

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



SERAMİK BOYA KATKILI PLA POLİMERLERİNİN
RADYASYON ETKİLEŞİM VE YAPI ANALİZLERİ

KAAN ŞAVLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

PROF. DR. HASAN OĞUL

SİNOP- 2025

TEZ KABUL

Kaan ŞAVLI tarafından hazırlanan “**SERAMİK BOYA KATKILI PLA POLİMERLERİNİN RADYASYON ETKİLEŞİM VE YAPI ANALİZLERİ**”

başlıklı bu çalışma, 21.03.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Ferdi Akman
Bingöl Üniversitesi/ Bingöl Sosyal Bilimler
Meslek Yüksek Okulu

İmza

**Üye
(Danışman)**

Prof. Dr. Hasan OĞUL
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hakan US
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

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.

Kaan Şavlı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERAMİK BOYA KATKILI PLA POLİMERLERİNİN RADYASYON ETKİLEŞİM VE YAPI ANALİZLERİ

KAAN ŞAVLI

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. HASAN OĞUL

Radyasyon zırhlama uygulamaları, radyasyon teknolojisinin kullanıldığı tüm alanlarda temel bir gereksinim olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tezde, 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan Polilaktik Asit (PLA) polimerine Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 esaslı seramik toz boyaların ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerin, gama ve nötron radyasyonuna karşı zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Polimer malzeme içerisine seçilen seramik boyaların eklenmesinin yanı sıra, saf PLA'dan elde edilen numunelerin dış yüzeyleri de belirtilen seramik boyalar kullanılarak Dip (Dalma) yöntemiyle kaplanmıştır. İlk olarak, katkı ve kaplanmış polimer kompozitlerin morfolojisi ve özellikleri SEM analizi ile değerlendirilmiştir. SEM analizleriyle numune üretiminin başarılı olduğu doğrulandıktan sonra, gama radyasyonu zırhlama performansını değerlendirmek amacıyla, numuneler için lineer azaltma katsayısı ve yarı kalınlık değerini içeren bazı parametreler hem deneysel yöntemlerle hem de GEANT4 simülasyon programı kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, teorik hesaplama programı WinXCOM ile desteklenmiştir. %10 Sb_2O_3 içeren PLA'nın özellikle düşük enerjilerde gama radyasyonuna karşı diğer numunelere kıyasla daha etkili bir koruma sağladığı tespit edilmiştir. Üretilen numunelerin nötron zırhlama kabiliyetleri ise hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti hesaplanarak teorik yöntemle değerlendirilmiş, ayrıca GEANT4 simülasyon programı kullanılarak numuneler içinden geçen nötron sayıları simüle edilmiştir. Nötron radyasyonu zırhlama hesaplarında, GEANT4 programı yardımıyla oluşan ikincil radyasyonlar ve radyasyon hasarı da dikkate alınmıştır. Bulgular, ticari olarak kullanılan seramik boyaların PLA polimerinin hızlı nötron zırhlama kabiliyetini artırdığını ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Radyasyon Zırhlama; PLA; Cr_2O_3 ; Sb_2O_3

Mart 2025 93 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

RADIATION INTERACTION AND STRUCTURE ANALYSES OF CERAMIC DYE ADDED PLA POLYMERS

KAAN ŞAVLI

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF NUCLEAR ENERGY ENGINEERING
SUPERVISOR:PROF. DR. HASAN OĞUL**

Radiation shielding applications are a fundamental necessity in all fields where radiation technology is utilized. This thesis aims to investigate the usability of composites, obtained by adding Cr_2O_3 and Sb_2O_3 -based ceramic pigments to Polylactic Acid (PLA), a polymer widely used in 3D printers, as shielding materials against gamma and neutron radiation. In addition to incorporating the selected ceramic pigments into the polymer material, the outer surfaces of samples made of pure PLA were coated with the specified ceramic pigments using the Dip Coating method. Firstly, the morphology and properties of the doped and coated polymer composites were evaluated using SEM analysis. After confirming the successful production of the samples through SEM analyses, key parameters such as linear attenuation coefficient and half-value layer were determined for the samples to evaluate their gamma radiation shielding performance using both experimental methods and the GEANT4 simulation program. The findings were supported by theoretical calculations using the WinXCOM program. It was found that PLA containing 10% Sb_2O_3 provided more effective protection against gamma radiation, especially at low energies, compared to other samples. The neutron shielding capabilities of the produced samples were evaluated theoretically by calculating the fast neutron removal cross-section and further investigated by simulating the number of neutrons passing through the samples using the GEANT4 simulation program. In the neutron radiation shielding calculations, secondary radiation and radiation damage generated with the help of the GEANT4 program were also considered. The findings revealed that commercially available ceramic pigments enhance the fast neutron shielding capability of PLA polymer.

KEYWORDS: Radiation Shielding; PLA; Cr_2O_3 ; Sb_2O_3

March 2025 93 Page

TEŞEKKÜR

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

Araştırmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Sinop Üniversitesi Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezine, özellikle de Dr. Fatih BULUT’a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca jüride değerli vaktini ayırarak yorumlarıyla ve düzeltmeleriyle tez çalışmasına katkıda bulunan Prof. Dr. Ferdi AKMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan US’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu zorlu araştırma yolculuğunda ve tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen annem Yurdagül ŞAVLI ve babam Erol ŞAVLI ’ya teşekkürü bir borç bilirim. Maddi ve manevi desteklerinin yanı sıra her daim yanımda olmaları benim için dünyalara bedeldir.

Kaan Şavlı

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Radyasyon Kavramı ve Radyasyon Tipleri	4
2.1.1 Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi	4
2.1.1.1 Fotoelektrik etki.....	5
2.1.1.2 Compton saçılması	5
2.1.1.3 Çift oluşum.....	6
2.1.2 Nötronun madde ile etkileşimi.....	7
2.1.2.1 Esnek saçılma.....	7
2.1.2.2 Esnek olmayan saçılma.....	7
2.1.2.3 Işınımlı yakalama	8
2.1.2.4 Fisyon.....	8
2.2 Radyasyondan Korunma Yöntemleri.....	8
2.2.1 Gama ışınlarının azaltılması.....	9
2.2.2 Radyasyon zırhlamada kullanılan malzemeler	10
2.2.2.1 Antimon oksit.....	11
2.2.2.2 Krom oksit.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM	12
3.1 PLA'nın Genel Özellikleri	12
3.2 PLA'nın Radyasyon Zırhlama Uygulaması.....	13
3.3 Deneysel Çalışma	14

3.3.1	Numunelerin hazırlanması	14
3.3.2	Dip (Dalma) yöntemi ile numunelerin boyanması.....	18
3.3.3	SEM analiz süreci.....	19
3.3.4	Gama radyasyonu zırhlama için deneysel süreç.....	19
3.4	Simülasyon Çalışmaları.....	20
3.4.1	Gama radyasyonu zırhlama analizi	20
3.4.1.1	WinXCOM analizi	20
3.4.1.2	EpiXS analizi	21
3.4.1.3	GEANT4 analizi	22
3.4.2	Nötron radyasyonu zırhlama analizi	24
4.	BULGULAR	27
4.1	SEM Analiz Sonuçları	27
4.2	Gama Radyasyonu Zırhlama Parametrelerine Ait Bulgular	29
4.2.1	Lineer azaltma katsayısına ait bulgular	30
4.2.2	Kütle azaltma katsayısına ait bulgular.....	39
4.2.3	Yarı kalınlık değerine ait bulgular	44
4.2.3	Etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu parametrelerine ait bulgular	49
4.2.4	Yığılma faktörlerine ait bulgular.....	52
4.2.4.1	Enerji soğurma yığılma faktörlerine ait bulgular	52
4.2.4.2	Maruziyet yığılma faktörü sonuçları.....	57
4.2.5	Radyasyon koruma verimliliği	62
4.3	Nötron Zırhlama Parametrelerine Ait Sonuçlar	69
5.	SONUÇ VE TARTIŞMA	76
	KAYNAKLAR	77
	ÖZGEÇMİŞ	80

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Antimon oksit özellikleri	11
Tablo 2.2 Krom oksit özellikleri	11
Tablo 3.1 PLA'nın ayrıntılı özellikleri.....	13
Tablo 3.2 Malzemelerin katkı oranları.....	15
Tablo 4.1 Saf PLA ve Cr ₂ O ₃ 1 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	31
Tablo 4.2 Saf PLA ve Cr ₂ O ₃ 10 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	32
Tablo 4.3 Saf PLA ve Cr ₂ O ₃ 20 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	33
Tablo 4.4 Saf PLA ve Sb ₂ O ₃ 1 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	34
Tablo 4.5 Saf PLA ve Sb ₂ O ₃ 10 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	35
Tablo 4.6 Saf PLA ve Sb ₂ O ₃ 20 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı	36
Tablo 4.7 Saf PLA ve %10 Cr ₂ O ₃ katkılı numunelerinin lineer azaltma katsayısı.....	37
Tablo 4.8 Saf PLA ve %10 Sb ₂ O ₃ katkılı numunelerinin lineer azaltma katsayısı.....	38
Tablo 4.9 Numunelerin deneysel olarak lineer azaltma katsayıları (cm ⁻¹)	39
Tablo 4.10 Saf PLA ve Cr ₂ O ₃ boyalı numunesinin kütle azaltma katsayısı	40
Tablo 4.11 Saf PLA ve Sb ₂ O ₃ boyalı numunesinin kütle azaltma katsayısı.....	41
Tablo 4.12 Saf PLA ve %10 Cr ₂ O ₃ veya Sb ₂ O ₃ katkılı numunelerin kütle azaltma katsayısı	42
Tablo 4.13 Numunelerin deneysel olarak kütle azaltma katsayıları	43
Tablo 4.14 Saf PLA ve Cr Boyalı numunesinin yarı kalınlık değeri (cm).....	45
Tablo 4.15 Saf PLA ve Sb Boyalı numunesinin yarı kalınlık değeri (cm)	46
Tablo 4.16 Saf PLA ve Cr/Sb %10 Katkılı numunelerinin yarı kalınlık değeri (cm)....	47
Tablo 4.17 Numunelerin yarı kalınlık değerlerinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (cm).....	48
Tablo 4.18 Z _{etk} değerine ait teorik sonuçlar	50
Tablo 4.19 Etkin elektron yoğunluğuna ait teorik sonuçlar (x10 ²³) (elektron/g).....	51
Tablo 4.20 Enerji soğurma yığılma faktörü (1-MFP) sonuçları	53
Tablo 4.21 Enerji soğurma yığılma faktörü (5-MFP) sonuçları	54
Tablo 4.22 Enerji soğurma yığılma faktörü (10-MFP) sonuçları	55
Tablo 4.23 Enerji soğurma yığılma faktörü (40-MFP) sonuçları	56
Tablo 4.24 Maruziyet yığılma faktörü (1-MFP) sonuçları.....	58

Tablo 4.25 Maruziyet yığılma faktörü (5-MFP) sonuçları.....	59
Tablo 4.26 Maruziyet yığılma faktörü (10-MFP) sonuçları.....	60
Tablo 4.27 Maruziyet yığılma faktörü (40-MFP) sonuçları.....	61
Tablo 4.28 Numunelerin GEANT4 % olarak radyasyon koruma verimi değerleri	63
Tablo 4.29 Numunelerin EpiXS % olarak radyasyon koruma verimi değerleri	64
Tablo 4.30 Numunelerin WinXCOM % olarak radyasyon koruma verimi değerleri....	65
Tablo 4.31 Numunelerin uzaklaştırma tesir kesiti (cm^{-1}).....	69
Tablo 4.32 Numunelerin etkin uzaklaştırma tesir kesitleri ve 10 mm numune kalınlığında 4,5 MeV enerjili nötronların numunelerden geçen sayıları	70
Tablo 4.33 Termal ve hızlı nötronlar ile numunelerin etkileşimi sonucu ikincil nötron ve gama radyasyonları sayıları ve bunların ortalama enerjileri ve bu enerjilerde numunelerden geçen nötronların oranı	71
Tablo 4.34 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri	72
Tablo 4.35 Farklı enerjilerde 10 mm kalınlıkta nötron transmisyon değeri	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Enerjisi ve türüne göre radyasyonun sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2 Fotoelektrik etki	5
Şekil 2.3 Compton saçılması	6
Şekil 2.4 Çift oluşum	7
Şekil 2.5 Esnek saçılma	7
Şekil 2.6 Esnek olmayan saçılma	8
Şekil 2.7 Işınımli yakalama	8
Şekil 2.8 Radyasyondan korunma yöntemleri	9
Şekil 2.9 Foton azaltma mekanizmaları	9
Şekil 3.1 PLA'nın kimyasal yapısı	12
Şekil 3.2 Saf PLA Numunesi.....	14
Şekil 3.3 Sb ₂ O ₃ dip boyalı numuneler	15
Şekil 3.4 Cr ₂ O ₃ dip boyalı numuneler	15
Şekil 3.5 Antimon ve krom numunelerinin Arşimet hesapları.....	17
Şekil 3.6 Dip Boyama Cihazı	18
Şekil 3.7 NaI (Tl) Dedektörü.....	20
Şekil 3.8 WinXCOM programının arayüz görüntüsü.....	21
Şekil 3.9 EpiXS programının arayüzü	22
Şekil 3.10 GEANT4 programı gama analizinde kullanılan elementler.....	23
Şekil 3.11 GEANT4 terminal (gama) arayüzü	23
Şekil 3.12 GEANT4 gama simülasyon programını başlatmak için parametreler	24
Şekil 3.13 GEANT4 programı nötron analizinde kullanılan elementler	25
Şekil 3.14 GEANT4 terminal (nötron) arayüzü	25
Şekil 3.15 GEANT4 nötron simülasyon programını başlatmak için parametreler.....	26
Şekil 4.1 Cr ₂ O ₃ dip boyalı PLA numunesinin SEM görüntüsü (a-saf PLA, b-1 dip, c-10 dip, d-20 dip Krom Kaplama).....	28
Şekil 4.2 Sb ₂ O ₃ dip boyalı PLA numunesinin SEM görüntüsü (a-saf PLA, b-1 dip, c-10 dip, d-20 dip Antimon Kaplama).....	28
Şekil 4.3 %10 Sb ₂ O ₃ katkılı ve %10 Cr ₂ O ₃ katkılı PLA numunelerinin SEM görüntüsü (a-saf PLA, b-%10 Cr ₂ O ₃ katkılı kompozit, c-%10 Sb ₂ O ₃ katkılı kompozit) .	29

