlarının 1173,2-1332,5 keV değeri arası yakınlaştırılmış grafik

Tablo 4.21 Etkin Elektron Yoğunluğuna ait teorik sonuçlar

Etkin Elektron Yoğunluğu (elektron/g)							
Enerji (keV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLAGd5	P-PLA-Er10	P-PLAGd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLAGd20
59,5	3,783E+22	1,694E+22	1,693E+22	2,144E+22	2,153E+22	1,347E+22	2,719E+22
80,9	3,659E+22	1,437E+22	1,407E+22	1,962E+22	1,935E+22	1,272E+22	2,600E+22
276,3	3,553E+22	6,420E+21	6,619E+21	7,307E+21	7,424E+21	4,535E+21	9,299E+21
302,8	3,551E+22	6,317E+21	6,528E+21	7,075E+21	7,215E+21	4,344E+21	8,858E+21
356,0	3,549E+22	6,180E+21	6,405E+21	6,761E+21	6,934E+21	4,107E+21	8,258E+21
383,8	3,549E+22	6,130E+21	6,362E+21	6,647E+21	6,850E+21	4,021E+21	8,070E+21
511,0	3,547E+22	6,005E+21	6,252E+21	6,400E+21	6,637E+21	3,794E+21	7,573E+21
661,6	3,546E+22	5,943E+21	6,197E+21	6,279E+21	6,529E+21	3,679E+21	7,316E+21
1173,2	3,545E+22	5,882E+21	6,145E+21	6,158E+21	6,425E+21	3,585E+21	7,064E+21
1274,5	3,546E+22	5,879E+21	6,142E+21	6,152E+21	6,420E+21	3,580E+21	7,052E+21
1332,5	3,546E+22	5,878E+21	6,142E+21	6,151E+21	6,419E+21	3,578E+21	7,048E+21



Şekil 4.10 Etkin elektron yoğunluğu sonucuna ait grafik

4.2.6. Teorik yığılma faktörü

Gama radyasyonu zırh malzemesinden geçerken sadece soğurulma reaksiyonu gerçekleşmez aynı zamanda saçılma reaksiyonun da gerçekleşme ihtimali vardır. Bu saçılma reaksiyonu ile kişilerin ya da nesnelerin maruz kaldığı radyasyon dozu artabilir. Gelen radyasyon zırh malzemesinin atomları ile etkileşime girerek saçılma reaksiyonu gösterip zırh malzemesinden geçebilmektedir. Saçılma ve soğurulma reaksiyonları ihtimalleri koruyucu malzemeye ve gelen gama radyasyonunun enerjisine bağlı olarak değişir. Söz konusu saçılmadan kaynaklanan ek etki ve başlangıçtaki gelen I_0 radyasyon şiddetinin toplam değeri teorik yığılma faktörü olarak ifade edilmektedir.

Yığılma faktörü, radyasyondan korunma prensibi kapsamında geliştirilen radyasyon zırhı malzemeler için önemli bir parametredir. Yukarıda bahsedilen ek etkiler nedeniyle gelen radyasyonun sadece başlangıçtaki I_0 değerine göre hesaplama yapıp saçılan ışınlar hesaba katılmasaydı zırhın koruma etkinliği yanıltıcı bir şekilde değerlendirilmiş olurdu. Özellikle radyoaktif materyallerle çalışan laboratuvarlarda, nükleer enerji santrallerinde veya tıbbi radyoterapi uygulamalarında bu parametre oldukça önemlidir.

Tez kapsamında üretilen PLA kompozit numunelerinin teorik yığılma faktörü bulguları enerji soğurma (ESYF) ve maruz kalma (MYF) değerleri durumlarında 1 MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP mesafeleri için Tablo 4.22 ile 4.29 arasında yer almaktadır. Ayrıca bu bulguların grafiksel gösterimlerine Şekil 4.11 ve 4.12’de yer verilmiştir.

Tablo 4.22 1 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

1 MFP							
Yığılma Faktörü (Enerji Soğurma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	1,2586	1,0417	1,0484	1,0218	1,0260	1,0167	1,0135
0,0200	1,6021	1,0856	1,1011	1,0448	1,0530	1,0377	1,0284
0,0300	2,8234	1,2460	1,2862	1,1319	1,1575	1,0972	1,0809
0,0400	4,0949	1,4894	1,5711	1,2738	1,3185	1,1977	1,1670
0,0500	4,9620	1,8091	1,9845	1,4556	1,5316	1,3370	1,2903
0,0600	5,1698	1,3091	1,3433	1,1511	1,1719	1,1458	1,1847
0,0800	4,9088	1,5362	1,6045	1,2712	1,3109	1,2582	1,2678
0,1000	4,6329	1,8271	1,9337	1,3839	1,4798	1,3258	1,2940
0,1500	3,7312	2,5879	2,7430	2,0458	2,1476	1,8518	1,7452
0,2000	3,3507	2,9439	3,0572	2,5455	2,5914	2,4546	2,4059
0,3000	2,8380	3,0283	3,0593	2,7879	2,8672	2,6399	2,5635
0,4000	2,6206	2,8165	2,8258	2,7599	2,7774	2,7283	2,7124
0,5000	2,4616	2,6211	2,6253	2,6397	2,6270	2,6621	2,6732
0,6000	2,3653	2,4831	2,4856	2,5395	2,5128	2,5851	2,6076
0,8000	2,2017	2,2736	2,2768	2,3558	2,3197	2,4172	2,4471
1,0000	2,1067	2,1295	2,1300	2,2186	2,1810	2,2814	2,3117
1,5000	1,9373	1,9361	1,9407	1,9460	1,9379	1,9491	1,9470
2,0000	1,8403	1,8340	1,8419	1,8336	1,8398	1,8318	1,8282
3,0000	1,7126	1,7078	1,7082	1,6943	1,6955	1,6914	1,6884
4,0000	1,6270	1,6183	1,6188	1,6082	1,6111	1,5960	1,5915
5,0000	1,5650	1,5517	1,5525	1,5449	1,5424	1,5287	1,5115
6,0000	1,5110	1,4988	1,5003	1,4782	1,4802	1,4598	1,4453
8,0000	1,4300	1,4059	1,4071	1,3886	1,3905	1,3728	1,3569
10,0000	1,3734	1,3496	1,3511	1,3260	1,3284	1,3080	1,2966
15,0000	1,2794	1,2529	1,2543	1,2280	1,2304	1,2284	1,1928

Tablo 4.22’de 1 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.23 5 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

5 MFP							
Yığılma Faktörü (Enerji Soğurma))							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	1,6356	1,0896	1,1039	1,0469	1,0545	1,0327	1,0138
0,0200	2,7767	1,1861	1,2208	1,0966	1,1142	1,0707	1,0293
0,0300	9,0854	1,5514	1,6601	1,2782	1,3347	1,1979	1,0822
0,0400	24,0615	2,2198	2,5046	1,6010	1,7300	1,4231	1,1690
0,0500	43,4045	3,3593	3,8897	2,1098	2,3639	1,7574	1,2942
0,0600	58,5580	1,6944	1,7869	1,3057	1,3549	1,2821	1,1818
0,0800	70,1101	2,3735	2,6037	1,5921	1,7003	1,5178	1,2671
0,1000	68,0761	3,3331	3,7807	1,9995	2,2271	1,7736	1,2964
0,1500	52,9528	6,2397	7,2358	3,6061	3,9844	2,9737	1,7536
0,2000	41,8273	9,2032	10,3749	5,9596	6,4064	5,0703	2,4098
0,3000	28,6684	12,1172	13,0084	8,7034	9,5754	7,1867	2,5699
0,4000	22,0081	12,4154	13,0443	10,0667	10,7196	8,9081	2,7138
0,5000	17,9688	11,8500	12,2941	10,3157	10,7565	9,5149	2,6722
0,6000	15,3015	11,1019	11,4151	10,0801	10,3832	9,5247	2,6056
0,8000	11,9775	9,6954	9,8782	9,2600	9,3786	9,0171	2,4445
1,0000	10,0080	8,6440	8,7871	8,4528	8,4833	8,3649	2,3090
1,5000	7,4306	7,1173	7,1573	6,9034	6,9762	6,7447	1,9472
2,0000	6,1390	6,0880	6,0860	6,0390	6,0479	5,9872	1,8285
3,0000	4,8050	4,7901	4,7912	4,7641	4,7719	4,7582	1,6901
4,0000	4,0945	4,0673	4,0691	4,0454	4,0489	4,0223	1,5914
5,0000	3,6424	3,6038	3,6061	3,5718	3,5773	3,5384	1,5128
6,0000	3,3134	3,2714	3,2741	3,2311	3,2362	3,1873	1,4470
8,0000	2,8695	2,8137	2,8169	2,7635	2,7688	2,7189	1,3590
10,000	2,5868	2,5196	2,5230	2,4617	2,4678	2,4142	1,2980
15,000	2,1547	2,0805	2,0837	2,0212	2,0272	1,9787	1,1943

Tablo 4.23'te 5 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için 0,015 MeV'den 15 MeV'e kadar farklı gama radyasyonu enerjilerinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.24 10 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

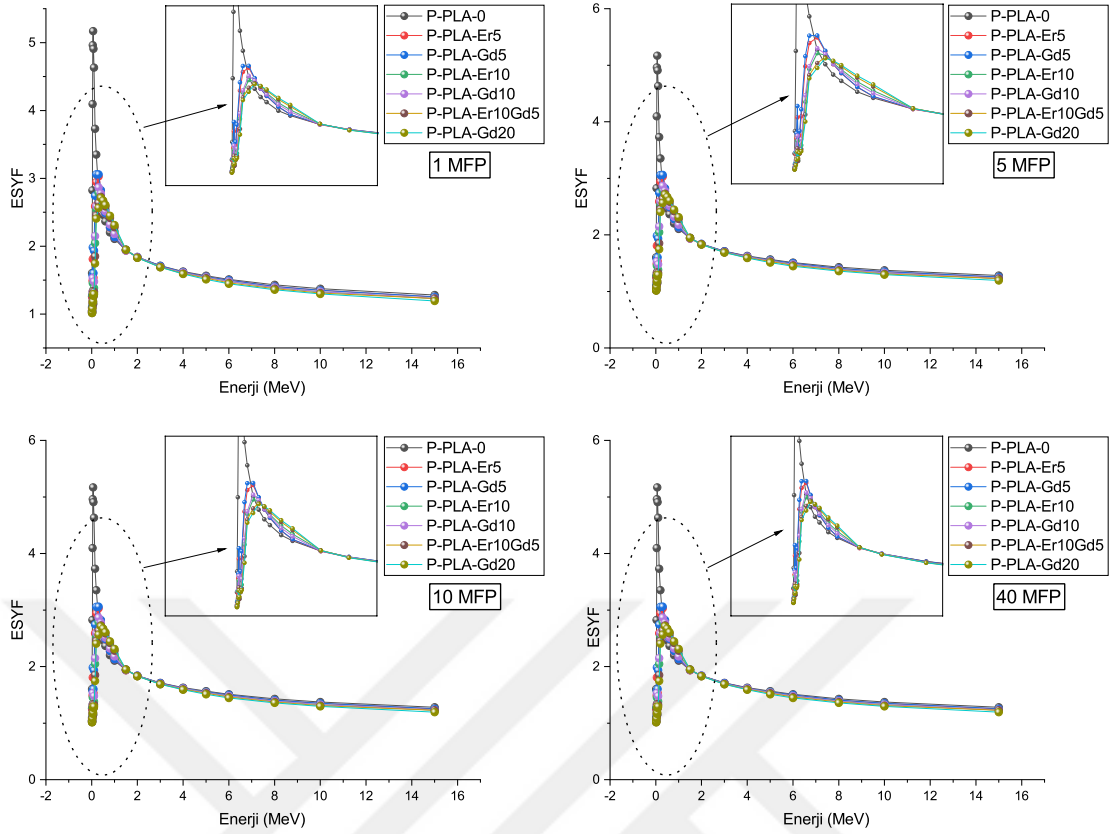
10 MFP							
Yığılma Faktörü (Enerji Soğurma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	PPLA-Gd20
0,0150	1,8577	1,1149	1,1322	1,0592	1,0696	1,0419	1,0369
0,0200	3,6692	1,2375	1,2831	1,1224	1,1442	1,0867	1,0767
0,0300	16,7962	1,7285	1,8824	1,3578	1,4327	1,2523	1,2078
0,0400	64,9280	2,6957	3,1418	1,7900	1,9737	1,5465	1,4524
0,0500	155,8740	4,5491	5,4603	2,5303	2,9190	2,0116	1,8441
0,0600	255,9460	1,9211	2,0523	1,3893	1,4546	1,3777	1,4845
0,0800	373,2070	2,9263	3,2871	1,7748	1,9263	1,7001	1,6794
0,1000	388,7100	4,4838	5,2724	2,3583	2,6919	2,0583	1,8985
0,1500	306,3220	9,9105	12,1673	4,8489	5,4971	3,8138	3,3484
0,2000	222,2910	17,2522	20,6538	9,6069	10,4204	7,7471	6,8004
0,3000	130,4450	26,8561	30,2799	16,5717	18,8896	12,5534	10,8600
0,4000	87,1421	30,2146	32,9068	21,7904	23,9721	17,8699	16,1337
0,5000	64,1576	29,7813	31,7668	23,5235	25,2837	20,3071	18,8499
0,6000	50,0141	27,9917	29,4234	23,2943	24,7113	20,7310	19,5441
0,8000	34,5880	24,0508	24,8514	21,4590	22,2676	19,9306	19,2025
1,0000	26,3384	20,6842	21,0704	19,1912	19,6302	18,3127	17,8761
1,5000	16,8631	15,8739	15,9835	15,1917	15,3561	14,6703	14,4362
2,0000	12,7628	12,6874	12,5893	12,6088	12,5961	12,4930	12,4175
3,0000	8,9703	9,0116	9,0067	9,0474	9,0542	9,0959	9,1141
4,0000	7,1679	7,2014	7,1992	7,2183	7,2194	7,2739	7,2865
5,0000	6,1059	6,1140	6,1133	6,1186	6,1211	6,1296	6,1641
6,0000	5,4134	5,3834	5,3823	5,3924	5,3928	5,3945	5,4096
8,0000	4,4837	4,4564	4,4576	4,4371	4,4393	4,4075	4,4135
10,000	3,9114	3,8675	3,8690	3,8356	3,8395	3,8228	3,7971
15,000	3,0951	3,0314	3,0329	2,9928	2,9975	2,9317	2,9464

Tablo 4.24'te 10 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir. İlk başta enerji arttıkça bu değerler arttığı 0,1 MeV'e kadar gözlenmektedir. Bu enerjiden sonra bu değer tekrardan azalmaktadır.

Tablo 4.25 40 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

40 MFP							
Yığılma Faktörü (Enerji Soğurma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	2,4941	1,1709	1,1998	1,0912	1,1026	1,0677	1,0599
0,0200	7,2836	1,3642	1,4379	1,1837	1,2184	1,1303	1,1168
0,0300	81,4398	2,2283	2,5376	1,5627	1,6938	1,3885	1,3172
0,0400	803,9980	4,2428	5,3440	2,3184	2,6816	1,8760	1,7131
0,0500	4163,8100	9,3897	12,6789	3,8694	4,7891	2,7508	2,4254
0,0600	11386,300	2,5697	2,8302	1,6012	1,7096	1,9250	7,6899
0,0800	26146,300	4,7582	5,6588	2,2792	2,5632	2,7147	3,1563
0,1000	36546,600	8,9514	11,4512	3,3274	4,0804	3,1609	2,8861
0,1500	26520,600	30,8692	46,2750	10,5633	12,5163	7,5717	6,2384
0,2000	15494,700	86,5167	130,4020	42,3483	36,7912	38,3412	28,8696
0,3000	4678,4200	189,4510	251,3630	100,9020	111,7820	65,6533	48,3274
0,4000	2060,3600	273,2610	348,1170	185,1390	200,7730	132,8970	105,0730
0,5000	1121,8600	282,3350	324,0740	212,5990	229,5570	163,3970	137,3440
0,6000	693,6060	258,9210	288,6450	200,3560	217,8730	158,2570	136,9470
0,8000	350,2240	199,9720	210,6820	168,2540	179,7430	142,7940	130,2100
1,0000	217,3050	158,7110	156,6480	132,3760	138,1440	118,9500	112,2040
1,5000	99,6029	95,4235	96,1865	92,9379	91,5199	88,0407	86,7594
2,0000	63,7490	65,0624	62,7896	66,5191	65,9857	67,3618	67,8425
3,0000	36,3729	38,1162	37,9203	39,3028	39,1732	41,3683	42,7398
4,0000	25,7610	27,3521	27,2330	28,6417	28,5402	30,4733	32,0245
5,0000	20,5646	21,8838	21,7780	23,3633	23,1644	23,6381	24,9738
6,0000	17,4651	17,5099	17,4364	18,5622	18,4356	19,8824	21,1020
8,0000	13,8243	14,7504	14,6755	15,9878	15,8498	16,5312	19,1681
10,000	11,1770	12,0959	12,0356	13,0776	12,9779	14,7928	16,1508
15,000	8,0434	8,8167	8,7553	9,8618	9,7640	11,1665	13,3268

Tablo 4.25'te 40 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir. İlk başta enerji arttıkça bu değer arttığı 0,1 MeV'e kadar gözlenmektedir. Bu enerjiden sonra bu değer tekrardan azalmaktadır.



Şekil 4.11 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (enerji soğurma) karşılaştırmaları grafiği

Yukarıdaki tablolarda nümerik değerleri verilen teorik enerji soğurma yığılma faktörü sonuçları Şekil 4.11’de 1MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP’de görselleştirilmiştir. Daha detaylı gösterim yapabilmek için zoomlamalarda yapılmıştır. Açık bir şekilde görülmektedir ki P-PLA-0 en yüksek değere sahiptir

Tablo 4.26 1 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

1 MFP							
Yığılma Faktörü (Maruz Kalma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	1,2552	1,0420	1,0492	1,0227	1,0264	1,0173	1,0145
0,0200	1,5853	1,0833	1,1004	1,0448	1,0525	1,0375	1,0318
0,0300	2,7189	1,2421	1,2805	1,1319	1,1571	1,0972	1,0822
0,0400	4,0795	1,4665	1,5456	1,2642	1,3114	1,1948	1,1656
0,0500	5,2010	1,7040	1,8238	1,4214	1,4933	1,3130	1,2738
0,0600	5,6663	1,2716	1,3013	1,1345	1,1523	1,2652	1,4925
0,0800	5,5426	1,4123	1,4629	1,2099	1,2429	1,2957	1,3735
0,1000	5,2619	1,5287	1,5943	1,2884	1,3330	1,2489	1,2286
0,1500	4,0024	1,7410	1,8168	1,4875	1,5310	1,4076	1,3672
0,2000	3,4214	1,8717	1,9369	1,6557	1,6871	1,5935	1,5628
0,3000	2,9746	1,9664	2,0139	1,7944	1,8349	1,7188	1,6830
0,4000	2,7095	1,9725	2,0119	1,8488	1,8783	1,7957	1,7712
0,5000	2,5458	1,9469	1,9780	1,8642	1,8848	1,8279	1,8116
0,6000	2,4149	1,9228	1,9515	1,8565	1,8708	1,8320	1,8210
0,8000	2,2457	1,8775	1,9067	1,8312	1,8379	1,8200	1,8149
1,0000	2,1273	1,8284	1,8413	1,8041	1,8091	1,7957	1,7920
1,5000	1,9953	1,7934	1,8083	1,7403	1,7530	1,7043	1,6850
2,0000	1,8843	1,7869	1,7927	1,7525	1,7608	1,7293	1,7174
3,0000	1,7405	1,6959	1,6986	1,6732	1,6738	1,6607	1,6573
4,0000	1,6456	1,6171	1,6184	1,5993	1,6027	1,5873	1,5841
5,0000	1,5707	1,5477	1,5488	1,5368	1,5361	1,5229	1,5150
6,0000	1,5223	1,5021	1,5027	1,4923	1,4945	1,4773	1,4688
8,0000	1,4344	1,4146	1,4151	1,4063	1,4072	1,3948	1,3888
10,000	1,3691	1,3558	1,3563	1,3477	1,3485	1,3341	1,3300
15,000	1,2744	1,2646	1,2647	1,2632	1,2633	1,2452	1,2352

Tablo 4.26’da 1 MFP için maruz kalma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.27 5 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

5 MFP							
Yığılma Faktörü (Maruz Kalma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	1,6239	1,0893	1,1028	1,0463	1,0548	1,0345	1,0303
0,0200	2,7396	1,1853	1,2205	1,0978	1,1137	1,0709	1,0597
0,0300	8,6271	1,5454	1,6510	1,2784	1,3342	1,1979	1,1633
0,0400	24,0744	2,1799	2,4498	1,5890	1,7153	1,4170	1,3485
0,0500	46,4368	3,1531	3,6589	2,0411	2,2722	1,7181	1,6076
0,0600	66,6257	1,6271	1,7067	1,2853	1,3301	1,5624	2,0711
0,0800	85,1479	2,0886	2,2587	1,4937	1,5804	1,6691	1,7931
0,1000	84,2164	2,6102	2,8865	1,7420	1,8871	1,5897	1,5160
0,1500	64,7308	3,8838	4,3615	2,5699	2,7734	2,2184	2,0545
0,2000	49,4955	5,1530	5,7172	3,5536	3,8186	3,0597	2,8345
0,3000	32,9511	6,6240	7,1616	4,8623	5,2776	4,1475	3,8379
0,4000	24,7245	7,2815	7,7406	5,7781	6,1640	5,1238	4,8411
0,5000	19,8326	7,4356	7,8227	6,2118	6,5412	5,6587	5,4208
0,6000	16,6207	7,3546	7,6840	6,3307	6,6133	5,8665	5,6653
0,8000	12,7855	6,9993	7,2339	6,2904	6,4865	5,9648	5,8237
1,0000	10,5398	6,5696	6,7555	6,0469	6,1880	5,8149	5,7149
1,5000	7,9520	6,1300	6,2459	5,6954	5,8118	5,4209	5,2845
2,0000	6,4873	5,7604	5,7776	5,5311	5,5823	5,3774	5,2716
3,0000	4,9753	4,7376	4,7490	4,6489	4,6601	4,6026	4,5687
4,0000	4,1853	4,0749	4,0791	4,0226	4,0307	4,0114	3,9950
5,0000	3,6642	3,6016	3,6036	3,5756	3,5777	3,5672	3,5716
6,0000	3,3449	3,2983	3,2996	3,2810	3,2819	3,2821	3,2841
8,0000	2,8752	2,8449	2,8452	2,8397	2,8403	2,8348	2,8389
10,000	2,5673	2,5469	2,5477	2,5342	2,5355	2,5361	2,5339
15,000	2,1372	2,1096	2,1100	2,1024	2,1031	2,0858	2,0771

Tablo 4.27’de 5 MFP için maruz kalma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için 0,015 MeV’den 15 MeV’e kadar farklı gama radyasyonu enerjilerinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.28 10 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

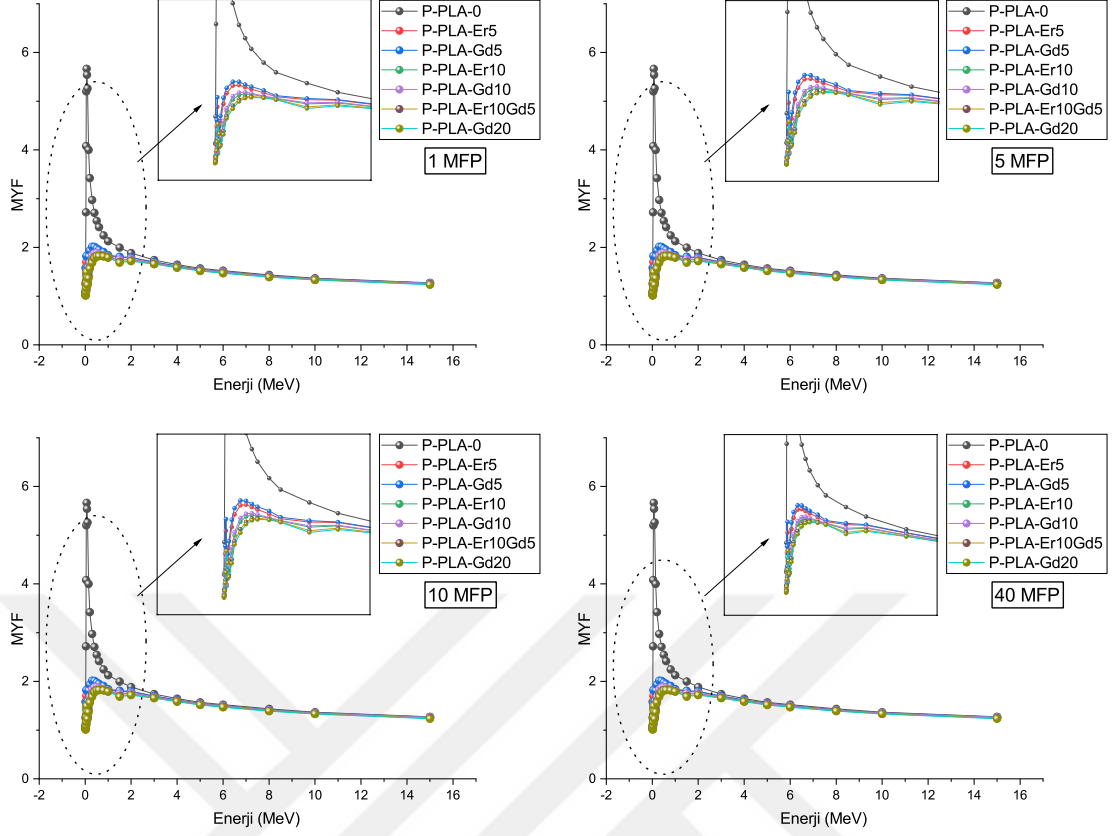
10 MFP							
Yığılma Faktörü (Maruz Kalma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLA-Gd20
0,0150	1,8448	1,1147	1,1312	1,0602	1,0704	1,0450	1,0408
0,0200	3,6172	1,2378	1,2839	1,1233	1,1438	1,0862	1,0728
0,0300	15,9466	1,7185	1,8714	1,3569	1,4311	1,2523	1,2078
0,0400	64,9875	2,6482	3,0707	1,7764	1,9561	1,5399	1,4482
0,0500	167,7590	4,2883	5,1817	2,4472	2,8045	1,9665	1,8095
0,0600	294,4180	1,8434	1,9593	1,3685	1,4282	1,8494	3,1564
0,0800	464,5090	2,5605	2,8349	1,6664	1,7887	2,0564	2,3408
0,1000	497,9540	3,4835	3,9830	2,0439	2,2690	1,8151	1,7028
0,1500	395,2190	6,1312	7,2234	3,4817	3,8522	2,8612	2,5796
0,2000	280,4420	9,5133	11,1058	5,6115	6,1805	4,5297	4,0394
0,3000	156,4560	14,2887	16,1095	9,0014	10,1634	7,0714	6,2734
0,4000	101,7040	17,1223	18,7674	12,0576	13,3149	9,9886	9,1253
0,5000	72,9241	18,0362	19,4347	13,6593	14,8294	11,7441	10,9439
0,6000	55,9065	17,9551	19,1568	14,1719	15,2330	12,4689	11,7484
0,8000	37,6392	16,8254	17,5569	14,2241	15,0071	12,9359	12,3864
1,0000	28,1958	15,2933	15,7437	13,3951	13,9472	12,4924	12,1067
1,5000	18,2573	13,4189	13,7293	12,2542	12,5736	11,5679	11,2384
2,0000	13,6073	11,9213	11,8823	11,4258	11,5230	11,1330	10,9148
3,0000	9,3262	8,9040	8,9203	8,8140	8,8169	8,8020	8,7749
4,0000	7,3404	7,2105	7,2107	7,2005	7,2028	7,2732	7,3324
5,0000	6,1502	6,1160	6,1133	6,1724	6,1499	6,2552	6,3316
6,0000	5,4457	5,4503	5,4454	5,5172	5,5084	5,6052	5,6789
8,0000	4,4751	4,5131	4,5089	4,5780	4,5711	4,6488	4,7367
10,000	3,8797	3,9185	3,9154	3,9693	3,9641	4,0876	4,1254
15,000	3,0649	3,0732	3,0708	3,1129	3,1092	3,1602	3,2422

Tablo 4.28’de 10 MFP için maruz kalma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir. İlk başta enerji arttıkça bu değer arttığı 0,1 MeV’e kadar gözlenmektedir. Bu enerjiden sonra bu değer tekrardan azalmaktadır.