Şekil 4.4 Saf PLA, %10 Sb ₂ O ₃ katkılı, %10 Cr ₂ O ₃ katkılı numunelerin kütle azaltma katsayısı grafikleri.....	44
Şekil 4.5 Saf PLA, %10 Sb ₂ O ₃ katkılı ve %10 Cr ₂ O ₃ katkılı numunelerinin yarı kalınlık değeri grafiği.....	49
Şekil 4.6 Z _{etk} değerine ait grafik	51
Şekil 4.7 Etkin elektron yoğunluğu sonucuna ait grafik	52
Şekil 4.8 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (enerji soğurma) karşılaştırmaları grafiği.....	57
Şekil 4.9 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik birikim faktörü (maruziyet) karşılaştırmaları grafiği	62
Şekil 4.10 Sb ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin radyasyon koruma verimi grafiği. 66	
Şekil 4.11 Cr ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin radyasyon koruma verimi grafiği . 67	
Şekil 4.12 Saf PLA, %10 Sb ₂ O ₃ katkılı ve %10 Cr ₂ O ₃ katkılı numunelerinin radyasyon koruma verimi grafiği	67
Şekil 4.13 Sb ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) ve Cr ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin dip karşılaştırılması grafiği	68
Şekil 4.14 Sb ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) ve Cr ₂ O ₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin farklı kalınlıklarda karşılaştırılması grafiği	68
Şekil 4.15 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki numunelerden geçen nötron transmisyon değerleri.....	74
Şekil 4.16 Farklı enerjilerde 10 mm kalınlıktaki numunelerden geçen nötron sayısı	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Cr	: Krom
Cr₂O₃	: Krom oksit
Sb	: Antimon
Sb₂O₃	: Antimon oksit
NaI	: Sodyum İyodür
LAC, μ	: Lineer azaltma katsayısı
MAC, μ/ρ	: Kütle azaltma 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
YKD	: Yarı kalınlık değeri
Z_{etk}	: Etkin atom numarası
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
eV	: Elektron volt
MeV	: Mega elektron volt
ρ	: Yoğunluk

1. GİRİŞ

Radyasyon, modern yaşamın ayrılmaz bir bileşeni haline gelmiştir. Hem doğal hem de yapay kaynaklardan elde edilen radyasyon, çağdaş toplumun sağlık, enerji ve bilimsel ihtiyaçlarını karşılamak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tıpta, radyasyon, tanısal görüntüleme yöntemlerinden kanser tedavisine kadar pek çok uygulamada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle kanser tedavisinde, yüksek enerjili radyasyon, kanserli hücrelerin DNA'sını hedef alarak büyümelerini engeller ve böylece hayat kurtarabilmektedir. Enerji üretiminde ise radyasyon, nükleer santrallerdeki termonükleer reaksiyonları tetikleyerek verimli ve düşük karbon salınlı bir enerji kaynağı sağlayabilmektedir. Faydalarının yanı sıra literatürde de iyi bilinen radyasyonun zararlı etkileri de bulunmaktadır. Radyasyonu faydalı bir şekilde kullanırken istenmeyen radyasyona maruz kalma riskini ortadan kaldırabilmek için korunma ve zırhlama önlemleri bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır.

Radyasyondan korunmanın başlıca yöntemleri, süre, mesafe ve zırhlamadır. Süre ve mesafe her zaman kontrol edilebilir parametreler olmayabilir. Bazı özel durumlarda (örneğin ameliyat sırasında) belirlenen sürenin dışına çıkılmak zorunda kalınabilir. Bir başka durumda da radyasyon kaynağı ile mesafenin uzak olmaması gereksinimi bulanabilmektedir. Zırhlama diğer iki yönteme göre daha kontrol edilebilir seçenektir. Tanımsal olarak zırhlama, radyasyonun geçişini engelleyen koruyucu malzemelerin kullanılmasını kapsamaktadır. Bu malzemelerin seçimi, genellikle korunmak istenen radyasyon türüne göre yapılmalıdır. Ayrıca, radyasyondan korunma, radyasyonun varlığını tespit etmek ve ölçmek için uygun izleme cihazlarının kullanılmasını da içermektedir. Bu önlemler, bireyleri ve toplumu radyasyonun olumsuz etkilerinden koruma konusunda önemli bir rol üstlenmektedir.

Zırhlama uygulaması genellikle kalıcı koruma gereksinimlerini içerir; zaman ve mesafe geçici bir koruma sağlarken, zırhlama daha kalıcı bir koruma sunabilmektedir. Örneğin, radyasyon kaynağı üzerinde doğrudan kontrolün sağlanamadığı veya sürekli maruz kalma riskinin bulunduğu durumlarda, zırhlama etkili bir koruma yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, bazı tıbbi ya da endüstriyel uygulamalarda, radyasyon kaynakları sürekli kullanıldığından, bu tür ortamlarda zırhlama çok önemli bir güvenlik önlemi haline gelmektedir. Yüksek enerjili radyasyonlar, özellikle gama ışınları ve nötron parçacıkları, derinin ve dokuların derinliklerine nüfuz edebileceği için, bu tür

radyasyonlardan korunmanın en etkili yolu genellikle güçlü bir zırhlama malzemesi kullanmaktır.

(Zailan vd., 2024) Fe_3O_4 nano parçacıklarını termoplastik materyaller içerisine katkılayarak elde edilen kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama kabiliyetlerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre termoplastik malzemelere seçilen katkı maddesinin eklemenin gama radyasyonu zırhlama açısından iyileştirmede bulunduğu ifade edilmiştir. Başka bir çalışmada (Bagheri vd., 2024) termoplastik polimerler içerisine Bi_2O_3 nano tozunu katkılarını ve ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{154}Eu , ^{133}Ba , and ^{22}Na kaynakları ile gama radyasyonu ve Am–Be kaynağı ile nötron açısından üretilen numunelerin deneysel olarak zırhlama performanslarını belirlemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin esnek olduğu ve eldiven gibi radyasyon zırhlama alanında kullanılan materyallerde kullanılabileceği belirtilmiştir. (Ogul vd., 2024) 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan ABS polimerini Gd_2O_3 nano tozu ile radyasyon zırhlama açısında güçlendirdiklerini ifade etmişler ve elde edilen sonuçların nükleer teknoloji uygulamaları ve 3D üretim prosesleri için gelecek vadettiğini aktarmışlardır. (Mansy vd., 2024) MgCo_2O_4 ve Al_2CoO_4 bileşiklerini LDPE/PVC polimer malzemeleri içerisine katkılarını ve deneysel, simülasyon ve teorik yöntemler kullanılarak üretilen numunelerin gama radyasyonu zırhlama açısından değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelerin yapı analizleri SEM/EDX cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalara göre MgCo_2O_4 katkılı polimer numunelerinin Al_2CoO_4 katkılı numunelere göre gama radyasyonu zırhlama açısından daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Başka bir çalışmada, (Elsafi vd., 2024) polyester reçine içerisine nano ve mikron boyutta ZnO parçacıklarını ekleyerek özgün radyasyon zırhlama malzemeleri geliştirmişlerdir. Üretilen numuneler için gama radyasyonu koruma verimliliği sonuçlarını elde etmişler ve malzemelerin yapı analizi için SEM ve TEM görüntüleme tekniklerinden faydalanmışlardır. ZnO katkı miktarı arttıkça numunelerin gama radyasyonu koruma verimlilik değerlerinin de arttığı raporlanmıştır. (Kruthika vd., 2024) aloe vera bitkisinin jelini elde ederek içerisine $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nano kompozitlerini ekleyerek üretilen biyo malzemelerin gama radyasyonu zırhlama açısından etkinliklerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Yazarlar elde edilen yeni zırh malzemesinin çevre dostu olduğunu ve ticari olarak kullanılan radyasyon zırhlama malzemelerine alternatif bir malzeme olmak için gelecek vadettiğini ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada, (Darwesh vd., 2024) Sb_2O_3 ve Al_2O_3 nano parçacıklarını epoksi reçine içerisine katkılayarak NaI (Tl) detektörü ile 0,059 ve 0,662 MeV enerjilerinde gama radyasyonu zırhlama

kabiliyetlerini araştırmışlardır. Elde edilen bulgulara göre önerilen özgün materyallerin özellikle medikal alanda uygulama yeri bulabileceğini belirtmişlerdir.

Sunulan tez çalışması kapsamında hali hazırda literatürde mevcut olan zırhlama materyallerine alternatif bir zırhlama malzemesi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, antimon oksit (Sb_2O_3) ve krom oksit (Cr_2O_3) esaslı seramik toz boyaların kullanıldığı PLA tabanlı kompozitlerin gama ve nötron zırhlama özellikleri, farklı malzeme kalınlıkları ve radyasyon enerjileri kullanılarak deneysel, teorik ve simülasyon yöntemleriyle incelenmesi hedeflenmiştir. Literatür detaylı bir şekilde araştırıldığında Sb_2O_3 ve Cr_2O_3 içeren seramik boyaların katkı maddesi olarak polilaktik asit (PLA) polimeri içerisine katkısı ve radyasyon zırhlama üzerine etkisinin konu edilmediği belirlenmiştir. Bundan dolayı tez çalışmasında üretilen numunelerin zgn PLA kompozitleri olduğunun altı burada çizilmelidir. PLA polimerleri oluşturulurken iki farklı yöntem seçilmiştir: direkt polimer kompozit içine katkı ve polimer malzeme yüzeyine kaplama. Her iki tipte üretilen numuneler için gama radyasyonu ve nötron zırhlama kabiliyetleri tez çalışması kapsamında değerlendirilmiştir.

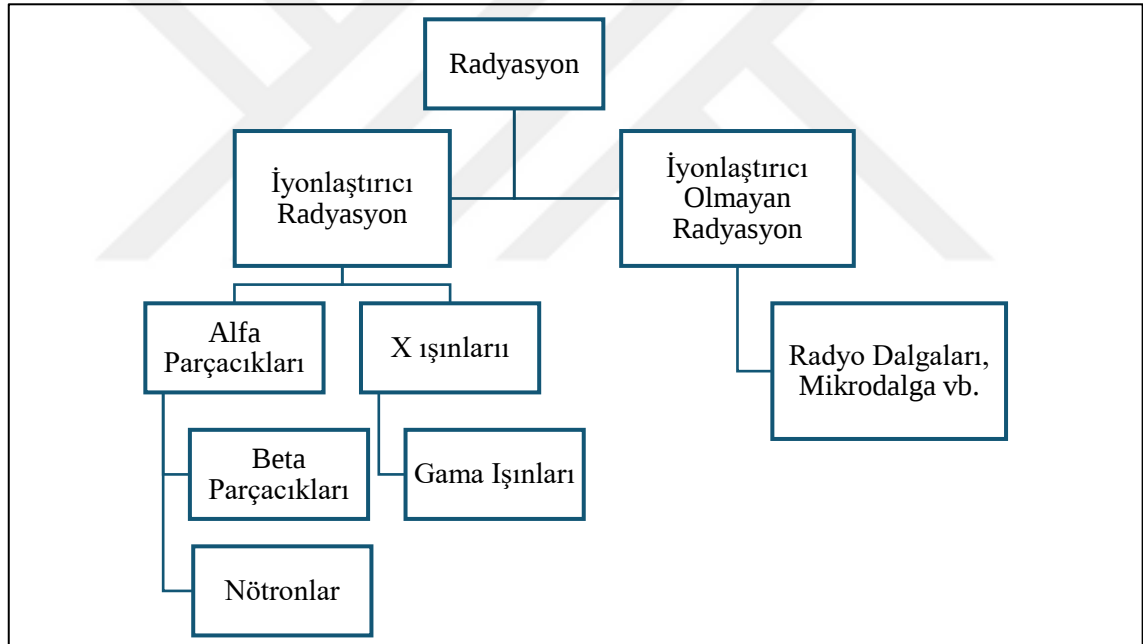


2. GENEL BİLGİLER

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

Radyasyon, dalga veya parçacık şeklinde bir ortam aracılığıyla ya da boşlukta enerji iletimi gerçekleştiren bir fenomendir (Knoll, 2010). Kaynağına bağlı olarak doğal ya da yapay, enerjisine göre iyonlaştırıcı ya da iyonlaştırıcı olmayan, ayrıca tipine göre parçacık veya dalga biçiminde sınıflandırılabilir; bu sınıflandırma Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Belgin, 2017).



Şekil 2.1 Enerjisi ve türüne göre radyasyonun sınıflandırılması (Belgin, 2017)

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

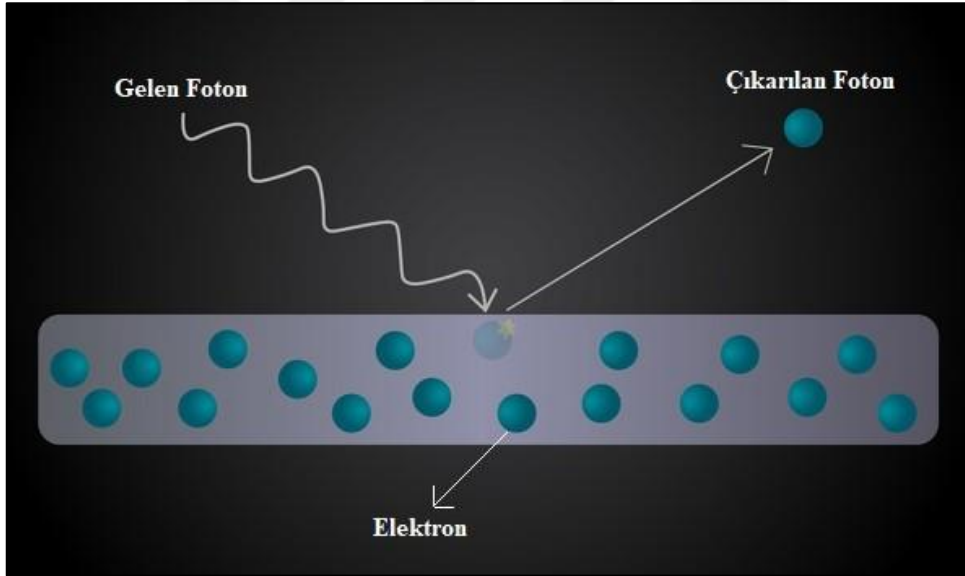
2.1.1 Gama radyasyonunun madde ile etkileşimi

Gama (γ) radyasyonu radyoaktif bir elementin yaydığı yüksek enerjili, ışık hızı ile yayılan ve yüksüz elektromanyetik ışınlar olarak tanımlanmaktadır. Gama ışınları, maddeyle

farklı yollarla etkileşimde bulunabilmektedir. Ancak, nükleer mühendislik uygulamalarında genellikle üç ana etkileşim süreci göz önünde bulundurulmalıdır: fotoelektrik etki, çift oluşumu ve Compton saçılması (Lamarsh & Baratta, 2001). Gama radyasyonu yüksüz ve kütlesi olmasından dolayı, maddeye yüksek geçiş özelliği bulunmaktadır ve bundan dolayı yalnızca zırhlama teknikleri ile engellenebilmektedir (Tufekci, 2017).

2.1.1.1 Fotoelektrik etki

Fotoelektrik etkide, gelen gama ışını tüm atomun elektronları ile etkileştiğinde, gama ışını yok olabilir ve atomik elektronlardan biri atomdan fırlatılır. Bu süreçte atom geri teper, ancak taşıdığı kinetik enerji çok küçüktür. Fırlatılan fotoelektronun kinetik enerjisi foton enerjisi ile elektronun atoma bağlanma enerjisinin farkı kadardır; bu bağlanma enerjisi söz konusu elektrona karşılık gelen atomun iyonizasyon enerjisidir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.2 de fotoelektrik olay görselleştirilmiştir.

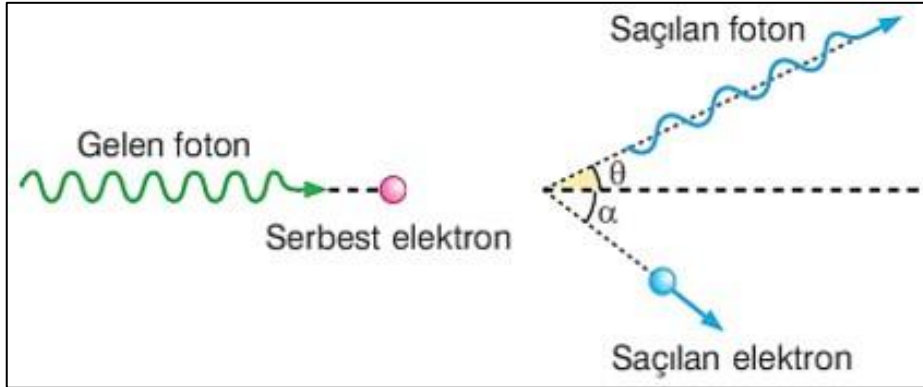


Şekil 2.2 Fotoelektrik etki

2.1.1.2 Compton saçılması

Compton saçılması hem enerji hem de momentum korunacak şekilde, bir fotonun bir elektron tarafından esnek saçılmasıdır. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, enerjisi E ve dalga boyu λ olan gelen foton, θ açısıyla saçılır ve çarpılan elektron geri teper. Geri tepen elektron bir miktar kinetik enerji kazandığından, saçılan fotonun (E') enerjisi (E)'den küçüktür ve bir fotonun dalga boyu enerjisi ile ters orantılı olduğundan, saçılan fotonun

(λ') dalga boyu (λ)'dan büyüktür. Enerjinin ve momentumun korunumu eşitliklerini oluşturmak suretiyle, aşağıdaki bağlantı türetilebilir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.3'te Compton saçılması görselleştirilmiştir.



Şekil 2.3 Compton saçılması

$$E' = \frac{EE_e}{E(1 - \cos\theta) + E_e} \quad (2.1)$$

Burada $E_e = mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$ elektronun durgun kütle enerjisidir. Aşağıdaki formül eşitlik 2.1'e eşdeğerdir.

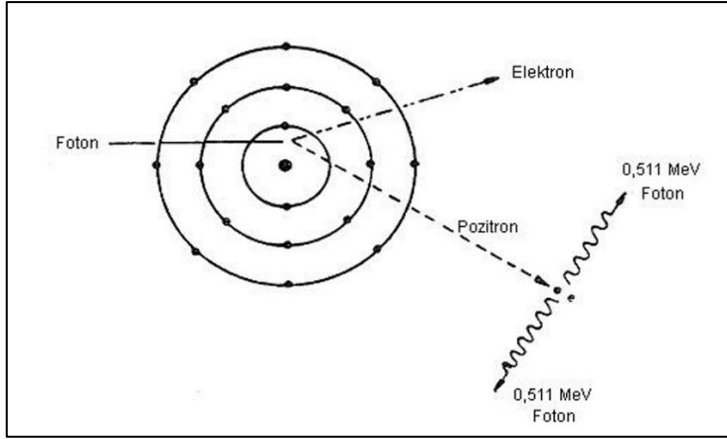
$$\lambda - \lambda' = \lambda_c (1 - \cos\theta) \quad (2.2)$$

Burada λ_c Compton dalga boyu olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,426 \times 10^{-10} \text{ cm} \quad (2.3)$$

2.1.1.3 Çift oluşum

Bu süreçte foton yok olur ve bir elektron çifti (bir pozitron ve bir negatron) yaratılmaktadır. 2 elektronun toplam durgun kütle enerjisi $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ olduğundan, foton en az bu kadar enerjiye sahip olmadıkça çift oluşumu meydana gelmemektedir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.4'te çift oluşumu görselleştirilmiştir.

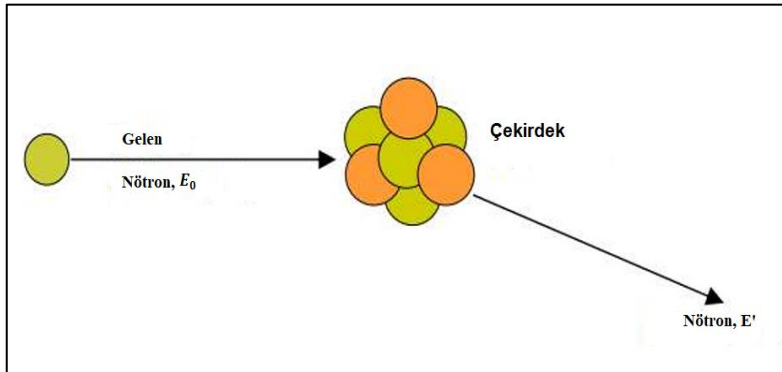


Şekil 2.4 Çift oluşum (Belgin, 2017)

2.1.2 Nötronun madde ile etkileşimi

2.1.2.1 Esnek saçılma

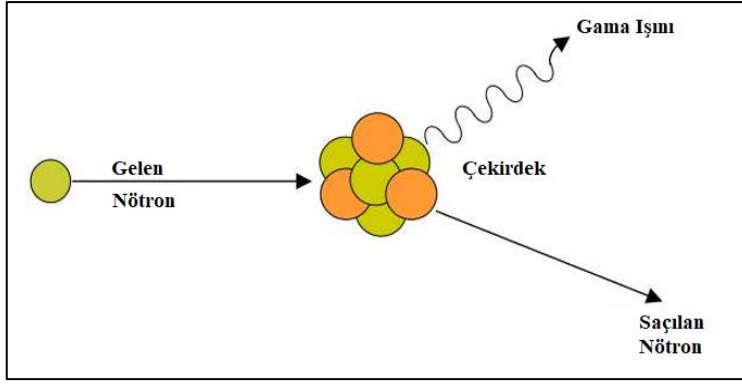
Nötron, hemen hemen her zaman taban düzeyinde bulunan çekirdeğe çarpar, nötron yeniden ortaya çıkar ve çekirdek taban düzeyinde kalmaya devam edebilmektedir. Bu durumda nötronun çekirdek tarafından esnek saçılmaya uğratıldığı söylenir ve bu etkileşim (n, n) sembolüyle ifade edilir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.5'te esnek saçılma görselleştirilmiştir.



Şekil 2.5 Esnek saçılma

2.1.2.2 Esnek olmayan saçılma

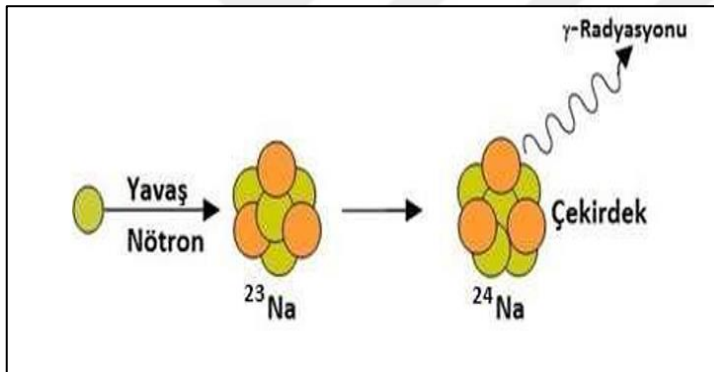
Bu reaksiyon, çekirdeğin uyarılmış bir düzeyde bırakılması dışında esnek saçılmaya benzerdir ve (n, n') sembolüyle ifade edilmektedir. Uyarılan çekirdek, gama ışınları yayımlayarak bozunabilmektedir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.6'da esnek olmayan saçılma görselleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Esnek olmayan saçılma

2.1.2.3 Işınımlı yakalama

Nötron çekirdek tarafından yakalanır ve bir veya daha fazla gama ışını yayımlanmaktadır. (n, γ) olarak gösterilmektedir. Orijinal nötron soğurulduğundan, bu tepkime, soğurma tepkileri diye bilinen etkileşim sınıfının bir örneğidir (Lamarsh & Baratta, 2001). Şekil 2.7 de ışınlı yakalama şeması bulunmaktadır.



Şekil 2.7 Işınımlı yakalama

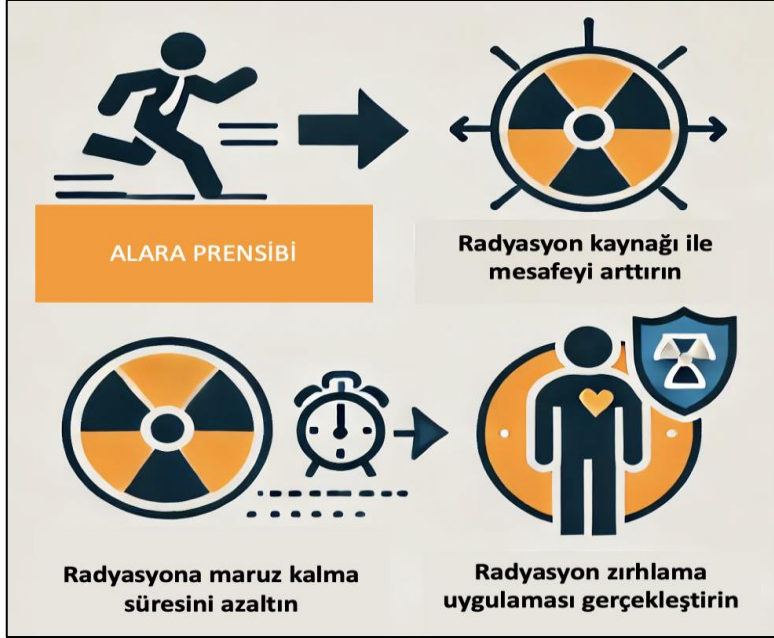
2.1.2.4 Fisyon

Belirli çekirdeklerle çarpışan nötronlar, çekirdeğin parçalanmasına yol açmaktadır. Bu parçalanma sonucu kararsız çekirdekler ve nötron ışınları meydana gelir; bu tür reaksiyonlar fisyon tepkimeleri olarak adlandırılmaktadır.

2.2 Radyasyondan Korunma Yöntemleri

Radyasyonun geniş kullanım alanlarına rağmen, potansiyel tehlikelerinden korunmak amacıyla radyasyondan korunmanın temelini oluşturan ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibi geliştirilmiştir. Bu prensibe göre, radyasyona maruz kalma,

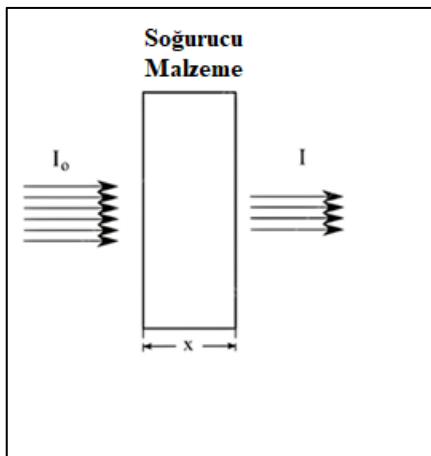
mümkün olan en düşük seviyeye indirilmelidir. Radyasyon maruziyetini azaltmak için, maruz kalma süresi kısa tutulmalı, radyasyon kaynağından mesafe artırılmalı ve kaynak uygun malzemelerle zırhlanmalıdır (Sürücü, 2021). Şekil 2.8’de radyasyondan korunma yöntemleri özetlenmiştir.



Şekil 2.8 Radyasyondan korunma yöntemleri

2.2.1 Gama ışınlarının azaltılması

Gama ışınları madde ile etkileşime girdiğinde, farklı sonuçlar meydana gelebilir: soğurma, saçılma veya etkileşim olmama. Şekil 2.9’da x kalınlığındaki bir malzeme üzerine gelen gama radyasyonu etkileşimi sunulmuştur.



Şekil 2.9 Foton azaltma mekanizmaları

Gama radyasyonu söz konusu olduğunda, radyasyon tipinin, madde ile olan etki dinamikleri, Lambert-Beer yasası ile anlaşılır. Radyasyon, bir malzemeden geçerken, şiddetinde bir azalma meydana gelir. Bu yüzden, Lambert-Beer matematiksel ifadesi denklem 2.4'te de gösterildiği gibi, radyasyon bir malzemeden geçerken radyasyonun malzemenin özelliklerine ve içinden geçtiği kalınlığa bağlı olarak şiddetinde bir azalma vardır (Agar vd., 2019).

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.4)$$

Bu denklemde, I_0 zırlama malzemesine gelen foton şiddetini, $I(x)$, x kalınlığındaki zırlama malzemesinden geçen foton şiddetini, μ ise lineer azaltma katsayısını temsil eder. Üstel bağlantı, fotonların soğurucu malzeme tarafından tamamen soğrulamayacağını ancak şiddetlerinin oldukça düşük değerlere indirilebileceğini ifade eder. Lineer azaltma katsayısının (μ) birimi cm^{-1} , kütle azaltma katsayısının (μ_m) birimi ise cm^2/g 'dir (Sürücü, 2021).