Tablo 4.29 40 Ortalama Serbest Yol mesafesi için teorik yığılma faktörü

40 MFP							
Yığılma Faktörü (Maruz Kalma)							
Enerji (MeV)	P-PLA-0	P-PLA-Er5	P-PLA-Gd5	P-PLA-Er10	P-PLA-Gd10	P-PLA-Er10Gd5	P-PLAGd20
0,0150	2,4848	1,1718	1,2006	1,0910	1,1031	1,0677	1,0632
0,0200	7,1525	1,3640	1,4407	1,1833	1,2171	1,1247	1,1051
0,0300	76,9908	2,2200	2,5166	1,5622	1,6927	1,3885	1,3172
0,0400	800,9830	4,1785	5,2260	2,3079	2,6522	1,8669	1,7078
0,0500	4513,4300	8,9560	12,0385	3,7624	4,6249	2,7062	2,3964
0,0600	13308,1000	2,4730	2,7148	1,5867	1,6870	15,0040	5842250,00
0,0800	33507,1000	4,2009	4,9321	2,1576	2,4059	27,0337	1761,9500
0,1000	48684,9000	6,9391	8,6331	2,9675	3,4932	2,5980	2,3658
0,1500	35996,9000	18,7040	25,3655	7,2536	8,3338	5,4945	4,6753
0,2000	17356,4000	43,5613	60,0926	18,9913	20,1560	14,3016	11,5115
0,3000	5859,1000	95,2216	122,6930	43,6446	52,1298	28,4611	22,4004
0,4000	2445,4800	145,2960	173,3510	79,7986	93,9969	56,0325	46,5194
0,5000	1302,8200	161,9010	184,5250	100,9240	116,3030	75,8029	65,7032
0,6000	780,8130	157,5840	178,3420	103,9460	118,5370	80,8571	71,5040
0,8000	384,1370	134,5180	144,7660	100,0310	110,4380	83,3530	76,5102
1,0000	230,7150	116,6470	114,2970	85,9232	92,2822	75,7166	71,4526
1,5000	107,5490	79,9121	81,9582	71,8975	74,1265	70,2698	68,9986
2,0000	68,2646	60,8889	58,9805	59,9696	59,9794	61,7279	60,4343
3,0000	37,7795	37,6880	37,6075	38,0316	36,4379	40,0000	41,3735
4,0000	26,3494	27,4412	27,3155	28,6819	28,5464	29,3733	33,5893
5,0000	20,5061	21,3688	21,3466	23,0313	21,8754	26,1419	27,3747
6,0000	17,6376	18,1075	17,9222	21,2626	20,9971	22,3656	23,7921
8,0000	12,5534	14,7377	14,6640	16,0302	15,8788	17,6323	19,7409
10,0000	11,2455	12,3341	12,2434	13,9302	13,7564	16,6901	18,0979
15,0000	7,9749	8,9582	8,8767	10,4884	10,3311	12,2086	16,0254

Tablo 4.29’da 40 MFP için maruz kalma yığılma faktörü sunulmaktadır. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler P-PLA-0 için gözlemlenmiştir. İlk başta enerji arttıkça bu değerler arttığı 0,1 MeV’e kadar gözlenmektedir. Bu enerjiden sonra bu değer tekrardan azalmaktadır.



Şekil 4.12 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (maruz kalma) karşılaştırmaları grafiği

Yukarıdaki tablolarda nümerik değerleri verilen teorik maruz kalma yığılma faktörü sonuçları Şekil 4.11’de 1MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP’de görselleştirilmiştir. Daha detaylı gösterim yapabilmek için zoomlamalarda yapılmıştır. Açık bir şekilde görülmektedir ki P-PLA-0 en yüksek değere sahiptir

4.2.7. Radyasyon koruma verimliliği

Radyasyon koruma verimliliği (RKV) radyasyon maruziyetinin azaltılmasına yönelik bir olgudur. Bu kavram ile radyasyon çalışanlarının ve halkın radyasyondan korunmasının elzem olduğu nükleer enerji, tıbbi görüntüleme ve endüstriyel uygulamalar gibi çeşitli alanlarda karşılaşılmaktadır. RKV, malzemelerin radyasyon soğurma niteliklerini değerlendirmede yardımcı olarak radyasyona maruziyetten kaynaklanan potansiyel sağlık risklerinin en aza indirmesi ile doğrudan ilgilidir.

Tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen numunelerin RKV değerlerinin deneysel, teorik ve simülasyon bulguları eşitlik 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.30 ile 4.33 arasında grafikler ise Şekil 4.13 ve 4.14'te yer almaktadır.

Aynı zamanda üretilen numunelerin simülasyon yöntemiyle hesaplanan RKV değerleri çeşitli kalınlıklarda kurşun blok ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda fark edildiği üzere %10 ve %20 Gd_2O_3 katkılı numunelerin 0,5 cm, 1 cm ve 2 cm kalınlıklarda 661,6 keV ve üzerinde incelenen enerjilerde kurşun blok ile yakın bir radyasyon koruma verimliliği gösterdiği görülmüştür. İlgili grafikler Şekil 4.15, Şekil 16 ve Şekil 4.17'de görülebilir.

Tablo 4.30 ve 4.31'de daha verimli tartışma yapabilmek için yalnızca dört adet gama enerjisi seçilmiştir. GEANT4 ile elde edilen bulgular farklı numune kalınlıklarının RKV üzerine etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlayabilmektedir. Özellikle 2 cm 'de 59,5 keV enerjide yüzde yüze yakın RKV değerlerine ulaşılması önemli bir bulgudur.

Tablo 4.30 59,5 ve 661,6 keV enerjilerde RKV sonuçları (GEANT4)

Radyasyon Koruma Verimliliği (RKV) (GEANT4)														
Kalınlık(cm)	59,5 keV							661,6 keV						
	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20
0,025	0,549	2,240	1,986	3,872	3,417	2,786	6,737	0,251	0,245	0,242	0,242	0,241	0,255	0,262
0,050	1,096	4,429	3,933	7,594	6,718	5,495	13,020	0,502	0,489	0,483	0,484	0,482	0,508	0,523
0,075	1,639	6,569	5,841	11,171	9,906	8,128	18,880	0,752	0,732	0,723	0,725	0,722	0,762	0,783
0,1	2,180	8,662	7,711	14,611	12,984	10,688	24,345	1,001	0,975	0,963	0,966	0,962	1,014	1,043
0,5	10,433	36,429	33,051	54,604	50,113	43,173	75,215	4,907	4,781	4,723	4,736	4,716	4,970	5,106
1,0	19,777	59,587	55,178	79,392	75,113	67,707	93,857	9,573	9,334	9,224	9,247	9,210	9,692	9,952
1,5	28,147	74,309	69,992	90,645	87,585	81,649	98,478	14,010	13,669	13,511	13,545	13,491	14,180	14,550
2,0	35,643	83,668	79,910	95,753	93,806	89,572	99,623	18,230	17,797	17,596	17,639	17,571	18,445	18,914
5,0	66,773	98,922	98,191	99,963	99,905	99,649	100,000	39,537	38,734	38,360	38,439	38,312	39,935	40,793
10,0	88,960	99,988	99,967	100,000	100,000	99,999	100,000	63,442	62,465	62,005	62,102	61,946	63,922	64,946
15,0	96,332	100,000	99,999	100,000	100,000	100,000	100,000	77,896	77,004	76,580	76,670	76,525	78,330	79,245
20,0	98,781	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	86,635	85,911	85,564	85,638	85,519	86,984	87,712
25,0	99,595	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	91,919	91,368	91,101	91,158	91,067	92,182	92,725
30,0	99,865	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	95,114	94,712	94,515	94,557	94,489	95,304	95,692
35,0	99,955	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	97,046	96,760	96,619	96,649	96,601	97,179	97,450
40,0	99,985	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	98,214	98,015	97,916	97,937	97,903	98,306	98,490
45,0	99,995	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	98,920	98,784	98,715	98,730	98,706	98,982	99,106

Tablo 4.31 356 ve 1332,5 keV enerjilerde RKV sonuçları (GEANT4)

Radyasyon Koruma Verimliliği (RKV) (GEANT4)														
Kalınlık(cm)	356 keV							1332,5 keV						
	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20
0,025	0,322	0,324	0,318	0,330	0,325	0,340	0,370	0,179	0,173	0,171	0,170	0,169	0,180	0,182
0,050	0,644	0,646	0,635	0,659	0,649	0,679	0,739	0,357	0,345	0,342	0,339	0,338	0,359	0,363
0,075	0,964	0,968	0,950	0,987	0,972	1,017	1,107	0,536	0,518	0,512	0,508	0,506	0,538	0,544
0,1	1,283	1,288	1,265	1,314	1,294	1,353	1,473	0,714	0,689	0,682	0,677	0,674	0,717	0,725
0,5	6,252	6,277	6,167	6,398	6,306	6,586	7,151	3,518	3,400	3,364	3,341	3,326	3,533	3,571
1,0	12,113	12,160	11,954	12,387	12,215	12,738	13,791	6,912	6,685	6,615	6,571	6,541	6,942	7,014
1,5	17,608	17,674	17,384	17,993	17,751	18,485	19,955	10,187	9,857	9,756	9,693	9,650	10,230	10,334
2,0	22,759	22,841	22,479	23,240	22,938	23,854	25,679	13,346	12,922	12,792	12,710	12,655	13,402	13,536
5,0	47,565	47,704	47,089	48,378	47,868	49,403	52,382	30,101	29,243	28,977	28,811	28,699	30,214	30,483
10,0	72,505	72,652	72,004	73,352	72,822	74,400	77,325	51,141	49,935	49,558	49,322	49,161	51,299	51,675
15,0	85,583	85,698	85,187	86,244	85,832	87,047	89,203	65,848	64,576	64,175	63,923	63,751	66,014	66,406
20,0	92,440	92,521	92,162	92,899	92,614	93,446	94,858	76,128	74,935	74,556	74,317	74,154	76,283	76,646
25,0	96,036	96,089	95,853	96,334	96,149	96,684	97,552	83,314	82,265	81,929	81,717	81,572	83,449	83,765
30,0	97,922	97,955	97,806	98,108	97,993	98,322	98,834	88,337	87,451	87,166	86,984	86,860	88,449	88,714
35,0	98,910	98,930	98,839	99,023	98,953	99,151	99,445	91,847	91,121	90,885	90,734	90,631	91,939	92,155
40,0	99,429	99,441	99,386	99,496	99,454	99,570	99,736	94,301	93,718	93,526	93,404	93,320	94,375	94,546
45,0	99,700	99,707	99,675	99,740	99,716	99,783	99,874	96,017	95,555	95,402	95,304	95,237	96,074	96,209

Tablo 4.32 ve 4.33'te Tablo 4.30 ve 4.31'deki gibi hesaplamalar yapılmıştır ancak bu defa değerler FLUKA programı ile elde edilmiştir. Bu tablolar sayesinde FLUKA ve GEANT4 sonuçlarını uyuşturduğu görülmektedir. Tablolardan da görüleceği üzere enerji arttıkça RKV değerleri düşmektedir.