Fotonların soğrulmasında kullanılan diğer yararlı tanımlar ise yarı kalınlık değeri (HVL) dır. Yarı kalınlık değeri, gelen foton şiddetini yarıya indirmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Onda bir değer kalınlığı ise gelen foton şiddetini onda birine indirmek için gereken malzeme kalınlığıdır. Beer-Lambert denklemine göre yarı kalınlık değeri şu şekilde ifade edilir;

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}} \quad (2.5)$$

Buradan HVL değeri çözülerek;

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.6)$$

Denklemini elde edilir.

Seçilen malzemenin radyasyon koruma verimliliği (RKV) şu formülle hesaplanır;

$$RKV = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) 100 \quad (2.7)$$

2.2.2 Radyasyon zırlamada kullanılan malzemeler

Radyasyon zırlama malzemeleri, radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için tasarlanmış ve radyasyonu emip ya da yayarak etkisini azaltmaya yönelik seçilen özel materyallerdir. Aşağıda, bu tez kapsamında kullanılan malzemeler sıralanmıştır.

2.2.2.1 Antimon oksit

Antimon trioksit (Sb_2O_3) sulu çözeltilerde hidroliz ile çözünebilen inorganik bir bileşiktir. Beyazımsı toz ve kristal yapıya sahiptir. Katalizör olarak PET üretiminde kullanılabilir. Camlarda köpürmeyi önlediği bilinmektedir. Alev geciktirici olduğu için birçok sektör kullanmayı tercih edebilmektedir. Tablo 2.1’de antimon oksit özellikleri sunulmuştur.

Tablo 2.1 Antimon oksit özellikleri

Kimyasal Formül	Sb_2O_3
Molar Kütle	291,518 g/mol
Görünüm	Beyaz, katı
Yoğunluk	5,2 g/cm ³
Erime Noktası	656 °C
Kaynama Noktası	1425 °C

2.2.2.2 Krom oksit

Krom oksit, Cr_2O_3 formülüne sahip inorganik bir bileşiktir. Kromun başlıca oksitlerinden biridir ve pigment olarak kullanılmaktadır. Doğada, nadir mineral eskolait olarak bulunur. Ağırlıklı olarak flaş eriticilerde, dönüştürme fırınlarında, cüruf temizleme fırınlarında ve ergitme fırınlarında kullanılmaktadır. Tablo 2.2 de temel özellikleri belirtilmiştir.

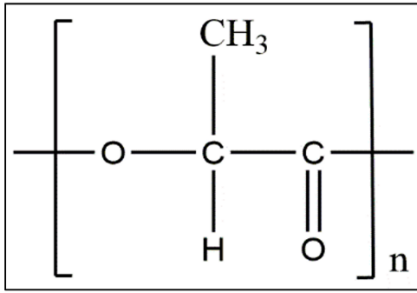
Tablo 2.2 Krom oksit özellikleri

Kimyasal Formül	Cr_2O_3
Molar Kütle	151,9904 g/mol
Görünüm	Açıktan koyu yeşile, ince kristal
Yoğunluk	5,22 g/cm ³
Erime Noktası	2435 °C
Kaynama Noktası	4000 °C

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 PLA'nın Genel Özellikleri

PLA, alifatik bir termoplastik polimer olup, α -hidroksi asitlerden türetilmiştir ve kimyasal formülü $(C_3H_4O_2)_n$ olarak ifade edilmektedir. Bu polimerin en belirgin özelliği, biyobozunur ve yenilenebilir kaynaklar olan mısır, nişasta, buğday ve şeker kamışı gibi bitkilerden elde edilebilmesidir. Ayrıca, işlenmesi kolay, enerji verimli ve yüksek mukavemete sahip olmasıyla dikkat çekmektedir (Shibata, 2008). Şekil 3.1'de PLA'nın kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 PLA'nın kimyasal yapısı

PLA'nın parlak görünümü ve sağlığa zarar vermemesi sayesinde birçok sektörde yaygın olarak tercih edilmesinin yanı sıra yapısal özellikleriyle de dikkat çekmektedir. Örneğin çocuk oyuncaklarından mutfak gereçlerine kadar pek çok üretimde tercih edilen PLA; ambalaj malzemelerinden tarım üretimlerine ve saklama kaplarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Çömez, 2019).

Biyouyumluluğu sayesinde PLA kozmetik ürünleri, paketleme sektörü, dermatoloji ve doku mühendisliği, plastik uygulamalar, cerrahi dikişler, tek kullanımlık ürünler ve kontrollü ilaç salınım sistemlerinde de geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanı sıra, otomotiv endüstrisinde zemin kaplayıcı malzemeler gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Shibata, 2008).

PLA, camsı geçiş sıcaklığı 55-56 °C ve erime noktası ise 157-170 °C olan bir polimerdir. 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, PLA'nın zincir yapısında kırılmalar ve bağlarındaki çözülmeler sonucu moleküler ağırlık kaybı gibi değişiklikler meydana gelebilmektedir. Ayrıca, PLA polimerlerini çözmek için benzen, kloroform gibi çözücüler kullanılmaktadır (Shibata, 2008). PLA polimerinin genel özellikleri Tablo 3.1'de daha detaylı görülmektedir (Zehir vd., 2023).

Tablo 3.1 PLA'nın ayrıntılı özellikleri

Teknik isim ve kimyasal formülü	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'nın Radyasyon Zırhlama Uygulaması

Radyasyona maruz kalma risklerinden korunmak ve olumsuz etkileri önlemek için radyasyona dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Cam, alaşım, beton, kil ve polimerler gibi birçok çeşit zırhlama malzemesi bulunmaktadır. Ancak her bir malzemeye kesin bir üstünlük atfetmek ya da en iyisini seçmek doğru değildir çünkü her birinin farklı uygulama alanları mevcuttur ve genellikle birbirlerini tamamlayıcı özellikler göstermektedirler.

Radyasyon koruma malzemelerinin üretiminde polimerlerin tercih edilmesinin ana avantajları arasında esneklikleri ve dayanıklılıkları sayılabilir. Ayrıca hafif olmaları ve düşük maliyetli olmaları da önemli bir etken olarak gösterilmektedir. Bu özellikler nedenleriyle birçok araştırmacının polimerleri tercih etmesine yol açmıştır. Son yıllarda ise çeşitli katma maddelerle güçlenen polimerlerin kullanımıyla daha etkin radyasyon koruma malzemelerinin geliştirilmesine olanak sağlayacak umut verici adımlar atılmaktadır (Mann vd., 2015). Bu çalışma kapsamında ise Cr₂O₃ ve Sb₂O₃ bileşenleri içeren seramik boya tozları farklı oranlarda PLA polimeri içerisine eklenecek veya polimer malzemenin dış yüzeyi bu boyalar ile kaplanmıştır. Elde edilen kompozitlerin radyasyon zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır.

3.3 Deneyisel Çalışma

Bu tez çalışmasında, Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 boya tozları ile takviye edilmiş polimer malzemeler, gama radyasyonunun zırhlama etkinliklerini derinlemesine incelemeye olanak sağlayacak deneysel testlere tabi tutulmuştur. Üretilen polimer kompozitlerin yoğunlukları, Arşimet yöntemiyle belirlenmiş ve radyasyon testleri, NaI (Tl) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Numunelerin hazırlanması

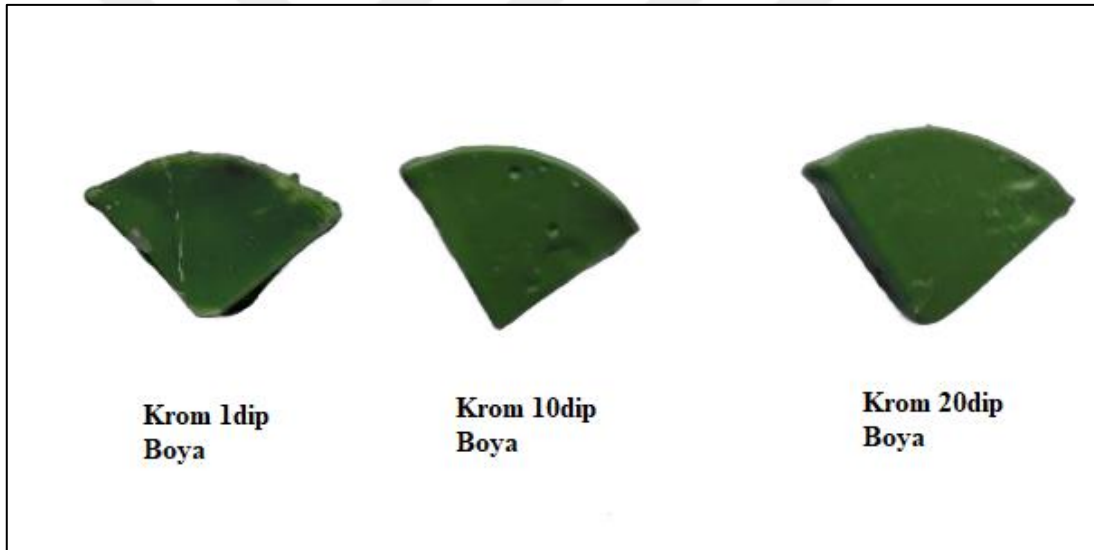
Bu tez çalışmasında, PLA granülü kullanılarak toplamda 9 farklı numune üretilmiştir. İlk aşamada, saf PLA granülü diklorometan yardımı ile beherin içerisinde yaklaşık 100-110 °C'de ısıtılarak çözündürüldükten sonra beherin ağzı parafin ile kapatılıp 1 gün beklemeye alınmıştır ve böylelikle saf PLA numunesi elde edilmiştir. Ardından, PLA granülüne sırasıyla Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 bileşenleri kütlece %10 oranında PLA polimeri içine eklenip ısıtılarak kalıplara dökülmüştür. Sonrasında, 6 adet saf PLA granülü, hazırlanan Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 tozlarına sırasıyla 1, 10 ve 20 dalma yöntemiyle boyanmıştır. Bu şekilde, 3 numune Cr_2O_3 katkılı boya ve 3 numune Sb_2O_3 katkılı boya PLA malzemeleri elde edilmiştir.



Şekil 3.2 Saf PLA Numunesi



Şekil 3.3 Sb_2O_3 dip boyalı numuneler



Şekil 3.4 Cr_2O_3 dip boyalı numuneler

Tablo 3.2 de bu tez çalışması kapsamında belirlenen numunelerin isimlendirmeleri ve kütlece yüzdeleri bulunmaktadır. Saf PLA numunesi de dahil olmak üzere toplam dokuz test numunesi üretilmiştir.

Tablo 3.2 Malzemelerin katkı oranları

Numune	Kütlece Polimer Yüzdesi (%)	Toz Boya Kütlece Katkı Yüzdesi (%)	
		Cr_2O_3	Sb_2O_3
Saf PLA	100	-	-

Tablo 3.2'nin devamı

%10 Sb ₂ O ₃ Katkılı	90	10	-
%10 Cr ₂ O ₃ Katkılı	90	-	10
Cr ₂ O ₃ 1 Dip Boya	96,4307	3,5693	-
Cr ₂ O ₃ 10 Dip Boya	90,6256	9,3744	-
Cr ₂ O ₃ 20 Dip Boya	87,5839	12,4160	-
Sb ₂ O ₃ 1 Dip Boya	86,4275	-	13,5725
Sb ₂ O ₃ 10 Dip Boya	81,5910	-	18,4090
Sb ₂ O ₃ 20 Dip Boya	79,2292	-	20,7708

Tablo 3.3'te ise üretilen numunelerin içerdiği elementlerin kütlece yüzdeleri sunulmaktadır.

Tablo 3.3 Katkılı numunelerin içerdiği elementlerin yüzdeleri

Numune	C	H	O	Cr	Sb
Saf PLA	50,0110	5,5948	44,4041	0	0
%10 Cr ₂ O ₃ Katkılı	45,4561	5,0861	43,2378	6,2201	0
%10 Sb ₂ O ₃ Katkılı	45,4561	5,0861	41,8637	0	7,5941

Üretilen numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan düzenek Şekil 3.5'te sunulmaktadır. Bu ölçümler sırasında saf su dalma sıvısı olarak kullanılmış ve yoğunluğu hesaplamalarda 1 g/cm³ olarak kullanılmıştır. Ölçümler deniz seviyesinde ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Şekilde sunulan düzenekten elde edilen veriler eşitlik 3.1'de yerine yazılmış ve her bir numunenin yoğunluğu 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.



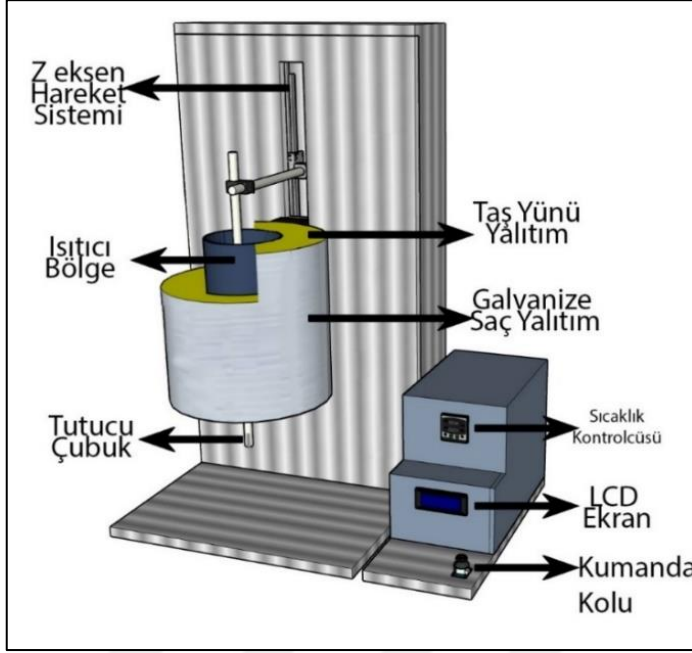
Şekil 3.5 Antimon ve krom numunelerinin Arşimet hesapları

Tablo 3.4 Arşimet tekniği kullanılarak ölçülen yoğunluk sonuçları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
Saf PLA	1,2201
%10 Sb ₂ O ₃ Katkılı	1,4185
%10 Cr ₂ O ₃ Katkılı	1,2788
Cr ₂ O ₃ 1 Dip Boya	1,1319
Cr ₂ O ₃ 10 Dip Boya	1,1189
Cr ₂ O ₃ 20 Dip Boya	1,1586
Sb ₂ O ₃ 1 Dip Boya	1,3026
Sb ₂ O ₃ 10 Dip Boya	1,3064
Sb ₂ O ₃ 20 Dip Boya	1,3374

3.3.2 Dip (Dalma) yöntemi ile numunelerin boyanması

Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan cihaz yardımıyla PLA numunelerinin Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 ile dip boyaması sırasıyla 1-10-20 dip için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da cihazın şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.6 Dip Boyama Cihazı

Dip boyama işlemi için ölçüler Tablo 3.5 de sunulmuştur.

Tablo 3.5 Dip (Dalma) Ölçüleri

Vernik	25 ml ~ 30 g
Antimon/Krom	15 g
Tiner	0,9 ml ~ 0,8 g
Isıtıcı Bölge sıcaklığı	90 °C
Fırında durma süresi	60 s
Soğutma	30 s
Bekleme (Dalma)	4 s

İlk önce verilen ölçülerde malzemeler kullanılarak boya hazırlanmıştır. Daha sonra PLA numunesi dip (dalma) boyama cihazında tutucu çubuğa yerleştirilmiş ve tutucu çubuğun aşağıya ineceği yere hazırlanan boya koyularak, cihazda gerekli parametreler girilmiştir. Daha sonra tutucu çubuk aşağıya doğru hareket ederek, boyanın bulunduğu beherin içine girmiş ve PLA numunesi dalma yöntemi ile boyanmıştır. PLA numunesi boyanın bulunduğu beherin içinde 4 saniye durduktan sonra yukarı doğru ısıtıcı bölgenin içine hareket ettirilmiş ve fırında 60 saniye kurutulmuştur. Daha sonra tekrar aşağıya doğru hareket ederek 30 saniye soğumaya bırakıldı ve böylece 1 dip boya katkılı PLA numunesi hazırlanmıştır. 10 dip boya katkılı PLA numunesi için aynı işlemler 10 kez tekrar edilirken 20 dip boya katkılı PLA numunesi için aynı işlemler 20 kez tekrarlanmıştır.

3.3.3 SEM analiz süreci

Üretilen numunelerin yapısal özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tekniği kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analizler, Artvin Çoruh Üniversitesi'nde yer alan Bilim-Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir.

SEM görüntülemesi öncesinde, her bir numune altın-paladyum alaşımı ile püskürtme yöntemiyle kaplanmış ve bu işlem, numunelerin elektriksel iletkenliğini sağlamak amacıyla kontrollü vakum ortamında yapılmıştır. Bu kaplama işlemi, yüksek kaliteli SEM görüntülemesi için gerekli olan bir ön koşul olmuştur. Ardından, SEM görüntüleri 10-200 mikrometre (μm) arası büyütme seviyelerinde alınarak analiz edilmiştir. Bu detay seviyesi, numunelerin yüzey morfolojisi hakkında derinlemesine bilgi edinilmesine olanak sağlamaktadır.

3.3.4 Gama radyasyonu zırlama için deneysel süreç

Üretilen kompozitlerin deneysel olarak gama radyasyonu zırlama performansları NaI (Tl) detektörü ve çeşitli (^{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)) radyasyon kaynakları kullanılarak belirlenmiştir. Bu kaynakların aktiviteleri sırasıyla 0,99 μCi (Am-241), 0,832 μCi (Ba-133), 0,505 μCi (Na-22), 0,2355 μCi (Cs-137) ve 0,716 μCi (Co-60) olarak verilmiştir. Radyasyon şiddeti değerlerinin tespit edilebilmesi için dedektör, numunenin varlığı ve yokluğunda toplam 86 400 saniye süreyle sayımlar yapmıştır.

Elde edilen spektrumlar, MAESTRO yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve böylece üretilen kompozit malzemeler için gama radyasyonu zırhlama parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 3.7 NaI (Tl) Dedektörü

3.4 Simülasyon Çalışmaları

Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 tozları katkılanmış PLA polimer kompozit malzemelerin gama ve nötron radyasyonlarına karşı zırhlama yeteneklerini incelemek amacıyla simülasyon ve teorik hesaplama tekniklerinden de yararlanılmıştır. Deneysel veriler ile simülasyon sonuçları arasındaki uyum, kullanılan metotların güvenilirliğini göstermektedir.

3.4.1 Gama radyasyonu zırhlama analizi

Deneysel sistemde kullanılan gama radyasyonu enerjileri birebir aynı şekilde teorik (XCOM, EpiXS) ve simülasyon (GEANT4) yöntemlerinde de kullanılarak malzemeler incelenmiştir.

3.4.1.1 WinXCOM analizi

WinXCOM programı, karmaşık hesaplamaları kolaylaştırmak için geliştirilmiş bir arayüze sahiptir ve bu arayüz, kullanıcı dostu bir deneyim sunarak veri girişinin verimli bir şekilde yapılmasına ve sonuçların görselleştirilmesine imkân tanır.

Bir madde tanımlandıktan sonra bileşikleri veya karışımların foton etkileşme parametrelerinin belirlenmesi için kullanılır (Gerward vd., 2004). WinXCOM'un arayüzünü gösteren ekran görüntüsü, Şekil 3.8'de yer almaktadır.

XCOM NIST National Institute of Standards and Technology Physical Sciences Laboratory

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)

XCOM

Fill out the form to select the data to be displayed:

[Help](#)

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.

C	50.0130
H	5.5948
O	44.4041

Optional output title:

Graph options:

☒ Total Attenuation with Coherent Scattering
☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
☐ Coherent Scattering
☐ Incoherent Scattering
☐ Photoelectric Absorption
☐ Pair Production in Nuclear Field
☐ Pair Production in Electron Field
☐ None

Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)

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.

0.358
0.3839
0.511
0.6617
1.1732
4.0346

☐ Include the standard grid

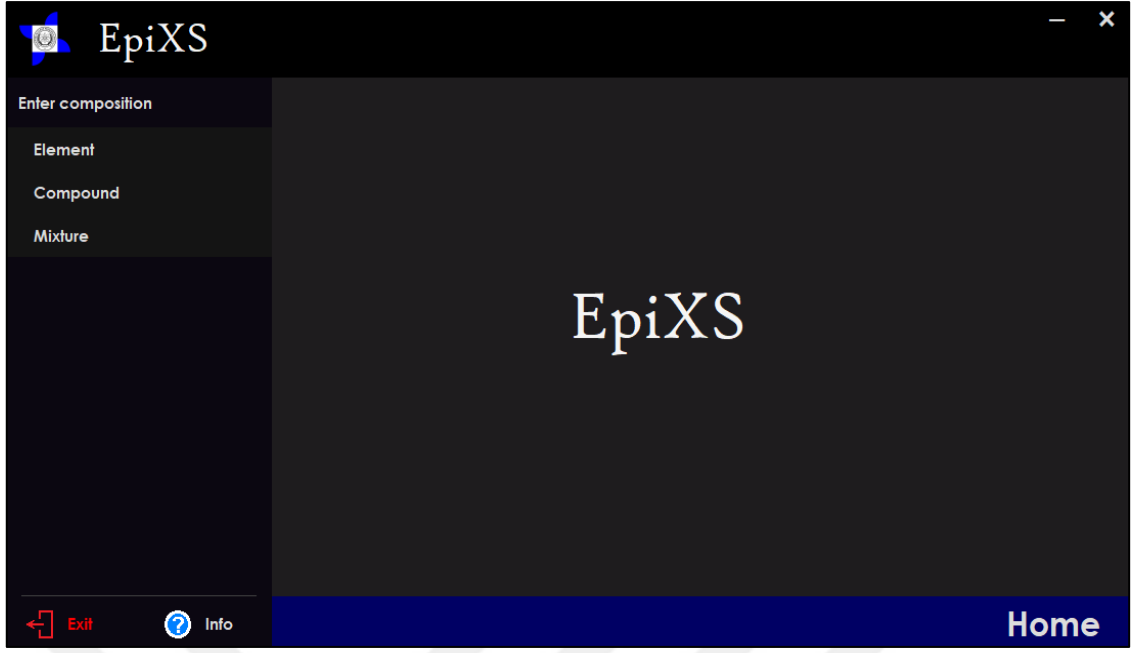
Energy Range:

Minimum: MeV
Maximum: MeV

Şekil 3.8 WinXCOM programının arayüz görüntüsü

3.4.1.2 EpiXS analizi

EpiXS, foton azaltılması, dozimetri ve ekranlama hesaplamaları yapmak için kullanılan Windows tabanlı bir yazılımdır. Radyasyondan korunma, tıbbi görüntüleme ve malzeme analizi gibi alanlarda, fotonların farklı malzemelerle etkileşimini belirlemede fizikçilere ve mühendislerin işlerini kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir (Hila vd., 2021). EpiXS yazılımının arayüzünü gösteren ekran görüntüsü, Şekil 3.9'da yer almaktadır.



Şekil 3.9 EpiXS programının arayüzü

3.4.1.3 GEANT4 analizi

GEANT4 yazılımı, nükleer enerjide radyasyonun madde üzerindeki etkilerini analiz etmeye, nötron ve gama radyasyonlarının madde ile etkileşimlerini incelemeye, reaktör tasarımına ve radyasyona maruz kalma dozu hesaplamalarına yardımcı olarak nükleer tesis güvenliğini artırmaya katkı sağlamaktadır. Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de GEANT4 simülasyon programına ait görseller bulunmaktadır (Agostinelli vd., 2003).

```

DetectorConstruction.cc
~/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/s.../extended/electromagnetic/TestEm13/src

80 // define Elements
81 //
82 G4double z,a;
83
84 G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", z=1, a= 1.01*g/mole);
85 G4Element* Li = new G4Element("Lithium", "Li", z=3, a= 6.941*g/mole);
86 G4Element* Be = new G4Element("Beryllium", "Be", z=4, a= 9.01218*g/mole);
87 G4Element* B = new G4Element("Boron", "B", z=5, a= 10.811*g/mole);
88 G4Element* C = new G4Element("Carbon", "C", z=6, a= 12.0107*g/mole);
89 G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7, a= 14.01*g/mole);
90 G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", z=8, a= 16.06*g/mole);
91 G4Element* F = new G4Element("Fluorine", "F", z=9, a= 18.9984*g/mole);
92 G4Element* Na = new G4Element("Sodium", "Na", z=11, a= 22.99*g/mole);
93 G4Element* Mg = new G4Element("Magnezyum", "Mg", z=12, a= 24.305*g/mole);
94 G4Element* Al = new G4Element("Aluminium", "Al", z=13, a= 26.9815386*g/mole);
95 G4Element* Si = new G4Element("Silisyum", "Si", z=14, a= 28.0855*g/mole);
96 G4Element* P = new G4Element("Phosphorus", "P", z=15, a= 30.973762*g/mole);
97 G4Element* S = new G4Element("Sulfur", "S", z=16, a= 32.065*g/mole);
98 G4Element* Cl = new G4Element("Chlorine", "Cl", z=17, a= 35.453*g/mole);
99 G4Element* Ar = new G4Element("Argon", "Ar", z=18, a= 39.948*g/mole);
100 G4Element* K = new G4Element("Potasyum", "K", z=19, a= 39.0983*g/mole);
101 G4Element* Ca = new G4Element("Kalsiyum", "Ca", z=20, a= 40.078*g/mole);
102 G4Element* Sc = new G4Element("Scandium", "Sc", z=21, a= 44.955912*g/mole);
103 G4Element* Ti = new G4Element("Titanium", "Ti", z=22, a= 47.867*g/mole);
104 G4Element* V = new G4Element("Vanadium", "V", z=23, a= 50.9415*g/mole);
105 G4Element* Cr = new G4Element("Chromium", "Cr", z=24, a= 51.9961*g/mole);
106 G4Element* Mn = new G4Element("Manganese", "Mn", z=25, a= 54.938045*g/mole);
107 G4Element* Fe = new G4Element("Iron", "Fe", z=26, a= 55.845*g/mole);
108 G4Element* Co = new G4Element("Cobalt", "Co", z=27, a= 58.933195*g/mole);
109 G4Element* Ni = new G4Element("Nickel", "Ni", z=28, a= 58.6934*g/mole);
110 G4Element* Cu = new G4Element("Copper", "Cu", z=29, a= 63.546*g/mole);
111 G4Element* Zn = new G4Element("Zinc", "Zn", z=30, a= 65.409*g/mole);
112 G4Element* Ge = new G4Element("Germanium", "Ge", z=32, a= 72.64*g/mole);
113 G4Element* Rb = new G4Element("Rubidium", "Rb", z=37, a= 85.4678*g/mole);
114 G4Element* Zr = new G4Element("Zirconium", "Zr", z=40, a= 91.224*g/mole);
115 G4Element* Nb = new G4Element("Niobium", "Nb", z=41, a= 92.90638*g/mole);
116 G4Element* Mo = new G4Element("Molybdenum", "Mo", z=42, a= 95.96*g/mole);
117 G4Element* Ag = new G4Element("Silver", "Ag", z=47, a= 107.8682*g/mole);
118 G4Element* Cd = new G4Element("Cadmium", "Cd", z=48, a= 112.411*g/mole);
119 G4Element* In = new G4Element("Indium", "In", z=49, a= 114.818*g/mole);
120 G4Element* Sn = new G4Element("Tin", "Sn", z=50, a= 118.710*g/mole);
121 G4Element* Te = new G4Element("Tellurium", "Te", z=52, a= 127.60*g/mole);
122 G4Element* I = new G4Element("Iodine", "I", z=53, a= 126.90447*g/mole);
123 G4Element* Ba = new G4Element("Barium", "Ba", z=56, a= 137.327*g/mole);
124 G4Element* Er = new G4Element("Erbium", "Er", z=68, a= 167.259*g/mole);
125 G4Element* Ta = new G4Element("Tantalum", "Ta", z=73, a= 180.94788*g/mole);
126 G4Element* W = new G4Element("Tungsten", "W", z=74, a= 183.84*g/mole);
127 G4Element* Pb = new G4Element("Lead", "Pb", z=82, a= 207.2*g/mole);
128 G4Element* Bi = new G4Element("Bismuth", "Bi", z=83, a= 208.9804*g/mole);
129 G4Element* Sb = new G4Element("Antimony", "Sb", z=51, a= 121.76*g/mole);
130
131 //