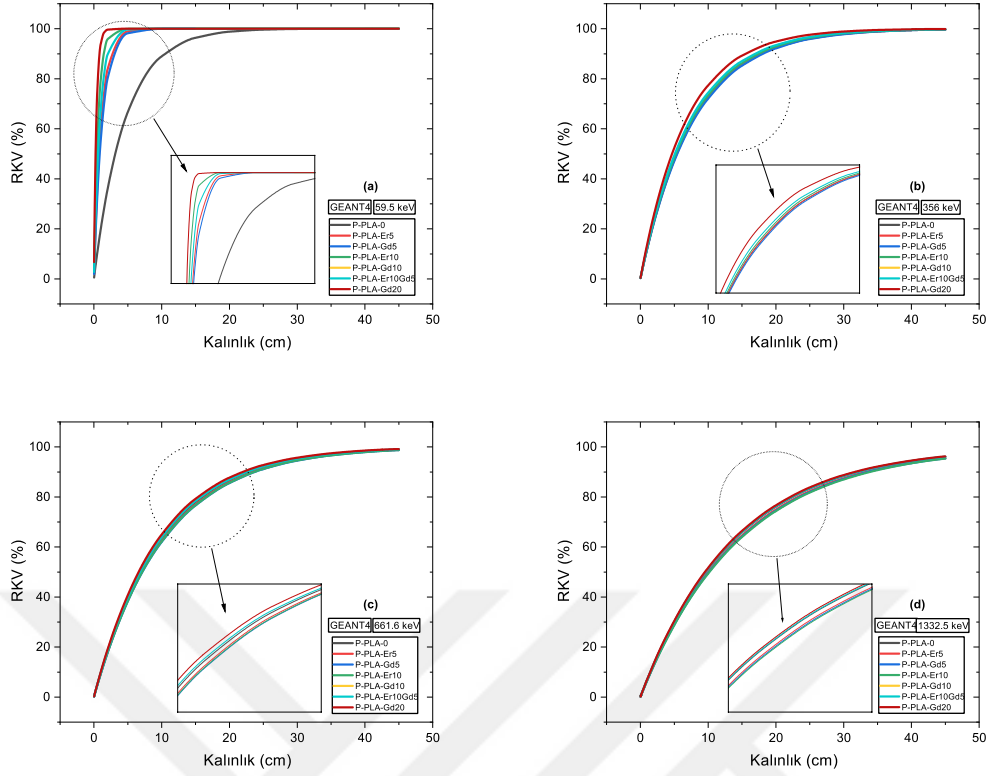
Tablo 4.32 59,5 ve 661,6 keV enerjilerde RKV sonuçları (FLUKA)

Radyasyon Koruma Verimliliği (RKV) (FLUKA)														
Kalınlık(cm)	59.5 keV							661,6 keV						
	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P- PLA- Gd20
0,025	0,586	2,311	2,056	3,979	5,269	2,869	6,916	0,250	0,243	0,240	0,241	0,363	0,254	0,262
0,050	1,168	4,570	4,070	7,799	10,261	5,655	13,354	0,499	0,486	0,480	0,482	0,724	0,507	0,523
0,075	1,747	6,775	6,043	11,468	14,989	8,361	19,346	0,747	0,728	0,720	0,722	1,085	0,760	0,783
0,1	2,323	8,930	7,974	14,990	19,469	10,990	24,924	0,995	0,969	0,959	0,961	1,444	1,012	1,043
0,5	11,086	37,357	34,000	55,605	66,129	44,129	76,149	4,877	4,754	4,702	4,714	7,013	4,958	5,106
1,0	20,943	60,759	56,440	80,290	88,528	68,784	94,311	9,516	9,281	9,182	9,206	13,534	9,669	9,950
1,5	29,707	75,418	71,251	91,250	96,114	82,559	98,643	13,930	13,594	13,452	13,486	19,598	14,147	14,548
2,0	37,499	84,601	81,025	96,115	98,684	90,256	99,676	18,127	17,701	17,521	17,564	25,236	18,404	18,911
5,0	69,118	99,069	98,432	99,970	99,998	99,704	100,000	39,348	38,556	38,219	38,299	51,669	39,858	40,788
10,0	90,463	99,991	99,975	100,000	100,000	99,999	100,000	63,213	62,246	61,831	61,930	76,641	63,829	64,939
15,0	97,055	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	77,688	76,802	76,418	76,511	88,710	78,246	79,240
20,0	99,090	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	86,467	85,746	85,431	85,507	94,544	86,917	87,708
25,0	99,719	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	91,792	91,242	90,999	91,058	97,363	92,132	92,721
30,0	99,913	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	95,022	94,619	94,439	94,483	98,725	95,268	95,690
35,0	99,973	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	96,981	96,694	96,564	96,596	99,384	97,154	97,448
40,0	99,992	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	98,169	97,968	97,877	97,900	99,702	98,288	98,489
45,0	99,997	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	98,889	98,752	98,689	98,704	99,856	98,971	99,105

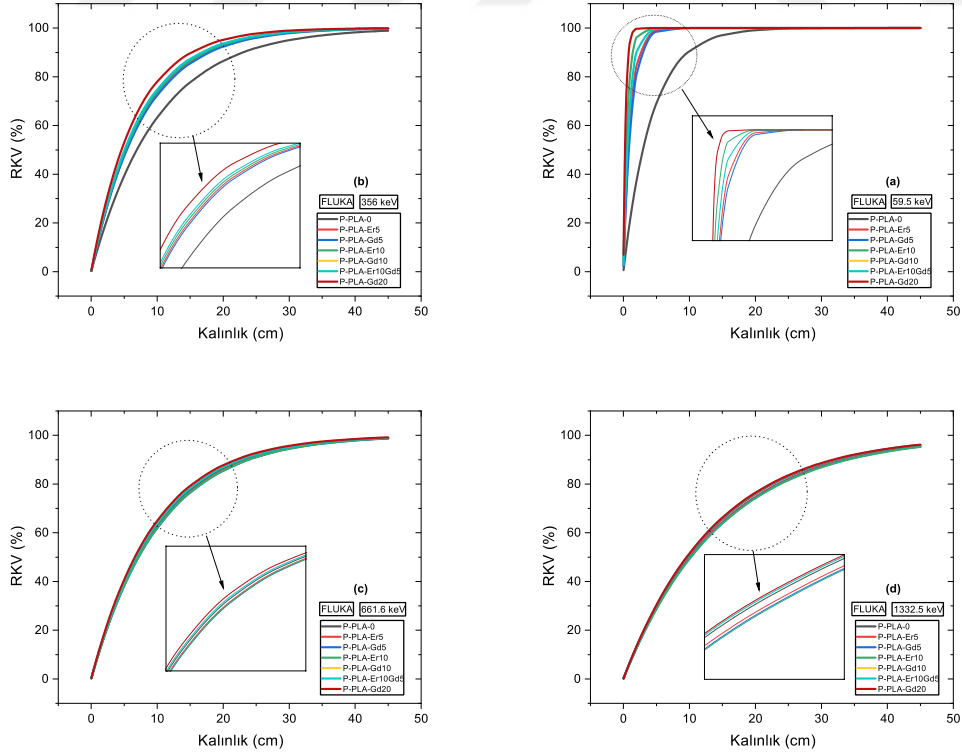
Tablo 4.33 356 ve 1332,5 keV enerjilerde RKV sonuçları (FLUKA)

Radyasyon Koruma Verimliliği (RKV) (FLUKA)														
Kalınlık(cm)	356 keV							1332,5 keV						
	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P-PLA- Gd20	P- PLA-0	P- PLA- Er5	P- PLA- Gd5	P- PLA- Er10	P- PLA- Gd10	P- PLA- Er10Gd5	P-PLA- Gd20
0,025	0,250	0,326	0,320	0,334	0,497	0,343	0,377	0,178	0,172	0,170	0,169	0,255	0,179	0,181
0,050	0,499	0,652	0,640	0,668	0,992	0,685	0,753	0,355	0,344	0,339	0,338	0,510	0,358	0,361
0,075	0,747	0,976	0,958	1,000	1,484	1,026	1,127	0,532	0,515	0,509	0,506	0,764	0,537	0,541
0,100	0,995	1,299	1,275	1,331	1,973	1,366	1,500	0,709	0,686	0,677	0,674	1,018	0,716	0,721
0,500	4,877	6,330	6,214	6,479	9,484	6,646	7,280	3,494	3,383	3,342	3,326	4,987	3,528	3,552
1,000	9,516	12,259	12,042	12,538	18,069	12,851	14,030	6,867	6,652	6,572	6,542	9,726	6,931	6,977
1,500	13,930	17,812	17,508	18,205	25,840	18,643	20,289	10,121	9,810	9,694	9,651	14,228	10,214	10,281
2,000	18,127	23,014	22,634	23,504	32,873	24,050	26,092	13,262	12,861	12,712	12,656	18,506	13,381	13,468
5,000	39,348	47,998	47,353	48,821	63,082	49,729	53,040	29,932	29,119	28,816	28,701	40,046	30,172	30,346
10,000	63,213	72,958	72,283	73,807	86,371	74,728	77,947	50,904	49,758	49,328	49,164	64,055	51,241	51,483
15,000	77,688	85,937	85,408	86,594	94,968	87,296	89,644	65,600	64,388	63,929	63,754	78,450	65,953	66,206
20,000	86,467	92,687	92,318	93,139	98,142	93,613	95,137	75,896	74,758	74,323	74,157	87,080	76,225	76,461
25,000	91,792	96,197	95,955	96,489	99,314	96,789	97,716	83,111	82,108	81,722	81,574	92,254	83,399	83,604
30,000	95,022	98,022	97,871	98,203	99,747	98,386	98,928	88,166	87,318	86,989	86,862	95,356	88,408	88,580
35,000	96,981	98,972	98,879	99,080	99,907	99,189	99,496	91,708	91,011	90,738	90,633	97,216	91,905	92,045
40,000	98,169	99,465	99,410	99,529	99,965	99,592	99,763	94,190	93,628	93,407	93,321	98,331	94,348	94,459
45,000	98,889	99,722	99,689	99,759	99,987	99,795	99,889	95,929	95,484	95,307	95,238	98,999	96,053	96,141

Tablo 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'te sunulan veriler Şekil 4.13 ve 4.14'te görselleştirilmiştir. Sonuçların birbiri içerisinde uyum içinde olduğu görülmektedir. yapılmıştır ancak bu defa değerler FLUKA programı ile elde edilmiştir. Bu tablolar sayesinde FLUKA ve GEANT4 sonuçlarını uyduğu görülmektedir. Tablolardan da görüleceği üzere enerji arttıkça RKV değerleri düşmektedir.



Şekil 4.13 GEANT4 programı ile 59,5 keV, 661,6 keV, 356,0 keV ve 1332,5 keV gama enerjilerinde RKV değerlerinin hesaplanması sonucunda elde edilen grafikler.



Şekil 4.14 FLUKA programı ile 59,5 keV, 661,6 keV, 356,0 keV ve 1332,5 keV gama enerjilerinde RKV grafikleri

Tablo 4.34, 4.35 ve 4.36’da üretimi gerçekleştirilen numunelerden gama zırhlama kabiliyeti en yükseği olan P-PLA-Gd20 ile geleneksel gama zırhlama malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen kurşunun 59,5 356,0 661,6 ve 1332,5 gama enerjilerinde RKV değerleri karşılaştırılmıştır. Kurşunun kalınlığı 0,5 mm’de sabit tutularak P-PLA-Gd20 numunesi sırasıyla 0,5cm 1 cm ve 2 cm kalınlıklarda olarak şekilde karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.34 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ve P-PLA-Gd20 RKV değerleri

0.5 MM KURŞUN, 0,5 MM P-PLA-Gd20 RKV (%) KARŞILAŞTIRMA		
Enerji(keV)	Kurşun (Pb)	P-PLA-Gd20
59,5	94,325	13,354
356,0	14,878	0,753
661,6	5,988	0,523
1332,5	3,110	0,361

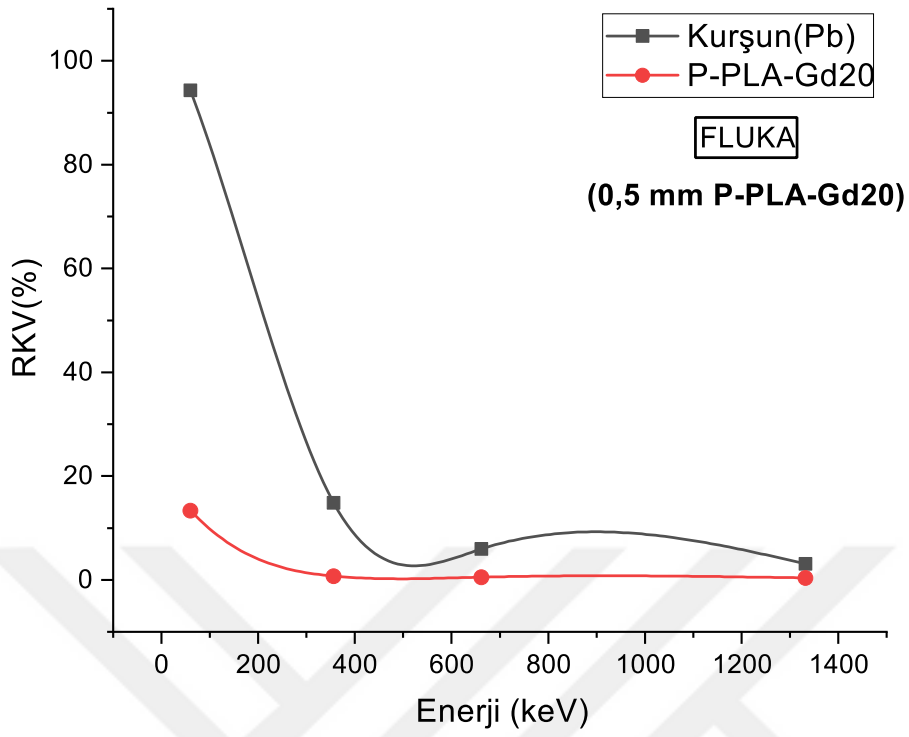
Tablo 4.35 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ile 1 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV değerleri

0.5 MM KURŞUN, 1 CM P-PLA RKV (%) KARŞILAŞTIRMA		
Enerji(keV)	Kurşun (Pb)	P-PLA-Gd20
59,5	94,325	94,311
356,0	14,878	14,030
661,6	5,988	9,950
1332,5	3,110	6,977