```

Şekil 3.10 GEANT4 programı gama analizinde kullanılan elementler

```

DetectorConstruction.cc
~/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/s.../extended/electromagnetic/TestEm13/src

180 G4Material* Pla =
181 new G4Material("Pla", density=1.22*g/cm3, ncomponents=);
182 Pla->AddElement(C, natoms=);
183 Pla->AddElement(H, natoms=);
184 Pla->AddElement(O, natoms=);
185
186 G4Material* kroni =
187 new G4Material("kroni", density=1.11582672*g/cm3, ncomponents=);
188 kroni->AddElement(Cr, natoms=);
189 kroni->AddElement(O, natoms=);
190 kroni->AddElement(C, natoms=11);
191 kroni->AddElement(H, natoms=10);
192
193 G4Material* kroni0 =
194 new G4Material("kroni0", density=1.11896258*g/cm3, ncomponents=);
195 kroni0->AddElement(Cr, natoms=);
196 kroni0->AddElement(O, natoms=);
197 kroni0->AddElement(C, natoms=11);
198 kroni0->AddElement(H, natoms=10);
199
200 G4Material* kron20 =
201 new G4Material("kron20", density=1.158601133*g/cm3, ncomponents=);
202 kron20->AddElement(Cr, natoms=);
203 kron20->AddElement(O, natoms=);
204 kron20->AddElement(C, natoms=11);
205 kron20->AddElement(H, natoms=10);
206
207 G4Material* antinoni =
208 new G4Material("antinoni", density=1.38220103*g/cm3, ncomponents=);
209 antinoni->AddElement(Sb, natoms=);
210 antinoni->AddElement(O, natoms=);
211 antinoni->AddElement(C, natoms=11);
212 antinoni->AddElement(H, natoms=10);
213
214 G4Material* antinoni0 =
215 new G4Material("antinoni0", density=1.30646322*g/cm3, ncomponents=);
216 antinoni0->AddElement(Sb, natoms=);
217 antinoni0->AddElement(O, natoms=);
218 antinoni0->AddElement(C, natoms=11);
219 antinoni0->AddElement(H, natoms=10);
220
221 G4Material* antinon20 =
222 new G4Material("antinon20", density=1.33745642*g/cm3, ncomponents=);
223 antinon20->AddElement(Sb, natoms=);
224 antinon20->AddElement(O, natoms=);
225 antinon20->AddElement(C, natoms=11);
226 antinon20->AddElement(H, natoms=10);
227
228 G4Material* crk =
229 new G4Material("crk", density=1.278820*g/cm3, ncomponents=);
230 crk->AddElement(C, fractionmass=11.4561*percent);

```

Şekil 3.11 GEANT4 terminal (gama) arayüzü

```
kaan@kaan-VirtualBox: ~/dirgama
Some /vis commands (optionally) take a string to specify colour.
/vis/list to see available colours.
Print> /run/initialize

The Box is 1 cm of Water

Material: Water H2O density: 1.000 g/cm3 Radl: 36.092 cm Nucl.Int.Length: 75.356 cm
         Imean: 70.000 eV temperature: 293.15 K pressure: 1.00 atm

----> Element: Hydrogen (H) Z = 1.0 N = 1 A = 1.010 g/mole
----> Isotope: H1 Z = 1 N = 1 A = 1.01 g/mole abundance: 99.989 %
----> Isotope: H2 Z = 1 N = 2 A = 2.01 g/mole abundance: 0.011 %
         ElMassFraction: 11.21 % ElnAbundance 66.67 %

----> Element: Oxygen (O) Z = 8.0 N = 16 A = 16.000 g/mole
----> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.757 %
----> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.038 %
----> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.205 %
         ElMassFraction: 88.79 % ElnAbundance 33.33 %

Idle> /testen/det/setMat Pla
Idle> /testen/det/setSize 6.089 mm
Idle> /gun/particle gamma
Idle> /gun/energy 1332.5 keV
Idle> /run/reinitializegeometry
Idle> /run/initialize

The Box is 6.089 mm of Pla

Material: Pla density: 1.220 g/cm3 Radl: 32.044 cm Nucl.Int.Length: 63.673 cm
         Imean: 74.444 eV temperature: 293.15 K pressure: 1.00 atm

----> Element: Carbon (C) Z = 6.0 N = 12 A = 12.011 g/mole
----> Isotope: C12 Z = 6 N = 12 A = 12.00 g/mole abundance: 98.930 %
----> Isotope: C13 Z = 6 N = 13 A = 13.00 g/mole abundance: 1.070 %
         ElMassFraction: 49.99 % ElnAbundance 33.33 %

----> Element: Hydrogen (H) Z = 1.0 N = 1 A = 1.010 g/mole
----> Isotope: H1 Z = 1 N = 1 A = 1.01 g/mole abundance: 99.989 %
----> Isotope: H2 Z = 1 N = 2 A = 2.01 g/mole abundance: 0.011 %
         ElMassFraction: 5.61 % ElnAbundance 44.44 %

----> Element: Oxygen (O) Z = 8.0 N = 16 A = 16.000 g/mole
----> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.757 %
----> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.038 %
----> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.205 %
         ElMassFraction: 44.40 % ElnAbundance 22.22 %

Idle> /run/printProgress 1000000
Idle> /run/beamOn 10000000
```

Şekil 3.12 GEANT4 gama simülasyon programını başlatmak için parametreler

Her bir numune üzerine toplam 10 000 000 gama fotonu bombardıman edilmiştir. GEANT4 platformu, bu simülasyondan elde edilen verilere dayanarak kütle azaltma katsayısını her bir numune için ayrı ayrı sunmaktadır.

3.4.2 Nötron radyasyonu zırlama analizi

Deneysel imkânsızlıklardan dolayı üretilen numunelerin radyasyon zırlama kabiliyetleri yalnızca teorik ve simülasyon yöntemler ile değerlendirilecektir. Hazırlanan numunelerin nötron zırlama kapasitesinin değerlendirilmesi için GEANT4 programı kullanılmıştır. Her biri 4,5 MeV enerjiye sahip 10 000 000 nötron parçacığı, numunelere yönlendirilmiş ve her bir numuneden geçen nötron sayıları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, standart bir kurşun blok ile karşılaştırılmıştır. Bu çerçevede, malzemelerden geçen nötron sayısındaki değişim, farklı enerji değerleri (0,1 MeV, 0,5 MeV, 1 MeV, 3 MeV, 4,5 MeV, 8 MeV ve 10 MeV) için simüle edilmiştir. Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te GEANT4'e ait görseller sunulmaktadır.

```

DetectorConstruction.cc
~/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/s.../examples/extended/hadronic/hadr03/src

76
77 //.....0000000000.....0000000000.....0000000000.....0000000000.....
78
79 void DetectorConstruction::DefineMaterials()
80 {
81 // define a Material from isotopes
82 //
83 MaterialWithSingleIsotope("Molybdenum98", "Mo98", 10.28*g/cm3, 42, 98);
84
85 //NE213
86 G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", 1, 1.00794*g/mole);
87 G4Element* Li = new G4Element("Lithium", "Li", 3, 6.941*g/mole);
88 G4Element* Be = new G4Element("Berllium", "Be", 4, 9.01218*g/mole);
89 G4Element* B = new G4Element("Boron", "B", 5, 10.811*g/mole);
90 G4Element* C = new G4Element("Carbon", "C", 6, 12.0107*g/mole);
91 G4Element* N = new G4Element("Azot", "N", 7, 14.0067*g/mole);
92 G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", 8, 15.9994*g/mole);
93 G4Element* F = new G4Element("Fluorine", "F", 9, 18.9984*g/mole);
94 G4Element* Na = new G4Element("Sodium", "Na", 11, 22.98976*g/mole);
95 G4Element* Mg = new G4Element("Magnezyum", "Mg", 12, 24.305*g/mole);
96 G4Element* Al = new G4Element("Aluminium", "Al", 13, 26.9815386*g/mole);
97 G4Element* Si = new G4Element("Silisyum", "Si", 14, 28.0855*g/mole);
98 G4Element* P = new G4Element("Phosohorus", "P", 15, 30.973762*g/mole);
99 G4Element* S = new G4Element("Sulfur", "S", 16, 32.065*g/mole);
100 G4Element* Cl = new G4Element("Chlorine", "Cl", 17, 35.453*g/mole);
101 G4Element* Ar = new G4Element("Argon", "Ar", 18, 39.948*g/mole);
102 G4Element* K = new G4Element("Potasyum", "K", 19, 39.0983*g/mole);
103 G4Element* Ca = new G4Element("Kalsiyum", "Ca", 20, 40.078*g/mole);
104 G4Element* Sc = new G4Element("Scandium", "Sc", 21, 44.955912*g/mole);
105 G4Element* Ti = new G4Element("Tltanium", "Ti", 22, 47.867*g/mole);
106 G4Element* V = new G4Element("Vanadium", "V", 23, 50.9415*g/mole);
107 G4Element* Cr = new G4Element("Chromium", "Cr", 24, 51.9961*g/mole);
108 G4Element* Mn = new G4Element("Manganese", "Mn", 25, 54.938045*g/mole);
109 G4Element* Fe = new G4Element("Iron", "Fe", 26, 55.845*g/mole);
110 G4Element* Co = new G4Element("Cobalt", "Co", 27, 58.933195*g/mole);
111 G4Element* Ni = new G4Element("Nickel", "Ni", 28, 58.6934*g/mole);
112 G4Element* Cu = new G4Element("Copper", "Cu", 29, 63.546*g/mole);
113 G4Element* Zn = new G4Element("Zinc", "Zn", 30, 65.409*g/mole);
114 G4Element* Rb = new G4Element("Rubidium", "Rb", 37, 85.4678*g/mole);
115 G4Element* Zr = new G4Element("Zirconium", "Zr", 40, 91.224*g/mole);
116 G4Element* Nb = new G4Element("Nlobium", "Nb", 41, 92.90638*g/mole);
117 G4Element* Cd = new G4Element("Cadmium", "Cd", 48, 112.411*g/mole);
118 G4Element* Te = new G4Element("Tellurium", "Te", 52, 127.60*g/mole);
119 G4Element* Ba = new G4Element("Barium", "Ba", 56, 137.327*g/mole);
120 G4Element* Er = new G4Element("Erbium", "Er", 68, 167.259*g/mole);
121 G4Element* Ta = new G4Element("Tantalum", "Ta", 73, 180.94788*g/mole);
122 G4Element* W = new G4Element("Tungsten", "W", 74, 183.84*g/mole);
123 G4Element* Pb = new G4Element("Lead", "Pb", 82, 207.2*g/mole);
124 G4Element* Bi = new G4Element("Bismuth", "Bi", 83, 208.9804*g/mole);
125 G4Element* Sb = new G4Element("Antimony", "Sb", 51, 121.76*g/mole);
126

```

Şekil 3.13 GEANT4 programı nötron analizinde kullanılan elementler

```

*DetectorConstruction.cc
~/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/s.../examples/extended/hadronic/hadr03/src

152 G4Material* Pla =
153 new G4Material("Pla", 1.21*g/cm3, 3);
154 Pla->AddElement(C, 3);
155 Pla->AddElement(O, 3);
156 Pla->AddElement(H, 3);
157
158 G4Material* kroni =
159 new G4Material("kroni", 1.11198207*g/cm3, 4);
160 kroni->AddElement(Cr, 3);
161 kroni->AddElement(O, 3);
162 kroni->AddElement(C, 3);
163 kroni->AddElement(H, 30);
164
165 G4Material* kroni0 =
166 new G4Material("kroni0", 1.11898259*g/cm3, 4);
167 kroni0->AddElement(Cr, 3);
168 kroni0->AddElement(O, 3);
169 kroni0->AddElement(C, 3);
170 kroni0->AddElement(H, 30);
171
172 G4Material* kron20 =
173 new G4Material("kron20", 1.15806133*g/cm3, 4);
174 kron20->AddElement(Cr, 3);
175 kron20->AddElement(O, 3);
176 kron20->AddElement(C, 3);
177 kron20->AddElement(H, 30);
178
179 G4Material* antinon1 =
180 new G4Material("antinon1", 1.30260183*g/cm3, 4);
181 antinon1->AddElement(Sb, 3);
182 antinon1->AddElement(O, 3);
183 antinon1->AddElement(C, 3);
184 antinon1->AddElement(H, 30);
185
186 G4Material* antinon10 =
187 new G4Material("antinon10", 1.30046322*g/cm3, 4);
188 antinon10->AddElement(Sb, 3);
189 antinon10->AddElement(O, 3);
190 antinon10->AddElement(C, 3);
191 antinon10->AddElement(H, 30);
192
193 G4Material* antinon20 =
194 new G4Material("antinon20", 1.33745845*g/cm3, 4);
195 antinon20->AddElement(Sb, 3);
196 antinon20->AddElement(O, 3);
197 antinon20->AddElement(C, 3);
198 antinon20->AddElement(H, 30);
199
200 G4Material* crk =
201 new G4Material("crk", 1.278886*g/cm3, 4);
202 crk->AddElement(C, 45.4941*percent);

```

Şekil 3.14 GEANT4 terminal (nötron) arayüzü

```
kaan@kaan-VirtualBox: ~/zihnotron

Registered models:
None

Registered filter factories:
attributeFilter
chargeFilter
originVolumeFilter
particleFilter
encounteredVolumeFilter

Registered filters:
None

You have successfully registered the following user vis actions.
Run Duration User Vis Actions: none
End of Event User Vis Actions: none
End of Run User Vis Actions: none

Some /vis commands (optionally) take a string to specify colour.
/vis/list to see available colours.
Prints /run/initialize

The Box is 10 m of Molybdenum98

Material: Molybdenum98 density: 10.280 g/cm3 Radl: 9.731 nm Nucl.Int.Length: 15.692 cm
Imean: 424.000 eV temperature: 293.15 K pressure: 1.00 atm

----> Element: Molybdenum98 (Mo98) Z = 42.0 N = 98 A = 97.905 g/mole
----> Isotope: Mo98 Z = 42 N = 98 A = 97.91 g/mole abundance: 100.000 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

/home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6
### G4ParticleHPInelastic instantiated for particle neutron data directory variable is G4NEUTRONHPDATA pointing to /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6
NeutronHP: /capture file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/capture/CrossSection/6_nat_Carbon
NeutronHP: /elastic file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Elastic/CrossSection/6_nat_Carbon
NeutronHP: /inelastic file for Z = 6, A = 12 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Elastic/CrossSection/6_nat_Carbon
NeutronHP: /capture file for Z = 73, A = 180 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/capture/CrossSection/73_181_Tantalum
NeutronHP: /elastic file for Z = 73, A = 180 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Elastic/CrossSection/73_181_Tantalum
NeutronHP: /inelastic file for Z = 73, A = 180 is not found and NeutronHP will use /home/kaan/kaansavli/geant4.10.07.p01-install/share/Geant4-10.7.1/data/G4NDL4.6/Elastic/CrossSection/73_181_Tantalum

### == Deexcitation model: UtonDeexcitation is activated for 1 region:
### == Auger cascade flag: 1
### == Ignore cuts flag: 1
Idle> /testhadr/det/setMat Pla
Idle> /testhadr/det/setSize 10 mm
Idle> /gun/particle neutron
Idle> /gun/energy 4.5 MeV
Idle> /run/beamon 10000000
```

Şekil 3.15 GEANT4 nötron simülasyon programını başlatmak için parametreler

GEANT4 simülasyon programına ek olarak her bir numune için hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değer ne kadar büyükse o numunenin o kadar iyi nötron radyasyonu zırhlayabileceği anlamı bulunmaktadır.

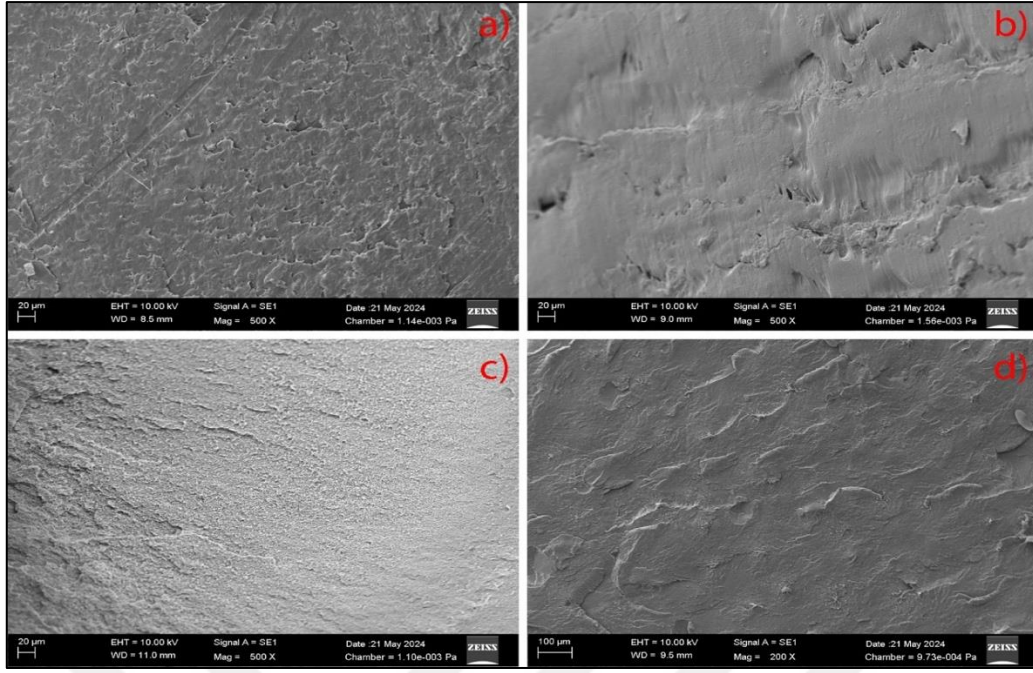
$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i (\Sigma_R / \rho)_i \quad (3.1)$$

4. BULGULAR

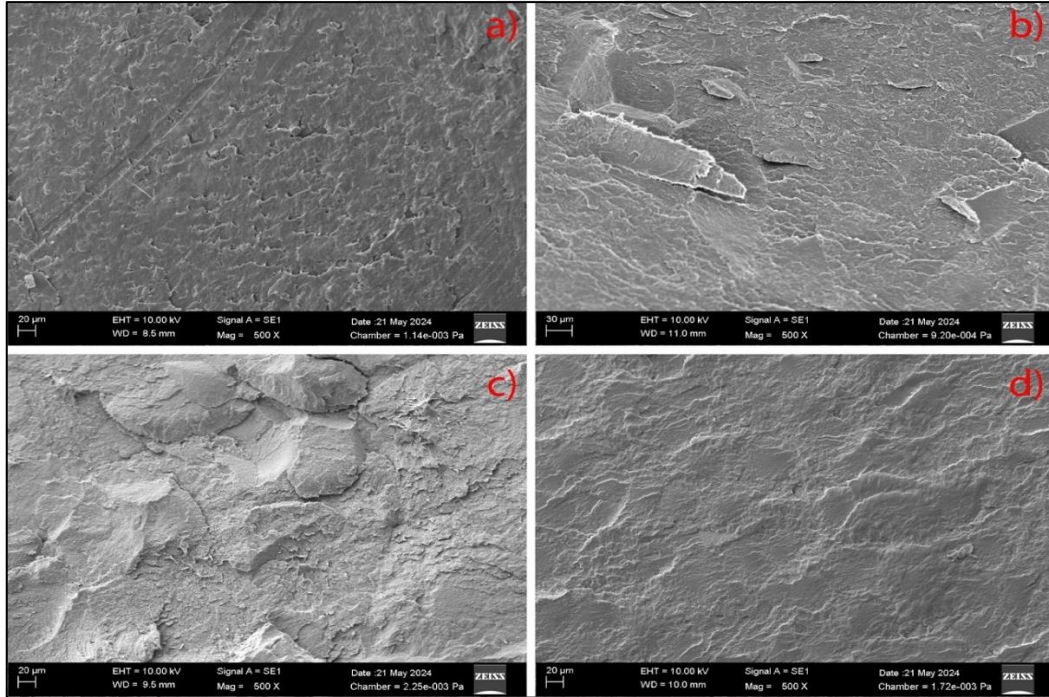
Bu tez çalışmasında, PLA granülü kullanılarak 9 farklı numune üretilmiştir. Üretim sonucunda; Saf PLA, %10 katkılı Cr_2O_3 , %10 katkılı Sb_2O_3 , 1 dip(dalma) Cr_2O_3 , 10 dip(dalma) Cr_2O_3 , 20 dip(dalma) Cr_2O_3 , 1 dip(dalma) Sb_2O_3 , 10 dip(dalma) Sb_2O_3 , 20 dip(dalma) Sb_2O_3 numuneleri elde edilmiştir. Bu numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet metodu kullanılarak oda sıcaklığında, saf PLA için $1,2201 \text{ g/cm}^3$, %10 katkılı Cr_2O_3 için $1,2788 \text{ g/cm}^3$, %10 katkılı Sb_2O_3 için $1,4185 \text{ g/cm}^3$, 1 dip(dalma) Cr_2O_3 için $1,1319 \text{ g/cm}^3$, 10 dip(dalma) Cr_2O_3 için $1,1189 \text{ g/cm}^3$, 20 dip(dalma) Cr_2O_3 için $1,1586 \text{ g/cm}^3$, 1 dip(dalma) Sb_2O_3 için $1,3026 \text{ g/cm}^3$, 10 dip(dalma) Sb_2O_3 için $1,3064 \text{ g/cm}^3$, 20 dip(dalma) Sb_2O_3 için $1,3374 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

4.1 SEM Analiz Sonuçları

Üretilen numunelerin malzeme yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de sırasıyla Cr_2O_3 1 dip, Cr_2O_3 10 dip ve Cr_2O_3 20 dip numunelerinin görüntüleri sunulmaktadır. Şekilde sunulan numunelerin sadece dalma yöntemiyle boyandığı ve katkı maddesi kullanılmadığı görülmektedir. Boyanın PLA'ya ne şekilde tutunduğunu daha iyi gözlemlemek için SEM görüntülerinde yakınlaştırma oranı 500x olan görüntüler seçilmiştir. Şekil 4.1'de yer alan Cr_2O_3 10 dip numunesinin görüntüsü, Cr_2O_3 1 dip numunesine kıyasla daha kabarık bir boya tabakasına sahipken, Cr_2O_3 20 dip numunesindeki boya tabakası ise, 20 kez dalma işlemi sonrasında, Cr_2O_3 1 dip ve Cr_2O_3 10 dip numunelerine göre daha belirgin hale gelmiştir.

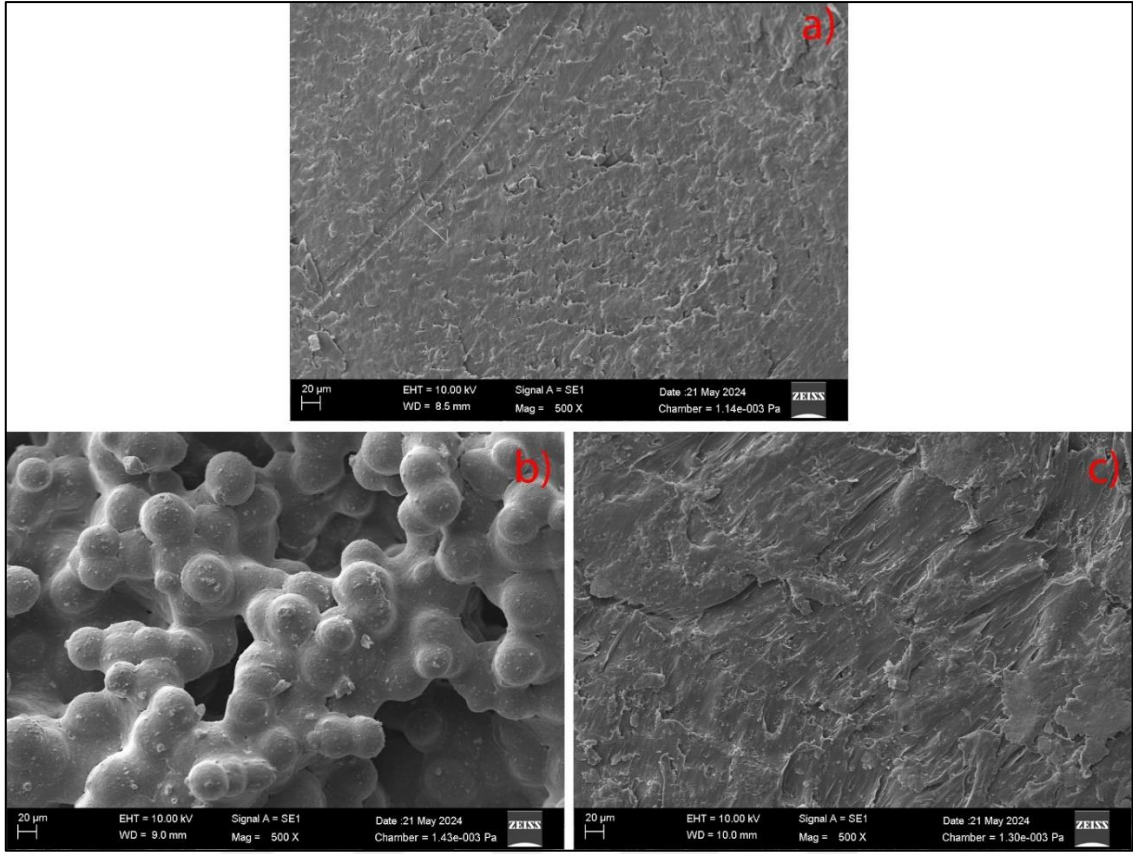


Şekil 4.1 Cr_2O_3 dip boyalı PLA numunesinin SEM görüntüsü (a-saf PLA, b-1 dip, c-10 dip, d-20 dip Krom Kaplama)



Şekil 4.2 Sb_2O_3 dip boyalı PLA numunesinin SEM görüntüsü (a-saf PLA, b-1 dip, c-10 dip, d-20 dip Antimon Kaplama)

Şekil 4.2’de sırasıyla yer alan Sb_2O_3 1 dip, Sb_2O_3 10 dip, Sb_2O_3 20 dip numunelerine bakıldığında, yüzeyde oluşan kırıklar ve katmanlardaki çatlaklar Şekil 4.1’e göre daha net ve belirgin şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 %10 Sb_2O_3 katkılı ve %10 Cr_2O_3 katkılı PLA numunelerinin SEM görüntüsü
(a-saf PLA, b-%10 Cr_2O_3 katkılı kompozit, c-%10 Sb_2O_3 katkılı kompozit)

Şekil 4.3'te PLA, içine %10 Cr_2O_3 eklenip ısıtıldıktan sonra bir süre daha ısıtılmaya devam edilmiş ve ardından oluşan numune, beherin ağzı parafinle kapatılarak 1 hafta boyunca soğumaya ve kalıplamaya bırakılmıştır. SEM görüntülerine bakıldığında, PLA granülünün tam olarak erimediği izlenimi oluşmaktadır. Bu durumun sebepleri sırasıyla, Cr_2O_3 katkısı, yeterince ısıtılmamış olması veya yeterince soğumaya bırakılmamış olmasıdır. Şekil 4.3'te c) kısmında ise b) kısmının (%10 katkılı Cr_2O_3) aksine PLA granülü ile antimon boyasının katkısı daha iyi bir şekilde gözlemlenmiştir.

4.2 Gama Radyasyonu Zırhlama Parametrelerine Ait Bulgular

Bu çalışmada, Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 katkılı ve dalma yöntemiyle boyanan polimer kompozit malzemelerin gama radyasyonu zırhlama özellikleri, kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, ortalama serbest yol ve radyasyondan koruma verimliliği parametreleri açısından incelenmiştir. Bu parametreler hem deneysel hem de teorik yöntemlerle hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Deneyisel bölümde, gama radyasyonuna karşı zırhlama kabiliyetinin belirlenmesi amacıyla yapılan ölçümler, 59,5 keV ile 1332,5 keV arasındaki enerjilerde, ^{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 gama kaynakları ile ve NaI (Tl) dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Teorik hesaplamalar ise radyasyon zırhlama çalışmalarında yaygın olarak kullanılan GEANT4, WinXCOM ve EpiXS programları ile yapılmıştır.