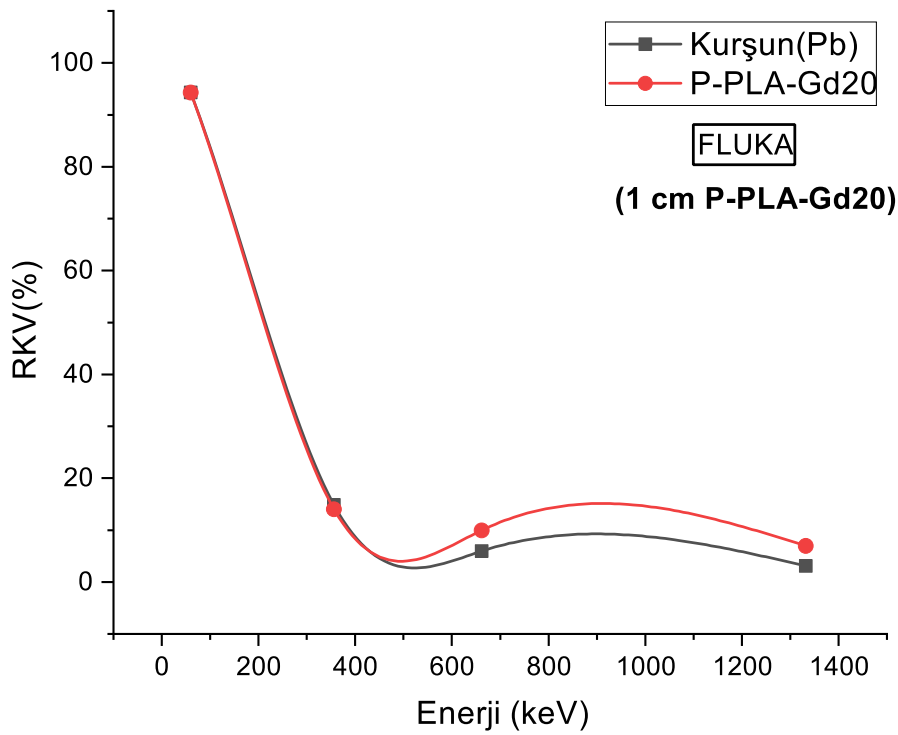
Tablo 4.36 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ile 2 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV değerleri

0.5 MM KURŞUN, 2 CM P-PLA RKV (%) KARŞILAŞTIRMA		
Enerji(keV)	Kurşun (Pb)	P-PLA-Gd20
59,5	94,325	99,676
356,0	14,878	26,092
661,6	5,988	18,911
1332,5	3,110	13,468

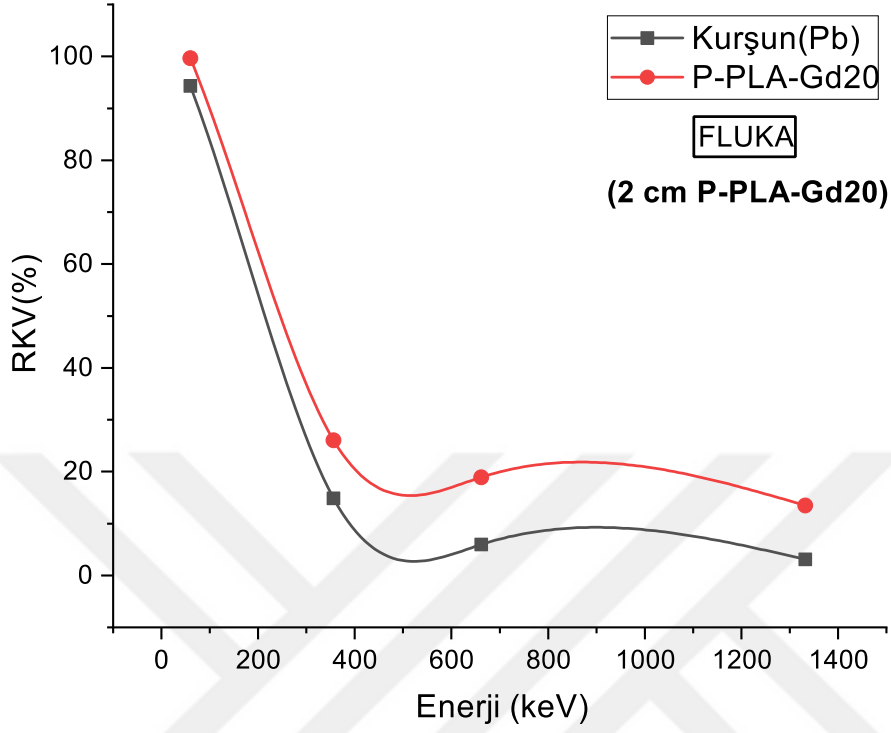
Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de 0,5 mm kalınlığındaki kurşun numunenin farklı kalınlıklardaki P-PLA-Gd20 numunesi ile kıyaslanması sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre 2 cm polimer numunesi 0,5 mm kurşun numunesi ile yaklaşık olarak eş değer zırhlama kabiliyeti sunmaktadır.



Şekil 4.15 0,5 mm kalınlıkta Kurşun ve P-PLA-Gd20 RKV değerleri grafiği



Şekil 4.16 0,5 mm kalınlıkta kurşun ve 1 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV grafiği



Şekil 4.17 0,5 mm kalınlıkta kurşun ve 2 cm kalınlıkta P-PLA-Gd20 RKV grafiği

4.3.Nötron Zırhlamasına Ait Bulgular

Nötronlara karşı zırhlama söz konusu olduğunda yaygın olarak kullanılan malzemeler genellikle düşük atom numaralı elementler ile katkılanmış beton ya da hidrojen ve oksijen ihtiva etmesi sebebiyle sudur.

Nötron doğası gereği yüksüz ve doğrudan atomun çekirdeği ile etkileşebilme kabiliyeti sebebiyle uygun zırhlama parametrelerinin belirlenmesi oldukça mühimdir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında üretilen katkılı numunelerin uzaklaştırma tesir kesitleri ile simülasyon yöntemleri vesilesiyle numunelerden geçen parçacık sayısı da Lambert-Beer yasasına uygun olacak şekilde hem kalınlığa hem de değişen nötron enerjilerine istinaden hesaplanmıştır. Uzaklaştırma tesir kesiti hesaplamalarının sonuçları Tablo 4.36’da görülebilmektedir. Nötron zırh malzemesi olarak kullanılacak malzemenin uzaklaştırma tesir kesiti ne kadar yüksekse zırhlama kabiliyetinin de o kadar etkin olduğunu belirtmek gerekmektedir. Diğer İlgili bulgular Tablo 4.38-4.41 aralığında, bu bulgular ile alakalı grafikler ise Şekil 4.19 ile 4.22 arasında verilmektedir.

Tablo 4.37’de parafin ve sıradan betonun uzaklaştırma tesir kesiti sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlar Tablo 4.36 ile kıyaslandığında üretilen polimer kompozit malzemelerin uzaklaştırma tesir kesiti bakımından sıradan betona göre daha iyi bir sonuç elde edildiği görülmüştür. Ayrıca parafinin üretilen numunelerden daha iyi uzaklaştırma tesir kesitine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.37 Numunelerin uzaklaştırma tesir kesiti ve diğer parametreleri

Numuneler	Parametreler	C	H	O	Er	Gd	Toplam cm ⁻¹
P-PLA-0	Ağırlıkça oranı	0,5000	0,0559	0,4440	0,0000	0,0000	0,0939
	Elementel yoğunluk	0,6136	0,0687	0,5449	0,0000	0,0000	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0308	0,0411	0,0221	0,0000	0,0000	
P-PLA-Er5	Ağırlıkça oranı	0,4750	0,0531	0,4281	0,0437	0,0000	0,0876
	Elementel yoğunluk	0,5664	0,0634	0,5104	0,0521	0,0000	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0284	0,0379	0,0207	0,0006	0,0000	
P-PLA-Gd5	Ağırlıkça oranı	0,4750	0,0531	0,4285	0,0000	0,0434	0,0867
	Elementel yoğunluk	0,5605	0,0627	0,5056	0,0000	0,0512	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0281	0,0375	0,0205	0,0000	0,0006	
P-PLA-Er10	Ağırlıkça oranı	0,4500	0,0504	0,4122	0,0875	0,0000	0,0829
	Elementel yoğunluk	0,5300	0,0593	0,4855	0,1030	0,0000	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0266	0,0355	0,0197	0,0012	0,0000	
P-PLA-Gd10	Ağırlıkça oranı	0,4500	0,0504	0,4129	0,0000	0,0867	0,0830
	Elementel yoğunluk	0,5301	0,0593	0,4864	0,0000	0,1022	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0266	0,0355	0,0197	0,0000	0,0012	
P-PLA-Er10Gd5	Ağırlıkça oranı	0,4990	0,0560	0,3920	0,0440	0,0130	0,0931
	Elementel yoğunluk	0,6187	0,0694	0,4860	0,0546	0,0161	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0311	0,0415	0,0197	0,0006	0,0002	
P-PLA-Gd20	Ağırlıkça oranı	0,4000	0,0448	0,3818	0,0000	0,1735	0,0823
	Elementel yoğunluk	0,5117	0,0573	0,4883	0,0000	0,2219	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0257	0,0342	0,0198	0,0000	0,0026	

Tablo 4.38 Parafin ve sıradan betonun uzaklaştırma tesir kesitleri

Numune ler	Parametr eler	C	H	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Tota l cm ⁻¹
Parafin	Ağırlıkça oran	0,85 14	0,14 86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12 24
	Elementel yoğunluk	0,79 18	0,13 82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Uzaklaştı rma tesir kesiti	0,03 97	0,08 26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sıradan beton	Ağırlıkça oran	0,00 00	0,00 33	0,49 58	0,01 48	0,00 61	0,04 57	0,33 55	0,00 03	0,00 15	0,00 01	0,01 89	0,06 37	0,00 09	0,00 02	0,01 31	0,05 42
	Elementel yoğunluk	0,00 00	0,00 74	1,11 60	0,03 33	0,01 37	0,10 29	0,75 52	0,00 07	0,00 34	0,00 02	0,04 25	0,14 34	0,00 20	0,00 05	0,02 95	
	Uzaklaştı rma tesir kesiti	0,00 00	0,00 44	0,04 52	0,00 11	0,00 05	0,00 30	0,02 23	0,00 00	0,00 01	0,00 00	0,00 11	0,00 35	0,00 00	0,00 00	0,00 06	

Bir önceki tablolarda teorik olarak hesaplanan uzaklaştırma tesir kesitleri sunulmuştur. Tablo 4.39 ve 4.40'ta sırasıyla GEANT4 ve FLUKA simülasyon sonuçları farklı numune kalınlıklarında verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre GEANT4 ve FLUKA sonuçlarının birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir. Ancak tez kapsamında seçilen nadir toprak elementlerini katkılamanın PLA malzemesinin hızlı nötron zırlama kabiliyetini geliştirmediği görülmektedir.

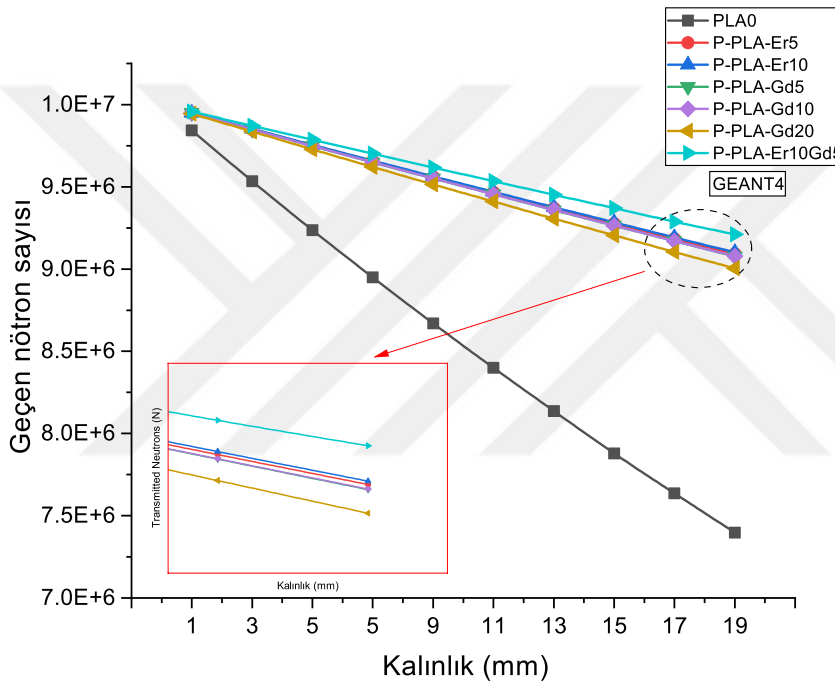
Tablo 4.39 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri

Nötron Transmisyon Değerleri (GEANT4)										
	1mm	3mm	5mm	7mm	9 mm	11mm	13 mm	15 mm	17mm	19 mm
P-PLA0	9842905	9535078	9237205	8949502	8669156	8398826	8136200	7878806	7636559	7398091
P-PLAEr5	9950225	9851051	9752644	9655283	9558912	9463756	9369388	9276001	9183780	9092034
P-PLAEr10	9950865	9852840	9755551	9659353	9564172	9470057	9376863	9284573	9193101	9102670
P-PLAGd5	9949345	9848490	9748285	9649313	9551168	9454691	9358706	9263639	9169759	9076699
P-PLAGd10	9949414	9848713	9748706	9649849	9551882	9455548	9359720	9264856	9171147	9078221
P-PLAGd20	9945034	9835796	9727605	9620312	9514592	9410720	9307023	9205064	9104498	9004399
P-PLAEr10Gd5	9956657	9870902	9786876	9701034	9617874	9535309	9452588	9370381	9288557	9210396

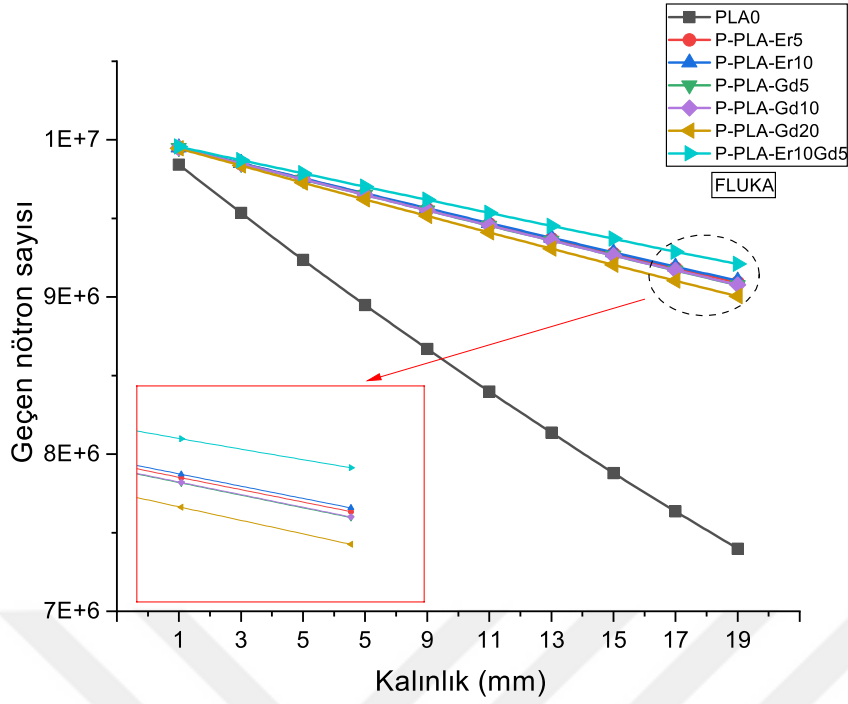
Tablo 4.40 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri

Nötron Transmisyon Değerleri (FLUKA)										
	1mm	3mm	5mm	7mm	9 mm	11mm	13 mm	15 mm	17mm	19 mm
P-PLA-0	9252331	9153675	8867717	8323037	8149007	8062873	7729390	7327290	7178365	6954206
P-PLA-Er5	9552216	9358498	9069959	9172519	8985377	8895931	8994612	8812201	8816429	8728353
P-PLA-Er10	9453322	9163141	9072662	9079792	9181605	8901854	9001788	8727499	8641515	8647537
P-PLA-Gd5	9352384	9159096	9260871	9263340	9169121	8981956	8797184	8707821	8802969	8532097
P-PLA-Gd10	9352449	9454764	9163784	8974360	8883250	8888215	8704540	8801613	8529167	8715092
P-PLA-Gd20	9348332	9344006	9046673	9235500	9134008	9034291	8655531	8836861	8740318	8464135
P-PLA-Er10Gd5	9458824	9377357	9101795	9312993	8944623	9153897	8790907	8808158	8731244	8749876

Tablo 4.39 ve Tablo 4.40'ta 4,5 MeV enerjide değişen kalınlıklardaki numuneler için nötron transmisyon değerleri yer almaktadır. Artan nötron enerjisi ile numunelerden geçen nötron sayısında artış gözlemlenmiştir. Bu değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 4.18 ve Şekil 19'da yer almaktadır. Tablo ve Şekillerden de görüleceği üzere P-PLA-0 numunesi diğer üretilen numunelere kıyasla nötron transmisyon bakımından daha iyi bir performans sergilemiştir. P-PLA-0 akabinde P-PLA-Gd20 numunesinin nötron zırhlama etkinliğinin diğer numunelerden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 1mm ve 3mm kalınlıklarında P-PLA-0 da dahil olmak üzere bütün numunelerin nötron transmisyon değerlerinin birbirine yakın olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.18 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki nötron transmisyon değerleri



Şekil 4.19 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki nötron transmisyon değerleri

Tablo 4.41 ve Tablo 4.42’de 10 mm kalınlıktaki numuneler için farklı gama enerjilerinde nötron transmisyon değerlerinin GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları kullanılarak elde edilmiş sonuçları yer almaktadır. Artan nötron enerjisi ile numunelerden geçen nötron sayısında artış gözlemlenmiştir. Bu değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 4.20’de yer almaktadır. Şekilde de görüleceği üzere P-PLA-0 numunesi diğer üretilen numunelere kıyasla nötron transmisyon bakımından daha iyi bir performans sergilemiştir. Fakat Şekil 4.20’de de görüleceği üzere nötron enerjisindeki artış ile katkılı numuneler ile saf P-PLA-0 numunesinin nötron transmisyon değerleri birbirine yaklaşmıştır.

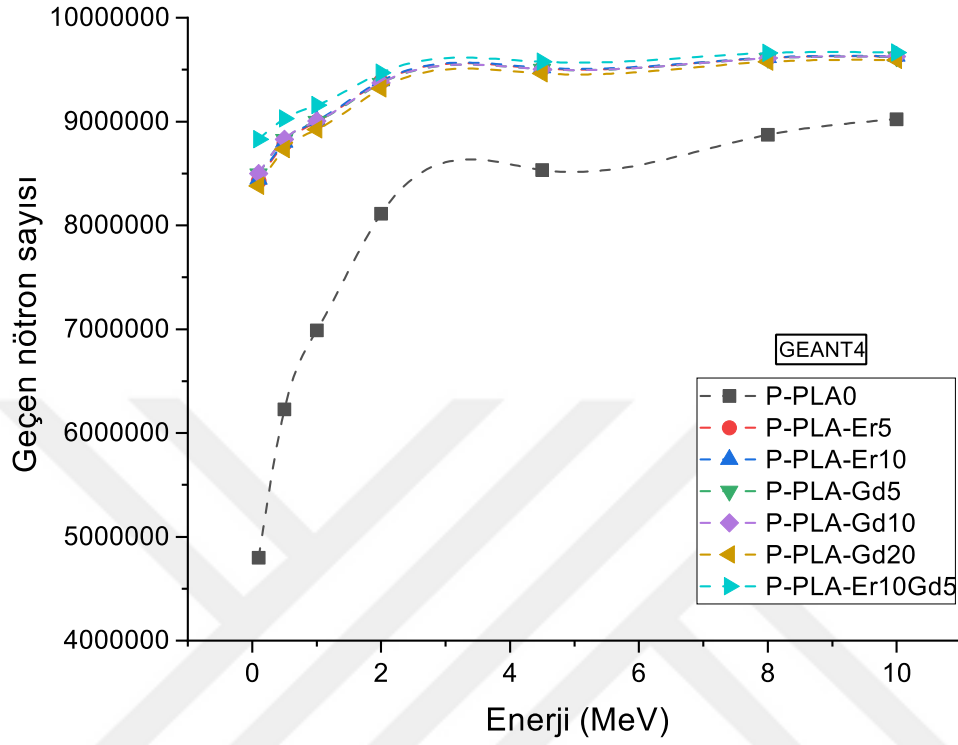
Tablo 4.41 Nötron transmisyon değeri

Nötron Transmisyon Değerleri (GEANT4)							
	0.1 MeV	0.5 MeV	1 MeV	2 MeV	4.5 MeV	8 MeV	10 MeV
P-PLA-0	4798642	6226752	6987673	8111078	8532552	8873019	9021907
P-PLA-Er5	8428198	8788947	8996949	9384230	9511173	9613000	9626262
P-PLA-Er10	8445755	8802568	9008608	9391623	9516992	9617474	9631359
P-PLA-Gd5	8495216	8827071	9001859	9369827	9502697	9608493	9623861
P-PLA-Gd10	8500057	8828954	9003506	9370881	9503514	9609140	9625144
P-PLA-Gd20	8381869	8734935	8922176	9318302	9462265	9575894	9593583
P-PLA-Er10Gd5	8829454	9027254	9157283	9469204	9575900	9660112	9663848

Tablo 4.42 Nötron transmisyon değeri

Nötron Transmisyon Değerleri (FLUKA)							
	0.1 MeV	0.5 MeV	1 MeV	2 MeV	4.5 MeV	8 MeV	10 MeV
P-PLA-0	4803806	6381942	6568622	8163936	8602648	8858718	9033880
P-PLA-Er5	5071667	6591390	6759035	8277665	8690415	8933476	9094029
P-PLA-Er10	5274887	6747675	6759035	8361570	8754184	8985887	9137272
P-PLA-Gd5	5107451	6747675	6784510	8292482	8701836	8941040	9101641
P-PLA-Gd10	3805552	5522636	6784510	7627298	8180100	8509825	8723191
P-PLA-Gd20	5359614	6798528	6928504	8376236	8765081	8992737	9137066
P-PLA-Er10Gd5	4809379	6423816	6902791	8169904	8608906	8861677	9046782

Şekil 4.20’de Tablo 4.1’de sunulan nötron transmisyon değerleri görselleştirilmiştir. Elde edilen grafik 10 mm numune kalınlığının için sunulmaktadır. Açıkça görüleceği üzere katkısız olan P-PLA-0 en iyi nötron zırhlama malzemesidir.



Şekil 4.20 10 mm kalınlıktaki numuneler için farklı enerjilerde transmisyon değerinin grafiği

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Radyasyon günümüzde hem faydalı uygulamaları hem de insan ve çevreyi olumsuz etkileyebilme riskleri sebebiyle kullanımında dikkat gösterilen bir olgudur. Bu dikkatli kullanımını pekiştirmek maksadıyla geliştirilen radyasyondan korunma prensiplerinden en etkin olarak değerlendirilebilecek çözüm zırhlamadır.

Radyasyondan korunmada kullanılan zırh malzemeleri radyasyonun hayatımıza dahil olduğu çeşitli endüstriyel uygulamalar ile tıbbi maksatlı kullanımları sebebiyle oldukça önemlidir. Bu zırh malzemelerine özellikle gama ve X-ışını radyasyonuna karşı gelenekselleşen ve belirli avantajlarına istinaden kullanılan kurşun ve kurşun temelli malzemeler örnek verilebilir. Bunun yanı sıra nükleer enerji santralleri ve araştırma reaktörleri gibi tesislerde nötron radyasyonuna karşı düşük atom numaralarına sahip elementler ihtiva eden beton ve elbette oksijen ve hidrojen varlığı sebebiyle su tercih edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında gama ve nötron radyasyonuna karşı alternatif bir zırh malzemesi geliştirmek adına üretim kolaylığı, sürdürülebilir olması, fiziksel özelliklerinin kurşuna göre avantajlı olması ve çevreye olumsuz etkilerinin bulunmaması gibi sebeplerle polimer bir malzeme olan PLA radyasyon zırhı olarak etkinliği incelenmiştir. İncelemeler yalnızca saf PLA polimeri ile değil, gama ve nötron radyasyonuna karşın zırhlama kabiliyetini artırabilmek amacıyla Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkı maddeleri ve katkı oranlarının radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışmasında PLA ile nano boyutta Er_2O_3 ve Gd_2O_3 metal tozlarının %5, %10 ve %20 olacak şekilde katkılanmaları ile üretilerek bir kompozit malzeme elde edilmesi akabinde gama radyasyonuna karşın zırhlama kabiliyetinin araştırılması öncelikle ^{241}Am (59.5 keV), ^{133}Ba (80.9, 276.3, 302.8, 356.0 ve 383.8 keV), ^{22}Na (511.0 ve 1274.5 keV), ^{137}Cs (661.6 keV) ve ^{60}Co (1173.2 ve 1332.5 keV) noktasal kaynakları kullanılarak yüksek saflıkta germanyum dedektörü aracılığıyla deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Hizmet alımı yoluyla üretimi gerçekleştirilen %5, %10 ve %20 katkılı polimer kompozit malzemelerin her birinin birleşim yerlerinin katmanlaşması ve boşluk oranlarının tespit edilebilmesi için SEM ve katkılanan nano boyuttaki metal tozlarının malzeme içerisinde homojen bir dağılım sergileyip sergilemediğinin tespiti için ise EDS analizi gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar ile elde edilen sayımlar sonrasında üretilen polimer kompozit numunelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama kabiliyetinin tespiti maksadıyla lineer zayıflatma katsayısı, kütle zayıflatma katsayısı, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunluğu ve teorik yığılma faktörü parametreleri hesaplanmıştır.

İncelenen parametreler yalnızca deneysel değil aynı zamanda teorik olarak WinXCOM ve EpiXS programları ile simülasyonlar içinse Monte Carlo metodu kullanarak hesaplama yapabilen simülasyon programları olan GEANT4 ve FLUKA ile de ayrıca hesaplanmıştır. Söz konusu parametreler deneysel veriler ile karşılaştırılarak tutarlılığın sağlanmasının yapılması amaçlanmıştır.

Nötron radyasyonuna karşı üretilen Er_2O_3 ve Gd_2O_3 katkılı PLA polimerinin zırhlama kabiliyetinin araştırılması amacıyla bahsi geçen simülasyon programları GEANT4 ve FLUKA kullanılmıştır. Bu simülasyon programları yoluyla gelen nötronun enerjisine ve üretilen numunelerin kalınlığına istinaden incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra numunelerin teorik uzaklaştırma tesir kesitleri de hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel ve teorik hesaplamaların bulguları Tablo 4.1 ile 4.42 arasında verilmektedir. İlgili bulguların grafikleri ise Şekil 4.1 ile 4.20 arasında görülebilir. Söz konusu tablo ve grafikler deneysel, teorik ve simülasyon çalışmalarının bir karşılaştırmasını yansıtmaktadır. Deneysel çalışmalar sonrasında ulaşılan sonuçlar ile teorik ve simülasyon çalışmalarının sonuçlarının birbirlerini doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Hizmet alımı yoluyla üretimi gerçekleştirilmesi planlanan numunelerin özellikle Er_2O_3 katkılı olanlarında metal tozu katkısı arttıkça PLA'nın varsayılan fiziksel özelliklerinin dışında kırılgenlik, şekil bozuklukları gibi özellikler sergilediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple %20 Er_2O_3 katkılı PLA ve %5 Er_2O_3 + %10 Gd_2O_3 katkılı numunelerin üretimi gerçekleştirilememiştir. Bu numuneler ayrıca deneysel ve simülasyon çalışmalarına dahil edilmemiştir. Bunlar haricindeki numunelerin tamamı 3D yazıcı ile basılabilecek kadar uygun fiziksel özellikler ile üretilmiştir.

Radyasyon zırhlama parametrelerinden ilk ele alınan parametre LAC parametresidir. LAC parametresinin birimi cm^{-1} dir. Elde edilen bulgular ışığında her bir üretilen numune için LAC değerleri HPGe dedektörü, FLUKA, GEANT4, WinXCOM, EpiXS kullanılarak çeşitli gama enerjilerinde elde edilmiştir. Bu parametre incelenirken

unutulmaması gereken şey LAC değerin malzemenin yoğunluğuna bağımlı bir değer olduğudur. Elde edilen bulgular Tablo 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da yer almaktadır. Bu bulgular neticesinde LAC değeri ne kadar büyük olursa zırh malzemesinin gama zırhlama kabiliyeti de o kadar iyi olduğu düşünülmektedir. Deneysel ve teorik, simülasyon yöntemleri ile hesaplanan değerler göz önünde bulundurulduğunda %20 Gd₂O₃ katkılı PLA'nın diğer örneklerle oranla daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Daha sonraki sıralama ise büyükten küçüğe doğru P-PLA-Er10, P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5 ve P-PLA-0 şeklindedir. Üretimi gerçekleştirilen tüm numunelerin hem deneysel hem de teorik ve simülasyon sonuçlarına istinaden yüksek enerjilerde birbirine yakın değerlere sahip olduğu anlaşılmaktadır fakat 59,5 keV ve 80,9 keV enerji aralığında P-P-PLA--0 ile P-P-PLA--Gd20 numuneleri arasında yaklaşık 10 katlık bir fark olduğu görülmüştür. Buradan katkı malzemesinin PLA polimerinin gama radyasyonu zırhlama performansı etkinliğini arttırdığı yorumu yapılabilmektedir.

Gama radyasyonuna karşın incelenen bir diğer parametre MAC parametresidir. MAC değeri numuneleri yoğunluktan bağımsız olarak radyasyon zırhlama kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için önemli bir parametredir. MAC değeri ne kadar büyükse malzemenin gama zırhlama kabiliyeti o kadar yüksek olduğu bilinmekle birlikte düşük enerjilerde MAC değerinin büyük olması, yüksek enerjilerde ise MAC değerinin düşük olması beklenmektedir. Elde edilen MAC değerine ait bulgular LAC değerinde de olduğu gibi numunelerin büyükten küçüğe doğru sıralaması P-PLA-Gd20, P-PLA-Er10, P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10Gd5, P-PLA-Er5, P-PLA-Gd5 ve P-PLA-0 şeklindedir. MAC değerine ait Şekil 4.4 ile Şekil 4.5'ten anlaşılabileceği üzere düşük enerjilerde en yüksek değerlerin %20 Gd₂O₃ katkılı PLA olduğu görülmektedir.

Bilindiği üzere yarı değer kalınlığının azalması daha iyi bir zırhlama performansı sağlaması sebebiyle zırh malzemesinin etkinliğini belirlemek konusunda oldukça mühim bir parametredir. YDK parametresi LAC değerinden hesaplanabilen bir parametredir. Dolayısıyla LAC ve YDK parametrelerinin bulgularının birbiri ile örtüşmesi beklenmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen hesaplamalar ve incelemeler neticesinde Tablo 4.10, 4.11, 4.12 ve Tablo 4.13 yer verilmiştir. Ayrıca grafiksel gösterimleri Şekil 4.6 ile Şekil 4.7'de yer almaktadır. Tablo ve grafiklerde verilen sonuçlarda %5, %10 ve %20 Gd₂O₃ katkılı numunelerin daha düşük yarı değer kalınlıklarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Katkısız P-PLA-0 numunesi ile P-PLA-Gd20 kıyaslandığında %20 katkılı Gd PLA numunesinin yaklaşık 11 kat az YDK değerine sahip olduğu görülmüştür.

Ortalama serbest yol değerleri incelendiğinde Tablo 4.14 ile Tablo 4.17’den da görülebileceği üzere düşük enerjilerde %20 Gd₂O₃ katkılı numunenin daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Ancak 511 keV sonrasındaki enerjilerde numuneler arasındaki farkın daha ayırıcı olmadığı görülmektedir.

Malzemelerin radyasyon karşısındaki zırlama kabiliyetlerinin araştırılması açısından kullanışlı olan diğer parametrelerden etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu sonuçlarına da değinmek faydalı olacaktır. Tablo 4.18’de EpiXS programı kullanılarak elde edilen etkin atom numarası ve Tablo 4.19’da etkin elektron yoğunluğu için hesaplanan sonuçlar yer almaktadır. Görsel hale getirilen bu tablolara ait grafikler ise sırasıyla Şekil 4.8, 4.9 ve Şekil 4.10’dan görülebilir. Buna göre etkin atom numarası yüksek olan malzemelerin daha iyi zırlama gerçekleştirdiği söyleyebilir. Aynı şekilde etkin elektron yoğunluğu da malzeme içerisindeki elektron yoğunluğunu ifade ettiğinden malzemenin N_e değeri ne kadar yüksek ise gelen radyasyon ile zırlama malzemesinin etkileşme ihtimalinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü üzere üretilen polimer kompozit numunelerin tamamının artan gama radyasyonu enerjisine istinaden Z_{etk} değerinin azaldığı görülmektedir. Düşük enerjilerde, özellikle 59,5 keV’de her bir numunenin oldukça yüksek zırlama kabiliyeti gösterdiği söylenebilir. Bunun yanı sıra Şekil 4.10’dan görülebileceği üzere %20 Gd₂O₃ katkılı polimer kompozit numune genel olarak diğer katkılı numunelere istinaden daha iyi bir zırlama kabiliyetine sahiptir. Akabinde gelen sıralama P-PLA-Gd10, P-PLA-Er10, P-PLA-Gd5, P-PLA-Er5, P-PLA-Er10Gd5 şeklindedir.

Gama radyasyonuna karşın incelenen parametrelerden olan teorik yığılma faktörü sonuçlarında ise 1, 5, 10 ve 40 ortalama serbest yol mesafesi için EpiXS programı kullanılarak hesaplanan sonuçlar Tablo 4.20 ile Tablo 4.27 arasında görülebilir. Bu sonuçlar yardımıyla oluşturulan grafikler iki ayrı başlık altında değerlendirilmiştir. İncelenen birinci teorik yığılma faktörü çeşidi olan enerji soğurma grafikleri Şekil 4.11’te verilmektedir. Bu grafiklere göre özellikle 59,5 keV enerjide diğer numunelere göre %20 Gd₂O₃ katkılı polimer kompozit malzemenin daha iyi enerji soğurma kabiliyeti gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca fark edilebileceği üzere değişen ortalama serbest yol mesafesine rağmen enerji soğurma teorik yığılma faktörleri kayda değer ölçüde değişmemektedir. Bunun yanı sıra bir diğer teorik yığılma faktörü sınıfı ise maruziyettir. Şekil 4.12 incelendiğinde enerji soğurma değerlerine benzer şekilde özellikle 59.5 keV enerjide %20 Gd₂O₃ katkılı numunenin daha yüksek değerlere sahip olduğu ve bu sebeplerle daha iyi

bir zırh malzemesi olarak değerlendirileceği söylenebilir. 59,5 keV 'den daha yüksek enerjilerde hem maruziyet hem de enerji soğurma teorik yığılma faktörlerinin hızla azaldığı fark edilmektedir. Tablo ve grafiklerinde fark edildiği üzere enerji soğurma ve maruziyet teorik faktörlerinde 0,0500 MeV ile 0,5000 MeV aralığında kayda değer ölçüde piklenme meydana gelmiştir.

Bir zırh malzemesinin radyasyon zırhı olarak kullanılabilirliğinin tespiti için oldukça kullanışlı bir parametre olan radyasyon koruma verimliliğine ait hesaplamalar Tablo 4.28 ile 4.31 arasında, grafikleri ise Şekil 4.13 ile 4.14'te verilmektedir. Sonuçlara istinaden açıkça görüldüğü üzere %20 Gd₂O₃ katkılı polimer kompozit numunenin daha iyi verimliliğe sahiptir. Bu durum incelenen dört farklı enerji için de kolaylıkla söylenebilir. Aynı zamanda %20 Gd₂O₃ katkılı numuneye yakın verimlilik gösteren %10 katkılı Gd₂O₃ numunesi ve aynı zamanda %5 Gd₂O₃+ %10 Gd₂O₃ katkılı numunelerden de bahsetmek gerekir. Bu numunelerin radyasyon koruma verimliliğinin özellikle 59,5 keV enerjide neredeyse %100 olduğu ve her bir simülasyon programı ile elde edilen sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Ancak radyasyon koruma verimliliğinin numunelerin kalınlığı ile doğrudan alakalı olduğu da tespit edilmiştir. Bu maksatla incelendiğinde 59,5 keV, 356 keV ve 661,6 keV enerjilerde yaklaşık 20 cm numune kalınlığında %100 radyasyon koruma verimliliğine yaklaşıldığı görülmektedir. 1332 keV enerjide ise daha yüksek kalınlıklarda koruma verimliliği %100'e yaklaşmaktadır.

Nötron radyasyonuna karşı 3D baskı yoluyla üretilen polimer kompozit malzemelerin GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları yoluyla yapılan hesaplamalarında öncelikle 4,5 MeV nötron enerjisinde değişen kalınlıklardaki ve hemen ardından değişen enerjilerde 10 mm kalınlıktaki malzemelerden geçen nötron sayısı hesaplanmıştır. Sonrasında hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri de incelenmiştir. Şekil 4.19 ile Şekil 4.20'de görüleceği üzere artan kalınlıklarda tüm numunelerden geçen nötron sayısı azalmaktadır. Ayrıca %20 Gd₂O₃ katkılanarak üretimi gerçekleştirilmiş olan polimer kompozit malzemenin 4.5 MeV enerjili nötronlar karşısında diğer katkılı numunelere kıyasla daha iyi zırhlama kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Fakat nötron zırhlama bakımından tüm numuneler değerlendirilecek olursa P-PLA-0 numunesi katkılı numunelere kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Bunun sebebinin P-PLA-0 numunesinin içerisinde bulunan hidrojen elementinin diğer katkılı numunelere oranla daha fazla olmasına bağlanmaktadır çünkü hidrojen elementinin nötron yakalama tesir kesiti yüksektir.

Şekil 4.21 ve 4.22’de görüleceği üzere 0,1 MeV’den 10 MeV’e kadar artarak ilerleyen enerjilerde 10 mm numune kalınlığında %10 Gd₂O₃ katkılı numune ve %10 Er₂O₃ + %5 Gd₂O₃ katkılı numune incelenen diğer katkılı polimer kompozit malzemelere göre nötron radyasyonuna karşı daha iyi zırhlama etkinliği göstermektedir.

Tablo 4.36’da da her bir numune için ayrı ayrı hesaplanan toplam hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti sonuçlarına yer verilmektedir. Buna göre katkısız olarak üretimi gerçekleştirilen PLA numunesindeki karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının ağırlık oranları sebebiyle diğer katkılı polimer kompozit malzemelere göre nispeten daha yüksek bir uzaklaştırma tesir kesitine sahip olduğu görülmüştür. Özellikle hidrojen ve oksijenin numune içerisindeki ağırlıkça oranının değişmesi böyle bir zırhlama kabiliyetini işaret ediyor olduğu düşünülebilir. Ayrıca diğer hesaplamalarda da görüldüğü üzere %10 Er₂O₃ + %5 Gd₂O₃ katkılı polimer kompozit malzeme numunesinin de diğer katkılı numunelere göre daha yüksek bir uzaklaştırma tesir kesitine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca Tablo 4.37’de görüldüğü üzere üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin sıradan betonun uzaklaştırma tesir kesiti bakımından daha iyi bir zırh performansı sergilediği görülmektedir. Fakat parafin için kıyaslama yapıldığında parafinin uzaklaştırma tesir kesitinin üretilen kompozit malzemelerden nötron zırhlama bakımından daha etkin olduğu anlaşılmaktadır.

Nitekim nötron radyasyonuna karşı PLA filamentinin zırhlama kabiliyetinin söz konusu metal tozları ile katkılандığında azaldığı tespit edilmiştir. GEANT4 ve FLUKA ile gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde elde edilen bulgular da katkılamanın numunelerin hızlı nötronlara karşı gösterdiği zırhlama etkinliğini artırmadığını doğrulamaktadır.

Er₂O₃ ve Gd₂O₃ katkılanarak üretimi gerçekleştirilen ve hem deneysel hem de teorik ve simülasyon çalışmaları ile çeşitli zırhlama parametreleri değişen enerjilerde ve kimi durumda değişen numune kalınlığında incelenen polimer kompozit malzemelerden %20 Gd₂O₃ katkılı olan numunenin gama radyasyonuna karşın daha iyi bir zırhlama kabiliyeti gösterdiği yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür. Nano boyuttaki metal tozları %5, %10 ve %20 ile birlikte karışık olmak kaydıyla %10 Er₂O₃ + %5 Gd₂O₃ katkılanarak üretilmesindeki maksat katkı oranlarının artışı ile radyasyon zırhlama kabiliyetindeki değişikliklerin incelenebilmesidir. Tez çalışması %20 katkı oranı ile sınırlandırılmış ve elde edilen bulgular ile yapılan incelemeler neticesinde Gd₂O₃ katkısının artırılması

yoluyla daha iyi gama radyasyonuna karşın zırhlama kabiliyetinin elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

Nötronlara karşı zırhlama kabiliyeti simölasyonlar yoluyla incelenen numunelerden %20 Gd₂O₃ katkılı olan PLA, saf PLA haricinde üretilen diğer numunelerden daha iyi bir zırhlama kabiliyeti göstermiştir. Ancak hali hazırda nötronların yaygın olarak radyasyon uygulamalarında kullanıldığı nükleer enerji santralleri ya da araştırma reaktörleri gibi çalışma alanlarında kullanılan betona istinaden daha etkin bir zırh malzemesi olarak kullanılmasının mümkün olmadığı değerlendirilmektedir.

Radyasyon koruma verimliliği ve diğer tüm parametreler göz önünde bulundurulduğunda %20 Gd₂O₃ katkılı PLA, sürdürülebilirlik, çevresel etkileri ve fiziksel özellikleri ile birlikte 3D yazıcılarla şekil verilebilirliği gibi avantajları sayesinde bilhassa düşük enerjilerde özellikle medikal gama radyasyonu uygulamalarının gerçekleştirildiği çalışma alanlarında kurşun ve kurşun temelli geleneksel, alışılmış radyasyon zırhlarının yerine kullanılabilir olduğu görölmüştür.

KAYNAKLAR

- Çömez, M. (2019). *Yalın üretim teknikleriyle imal edilen malzemelerin artıkları ile üretilen granüllerden elde edilen yeni pla filamentinin özelliklerinin incelenmesi*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi.
- Özge, Ö. (2019). *Kurşun Alaşımının Kütle Azaltma Katsayısının Co-60 Radyoaktif Kaynağı Ve GEANT4 Simülasyon Programı İle Belirlenmesi*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi.
- AbuAlRoos, N. J. (2019). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108439.
- Adlienë, D. G. (2020). Development and characterization of new tungsten and tantalum containing composites for radiation shielding in medicine. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 467, 21-26.
- Agar, O. K.-O. (2019). Evaluation of the shielding parameters of alkaline earth based phosphate glasses using MCNPX code. *Results in Physics*, 12, 101-106.
- Akıllı, V. (2019). *Bizmut oksit-kurşun klorür-tellür oksit sisteminin ısı, optik ve yapısal açıdan incelenerek camlaşma davranışlarının belirlenmesi ve camların radyasyon zırlama özelliklerinin incelenmesi*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Akçaalan, U. (2015). *Farklı maddelerle katkılanmış beton malzemenin gama soğurma katsayılarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi*. Yayınlanmış yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Akkurt, İ., Başyiğit, C., Akkaş, A., Kılınçarslan, Ş., Mavi, B., & Günoğlu, K. (2012). Determination of some heavyweight aggregate half value layer thickness used for radiation shielding. *Acta Physica Polonica A*, 121(1), 138-140.
- Akman, F., Ogul, H., Kaçal, M. R., Polat, H., Dilsiz, K., & Turhan, M. F. (2020). Impact of lead(II) iodide on radiation shielding properties of polyester composites. *Applied Physics A*, 126, 301.
- Al-Sarray, E. A. (2017). Radiation shielding properties of some composite panel. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 490-492.
- Alshahrani, B. O.-B. (2021). Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109386.
- Araz, A. (2020). *Radyasyon Zırlama için Yeni, Hafif, Kompozit Malzemeler*. Yayınlanmış doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- Ardiansyah, A. T. (2023). Science mapping for concrete composites as radiation shielding: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 110835.
- Atashi, P. R. (2018). Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi₂O₃ for gamma ray shielding application . *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 12306-12322.

- Atta, E. Z. (2015). Research article study on polymer clay layered nanocomposites as shielding materials for ionizing radiation. *International Journal of Recent Scientific Research*, 6(5), 4263-4269.
- Aygün, B. (2015). *Nükleer Uygulamalarda Radyasyon Güvenliği Amacıyla Yeni Kalkan Malzemelerin Deneysel Ve Monte Carlo Simülasyon Kodları (CERN-FLUKA ve GEANT4) İle Belirlenmesi Ve Fabrikasyonu*. Yayınlanmış doktora tezi, Atatürk Üniversitesi.
- Belgin, E. E. (2017). *Elektromanyetik radyasyon zırhlama uygulamaları için farklı metal tuz takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi*. Yayınlanmış doktora tezi, Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi.
- Bozkurt, A. (2015). Radyolojik Uygulamalar için Monte Carlo. *XV. Ulusal Medikal Fizik Kongresi* (s. 16-19). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Caner, D. (2020). *Heterokollu Yıldız PLA-PCL/PLA Kompozitlerinin Hazırlanması Ve Diizosiyanat Uyumlaştırıcılarının Etkisinin İncelenmesi*. Yayınlanmış Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- Ceh, J. Y. (2017). Bismuth infusion of ABS enables additive manufacturing of complex radiological phantoms and shielding equipment. *Sensors*, 17(3), 459.
- Daungwilailuk, T. Y. (2022). Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons. *Construction and Building Materials*, 326, 126838.
- Dilsiz, K. O. (2021). Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865.
- Feifei, L., Li, Z., Jin, X., Liu, Y., Li, P., Shen, Z., & Li, Q. (2019). Radiosensitizing effect of gadolinium oxide nanocrystals in NSCLC cells under carbon ion irradiation. *Nanoscale research letters*, 14(1), 1-12. 32890.
- Gollnick, D. A. (1994). *Basic radiation protection technology*.
- Gwaily, S. E. (2002). Galena/(NR+ SBR) rubber composites as gamma radiation shields. *Polymer testing*, 21(8), 883-887.
- Hamad, R. M. (2021). A comprehensive ionizing radiation shielding study of Fe_xSe_{0.5}Te_{0.5} alloys with various iron concentrations. *Journal of Alloys and Compounds*, 858, 157636.
- Hughes, G. (1973). *Radiation Chemistry*.
- Kaplan, M. F. (1989). *Concrete radiation shielding*. United States.
- Karaman, E. (2013). *Protonların Hedef Madde İle Etkileşmesinin FLUKA Simülasyon Yöntemiyle İncelenmesi*. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kavaz, E. E. (2019). Estimation of gamma radiation shielding qualification of newly developed glasses by using WinXCOM and MCNPX code. *Progress in nuclear energy*, 115, 12-20.
- Kaya, İ. S. (2012). Nükleer enerji dünyasında çevre ve insan. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 71-90.
- Kaya, M. (2016). *Bazalt elyaf takviyeli polilaktik asit (pla) kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

- Khanna, A. B. (1996). Gamma-ray attenuation coefficients in some heavy metal oxide borate glasses at 662 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 114(3-4), 217-220.
- Kim, J. H. (2018). Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding. *The Korean journal of pain*, , 31(3), 145-146.
- Kinalır, K. G. (2011). *A Study on the Effects of Gamma Radiation on the Properties of Polycarbonate*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Kobayashi, S., Hosoda, N., & Takashima, R. (1997). Tungsten alloys as radiation protection materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 390(3), 426-430.
- Kumar, A. (2017). Gamma ray shielding properties of PbO-Li₂O-B₂O₃ glasses. *Radiation Physics and chemistry*, 136, 50-53.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering (Vol. 3, p. 783)*. Upper Saddle River, NJ:: Prentice hall.
- Levin, C. S., & Hoffman, E. J. (1999). Calculation of positron range and its effect on the fundamental limit of positron emission tomography system spatial resolution. *Physics in Medicine & biology*, 44(3), 781.
- Mahapatro, A. &. (2011). Biodegradable nanoparticles are excellent vehicle for site directed in-vivo delivery of drugs and vaccines. *Journal of nanobiotechnology*, 9, 1-11.
- Malekie, S., & Hajiloo, N. (2017). Comparative study of micro and nano size WO₃/E44 epoxy composite as gamma radiation shielding using MCNP and experiment. *Chinese Physics Letters*, 34(10), 108102.
- Mann, K., Rani, A., & Heer, M. (2015). Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics Chemistry*, 106:247–254.
- McGraw, & Hill. (2009). *Introduction to health physics*.
- Melnick, L. M. (1951). Neutron-Absorbing Glass: CdO-SiO₂-B₂O₃ System. *Journal of the American Ceramic Society*, 34(3), 82-86.
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoń, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 12321-12333.
- More, C. V. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 2057-2090.
- Murty, M., & Cooper, B. (1999). Instability in molecular beam epitaxy due to fast edge diffusion and corner diffusion barriers. *Phys. Rev. Lett*, 83, 352.
- Muthamma, M. V. (2019). Poly (vinyl alcohol)–bismuth oxide composites for X-ray and γ -ray shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(37), 47949.
- Nambiar, S. &. (2012). Polymer-composite materials for radiation protection. *ACS applied materials & interfaces*, 4(11), 5717-5726.

- Niksarlioğlu, S. A. (2023). An extensive investigation on gamma shielding properties of PLA/Gd₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110936.
- Obregón, S., Kubacka, A., Fernández-García, M., & Colón, G. (2013). High-performance Er³⁺-TiO₂ system: dual up-conversion and electronic role of the lanthanide. *Journal of Catalysis*, 299, 298-306.
- O'Donnell, J. H., & Sangster, D. F. (1970). *Principles of Radiation Chemistry*. American Elsevier Publishing Company Inc.
- Pehlivan, M. (2019). *Orta Karadeniz Bölgesi yer seviyesi kozmik radyasyon dozunun FLUKA simülasyon yoluyla hesaplanması*. Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Price, B. T. (1957). *Radiation shielding*. Pergamon press.
- Rothwell, W. S. (1958). *Radiation shielding window glasses*. Corning Glass Works. Research Laboratory.
- Sürücü, A. M. (2021). *Nanomalzemelerle güçlendirilmiş radyasyon zırhlama özelliğine sahip polimer kompozit üretilmesi*. Yayınlanmış Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi.
- Saiyad, M. D. (2014). Study the effect of dispersion of filler in polymer composite for radiation shielding. *Polymer composites*, 35(7), 1263-1266.
- Shapiro, J. (1990). *Radiation protection: a guide for scientists and physicians*.
- Shultis, J. K. (2000). *Radiation shielding (Vol. 555)*. La Grange Park, IL.: American Nuclear Society.
- Tüfekçi, M. M. (2017). *Ultra yüksek performanslı çimento esaslı ağır kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması*. Yayınlanmış Yüksek doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Termek, H. (2021). *Nano katkılı biyokompozitlerin otomotiv malzemelerinde kullanılması*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi.
- Tokdemir, V. (2022). *3D yazıcılar için ahşap biyo-kompozit filament üretimi ve bazı özelliklerinin incelenmesi*. Yayınlanmış doktora tezi, Karabük Üniversitesi.
- Tsepelev, A. B. (2019). Electron irradiation resistance of the composite material structure based on ultra-high molecular polyethylene and boron carbide. In *Journal of Physics: Conference Series* (s. (Vol. 1347, No. 1, p. 012028).). IOP Publishing.
- Tuna, T. (2017). *Polyester matrisli bor karbür takviyeli nötron radyasyonu zırhlama malzemesi geliştirilmesi ve karakterizasyonu*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Vural, Ö. (2019). *Antimon (Cevheri Ve Konsantresi) Ve Demir Konsantresi Katkılı Silikon Kauçuk Malzemelerin Diagnostik X-Işınlarını Zayıflatma Özelliklerinin Belirlenmesi*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Wady, P. W. (2020). Effect of ionising radiation on the mechanical and structural properties of 3D printed plastics. *Additive Manufacturing*, 31, 100907.
- Wu, Y. C. (2020). Mechanical properties and gamma-ray shielding performance of 3D-printed poly-ether-ether-ketone/tungsten composites. *Materials*, 13(20), 4475.

- Yıldırım, Y. &. (2018). Structural changes in Poly (lactic acid)–zeolite nanocomposites exposed to 60Co gamma rays. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 173(5-6), 435-445. .
- Yavuz, S. (2023). *Kolemanit parçacık takviyeli pla kompozit filament üretimi ve karakterizasyonu* . Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi.
- Zehir, B. B. (2022). Molecular dynamics simulation and experimental investigation of mechanical properties of calcium carbonate and graphene reinforced polylactic acid nanocomposites. *Journal of Molecular Modeling*, J 29(6), 187.
- Zeyad, A. M. (2022). Effect of aggregate and fibre types on ultra-high-performance concrete designed for radiation shielding. *Journal of Building Engineering*, 58, 104960.
- Zeyrek, C. (2013). İyonize radyasyon uygulamaları için güvenlik ve korunmaya yönelik genel kavramlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 1-9.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hatice YILDIZ

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Behice Yazgan Kız Anadolu Lisesi, 2017

Lisans : Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Nükleer
Enerji Mühendisliği, 2021

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Elektrik Üretim Anonim Şirketi, Afşin Termik Santrali, Stajyer
Mühendis, 07-08 2019

İş Yeri : TENMAK, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
Stajyer Mühendis, 07-08 2020