4.2.1 Lineer azaltma katsayısına ait bulgular

Bu çalışmada, numunelerin lineer azaltma katsayısı değerleri, 59,5 keV ile 1332,5 keV arasındaki 11 farklı enerji seviyesinde, NaI (Tl) dedektörü kullanılarak elde edilen spektrumlar yardımıyla belirlenmiştir. Deneyisel sonuçları karşılaştırmak için lineer azaltma katsayısı sonuçları GEANT4 simülasyon kodu ve WinXCOM ve EpiXS programları yardımıyla da belirlenmiştir. Tablo 4.1 ile Tablo 4.8 arasında üretilen polimer tabanlı kompozitlerin teorik ve GEANT4 lineer azaltma katsayısı verileri sunulurken, Tablo 4.9’da ise numunelerin deneyisel lineer azaltma katsayısını sunulmaktadır. Tablolardan görülebileceği gibi, gama enerjisi arttıkça lineer azaltma katsayısı değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Lineer azaltma katsayısının yüksek olması, zırh malzemesinin etkinliğini artıracak için, özellikle 59,5 keV ve 80,9 keV enerji seviyelerinde numunelerin zırhlama başarısının daha yüksek olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1 Saf PLA ve Cr₂O₃ 1 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Cr ₂ O ₃ -1 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6477	0,7681	0,7693
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3290	0,3867	0,3871
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2587	0,2908	0,2910
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2326	0,2527	0,2528
59,5	0,2192	±0,0701	0,2191	0,2332	0,2332	0,2242	±0,0640	0,2192	0,2333	0,2333
80,9	0,2014	±0,0459	0,2013	0,2094	0,2094	0,2048	±0,0382	0,2013	0,2094	0,2093
302,9	0,1359	±0,0293	0,1358	0,1368	0,1369	0,1359	±0,0213	0,1357	0,1367	0,1368
356	0,1283	±0,0276	0,1282	0,1287	0,1286	0,1282	±0,0321	0,1281	0,1286	0,1285
383,9	0,1247	±0,0322	0,1246	0,1250	0,1249	0,1247	±0,0393	0,1245	0,1249	0,1248
511	0,1115	±0,0247	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0346	0,1113	0,1111	0,1110
661,7	0,0999	±0,0149	0,0998	0,0993	0,0993	0,0999	±0,0336	0,0998	0,0993	0,0992
1173,2	0,0760	±0,0245	0,0760	0,0757	0,0755	0,0760	±0,0163	0,0759	0,0756	0,0755
1274,5	0,0728	±0,0213	0,0728	0,0725	0,0724	0,0728	±0,0119	0,0727	0,0725	0,0724
1332,5	0,0712	±0,0192	0,0711	0,0709	0,0707	0,0711	±0,0257	0,0711	0,0708	0,0707

Tablo 4.2 Saf PLA ve Cr₂O₃ 10 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Cr ₂ O ₃ -10 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6645	0,7863	0,7875
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3343	0,3922	0,3926
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2609	0,2931	0,2933
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2336	0,2538	0,2539
59,5	0,2192	±0,0701	0,2191	0,2332	0,2332	0,2277	±0,0338	0,2197	0,2338	0,2339
80,9	0,2014	±0,0459	0,2013	0,2094	0,2094	0,2061	±0,0367	0,2014	0,2095	0,2095
302,9	0,1359	±0,0293	0,1358	0,1368	0,1369	0,1358	±0,0475	0,1356	0,1366	0,1367
356	0,1283	±0,0276	0,1282	0,1287	0,1286	0,1282	±0,0263	0,1280	0,1285	0,1284
383,9	0,1247	±0,0322	0,1246	0,1250	0,1249	0,1246	±0,0291	0,1244	0,1248	0,1247
511	0,1115	±0,0247	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0193	0,1112	0,1110	0,1109
661,7	0,0999	±0,0149	0,0998	0,0993	0,0993	0,0998	±0,0210	0,0997	0,0992	0,0991
1173,2	0,0760	±0,0245	0,0760	0,0757	0,0755	0,0760	±0,0118	0,0758	0,0755	0,0754
1274,5	0,0728	±0,0213	0,0728	0,0725	0,0724	0,0728	±0,0248	0,0727	0,0724	0,0723
1332,5	0,0712	±0,0192	0,0711	0,0709	0,0707	0,0711	±0,0228	0,0710	0,0707	0,0706

Tablo 4.3 Saf PLA ve Cr₂O₃ 20 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Cr ₂ O ₃ -20 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6914	0,8140	0,8152
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3425	0,4008	0,4012
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2643	0,2967	0,2970
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2353	0,2556	0,2558
59,5	0,2192	±0,0701	0,2191	0,2332	0,2332	0,2295	±0,0524	0,2207	0,2350	0,2350
80,9	0,2014	±0,0459	0,2013	0,2094	0,2094	0,2068	±0,0327	0,2017	0,2099	0,2099
302,9	0,1359	±0,0293	0,1358	0,1368	0,1369	0,1358	±0,0230	0,1356	0,1366	0,1366
356	0,1283	±0,0276	0,1282	0,1287	0,1286	0,1281	±0,0185	0,1280	0,1285	0,1284
383,9	0,1247	±0,0322	0,1246	0,1250	0,1249	0,1246	±0,0361	0,1244	0,1248	0,1247
511	0,1115	±0,0247	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0328	0,1112	0,1110	0,1109
661,7	0,0999	±0,0149	0,0998	0,0993	0,0993	0,0998	±0,0184	0,0997	0,0992	0,0991
1173,2	0,0760	±0,0245	0,0760	0,0757	0,0755	0,0760	±0,0173	0,0758	0,0755	0,0754
1274,5	0,0728	±0,0213	0,0728	0,0725	0,0724	0,0728	±0,0127	0,0727	0,0724	0,0723
1332,5	0,0712	±0,0192	0,0711	0,0709	0,0707	0,0711	±0,0186	0,0710	0,0707	0,0706

Tablo 4.4 Saf PLA ve Sb₂O₃ 1 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Sb ₂ O ₃ -1 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6477	0,7681	0,7693
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3290	0,3867	0,3871
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2587	0,2908	0,2910
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2326	0,2527	0,2528
59,5	0,2192	±0,0677	0,2191	0,2332	0,2332	0,3172	±0,0776	0,2192	0,2333	0,2333
80,9	0,2014	±0,0355	0,2013	0,2094	0,2094	0,2426	±0,0540	0,2013	0,2094	0,2093
302,9	0,1359	±0,0249	0,1358	0,1368	0,1369	0,1365	±0,0415	0,1357	0,1367	0,1368
356	0,1283	±0,0433	0,1282	0,1287	0,1286	0,1286	±0,0369	0,1281	0,1286	0,1285
383,9	0,1247	±0,0368	0,1246	0,1250	0,1249	0,1249	±0,0257	0,1245	0,1249	0,1248
511	0,1115	±0,0199	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0187	0,1113	0,1111	0,1110
661,7	0,0999	±0,0311	0,0998	0,0993	0,0993	0,0998	±0,0228	0,0998	0,0993	0,0992
1173,2	0,0760	±0,0205	0,0760	0,0757	0,0755	0,0759	±0,0265	0,0759	0,0756	0,0755
1274,5	0,0728	±0,0121	0,0728	0,0725	0,0724	0,0728	±0,0172	0,0727	0,0725	0,0724
1332,5	0,0712	±0,0150	0,0711	0,0709	0,0707	0,0710	±0,0148	0,0711	0,0708	0,0707

Tablo 4.5 Saf PLA ve Sb₂O₃ 10 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Sb ₂ O ₃ -10 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6645	0,7863	0,7875
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3343	0,3922	0,3926
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2609	0,2931	0,2933
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2336	0,2538	0,2539
59,5	0,2192	±0,0677	0,2191	0,2332	0,2332	0,3519	±0,0251	0,2197	0,2338	0,2339
80,9	0,2014	±0,0355	0,2013	0,2094	0,2094	0,2572	±0,0526	0,2014	0,2095	0,2095
302,9	0,1359	±0,0249	0,1358	0,1368	0,1369	0,1367	±0,0428	0,1356	0,1366	0,1367
356	0,1283	±0,0433	0,1282	0,1287	0,1286	0,1286	±0,0276	0,1280	0,1285	0,1284
383,9	0,1247	±0,0368	0,1246	0,1250	0,1249	0,1249	±0,0428	0,1244	0,1248	0,1247
511	0,1115	±0,0199	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0201	0,1112	0,1110	0,1109
661,7	0,0999	±0,0311	0,0998	0,0993	0,0993	0,0998	±0,0171	0,0997	0,0992	0,0991
1173,2	0,0760	±0,0205	0,0760	0,0757	0,0755	0,0758	±0,0190	0,0758	0,0755	0,0754
1274,5	0,0728	±0,0121	0,0728	0,0725	0,0724	0,0727	±0,0176	0,0727	0,0724	0,0723
1332,5	0,0712	±0,0150	0,0711	0,0709	0,0707	0,0710	±0,0155	0,0710	0,0707	0,0706

Tablo 4.6 Saf PLA ve Sb₂O₃ 20 dip boyalı numunelerin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Sb ₂ O ₃ -20 dip				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			0,6914	0,8140	0,8152
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,3425	0,4008	0,4012
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,2643	0,2967	0,2970
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,2353	0,2556	0,2558
59,5	0,2192	±0,0677	0,2191	0,2332	0,2332	0,3789	±0,0676	0,2207	0,2350	0,2350
80,9	0,2014	±0,0355	0,2013	0,2094	0,2094	0,2685	±0,0393	0,2017	0,2099	0,2099
302,9	0,1359	±0,0249	0,1358	0,1368	0,1369	0,1369	±0,0494	0,1356	0,1366	0,1366
356	0,1283	±0,0433	0,1282	0,1287	0,1286	0,1287	±0,0315	0,1280	0,1285	0,1284
383,9	0,1247	±0,0368	0,1246	0,1250	0,1249	0,1250	±0,0209	0,1244	0,1248	0,1247
511	0,1115	±0,0199	0,1114	0,1112	0,1111	0,1114	±0,0390	0,1112	0,1110	0,1109
661,7	0,0999	±0,0311	0,0998	0,0993	0,0993	0,0997	±0,0149	0,0997	0,0992	0,0991
1173,2	0,0760	±0,0205	0,0760	0,0757	0,0755	0,0758	±0,0262	0,0758	0,0755	0,0754
1274,5	0,0728	±0,0121	0,0728	0,0725	0,0724	0,0726	±0,0112	0,0727	0,0724	0,0723
1332,5	0,0712	±0,0150	0,0711	0,0709	0,0707	0,0709	±0,0200	0,0710	0,0707	0,0706

Tablo 4.7 Saf PLA ve %10 Cr₂O₃ katkılı numunelerinin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Cr ₂ O ₃ Katkılı				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			2,2059	2,3800	2,3840
30			0,3278	0,3853	0,3858			0,8081	0,8929	0,8944
40			0,2583	0,2903	0,2905			0,4661	0,5133	0,5142
50			0,2324	0,2525	0,2527			0,3421	0,3719	0,3723
59,5	0,2192	±0,0576	0,2191	0,2332	0,2332	0,2451	±0,0534	0,2867	0,3077	0,3079
80,9	0,2014	±0,0376	0,2013	0,2094	0,2094	0,2139	±0,0493	0,2319	0,2438	0,2439
302,9	0,1359	±0,0327	0,1358	0,1368	0,1369	0,1377	±0,0238	0,1414	0,1428	0,1428
356	0,1283	±0,0293	0,1282	0,1287	0,1286	0,1299	±0,0240	0,1333	0,1341	0,1339
383,9	0,1247	±0,0312	0,1246	0,1250	0,1249	0,1263	±0,0200	0,1296	0,1301	0,1301
511	0,1115	±0,0217	0,1114	0,1112	0,1111	0,1151	±0,0300	0,1158	0,1156	0,1156
661,7	0,0999	±0,0254	0,0998	0,0993	0,0993	0,1012	±0,0206	0,1037	0,1033	0,1032
1173,2	0,0760	±0,0175	0,0760	0,0757	0,0755	0,0770	±0,0167	0,0789	0,0786	0,0785
1274,5	0,0728	±0,0169	0,0728	0,0725	0,0724	0,0738	±0,0118	0,0756	0,0753	0,0752
1332,5	0,0712	±0,0183	0,0711	0,0709	0,0707	0,0721	±0,0174	0,0739	0,0736	0,0735

Tablo 4.8 Saf PLA ve %10 Sb₂O₃ katkılı numunelerinin lineer azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA					Sb ₂ O ₃ Katkılı				
	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	DENEY	BELİRSİZLİK	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20			0,6423	0,7635	0,7647			2,9681	3,2683	3,2608
30			0,3278	0,3853	0,3858			1,0970	1,2371	1,2097
40			0,2583	0,2903	0,2905			2,4021	2,4952	2,4957
50			0,2324	0,2525	0,2527			1,4145	1,4781	1,4804
59,5	0,2192	±0,0576	0,2191	0,2332	0,2332	0,4722	±0,0643	0,9612	1,0081	1,0107
80,9	0,2014	±0,0376	0,2013	0,2094	0,2094	0,3143	±0,0689	0,5307	0,5570	0,5578
302,9	0,1359	±0,0327	0,1358	0,1368	0,1369	0,1446	±0,0302	0,1622	0,1648	0,1647
356	0,1283	±0,0293	0,1282	0,1287	0,1286	0,1358	±0,0279	0,1510	0,1526	0,1524
383,9	0,1247	±0,0312	0,1246	0,1250	0,1249	0,1318	±0,0294	0,1461	0,1473	0,1473
511	0,1115	±0,0217	0,1114	0,1112	0,1111	0,1173	±0,0263	0,1291	0,1294	0,1293
661,7	0,0999	±0,0254	0,0998	0,0993	0,0993	0,1050	±0,0215	0,1151	0,1148	0,1147
1173,2	0,0760	±0,0175	0,0760	0,0757	0,0755	0,0797	±0,0170	0,0872	0,0869	0,0867
1274,5	0,0728	±0,0169	0,0728	0,0725	0,0724	0,0764	±0,0121	0,0835	0,0833	0,0832
1332,5	0,0712	±0,0183	0,0711	0,0709	0,0707	0,0746	±0,0151	0,0816	0,0814	0,0812

Tablo 4.9 Numunelerin deneysel olarak lineer azaltma katsayıları (cm⁻¹)

Enerji (keV)	Saf PLA	%10 Cr ₂ O ₃ Katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ Katkılı	Cr ₂ O ₃ 1 Dip	Cr ₂ O ₃ 10 Dip	Cr ₂ O ₃ 20 Dip	Sb ₂ O ₃ 1 Dip	Sb ₂ O ₃ 10 Dip	Sb ₂ O ₃ 20 Dip
59,5	0,2192	0,2450	0,4722	0,2241	0,2276	0,2295	0,3172	0,3518	0,3789
80,9	0,2013	0,2138	0,3143	0,2048	0,2061	0,2068	0,2425	0,2571	0,2685
302,9	0,1358	0,1377	0,1446	0,1358	0,1358	0,1358	0,1365	0,1367	0,1369
356	0,1283	0,1299	0,1357	0,1282	0,1281	0,1281	0,1286	0,1286	0,1287
383,9	0,1246	0,1263	0,1317	0,1246	0,1246	0,1245	0,1248	0,1249	0,1250
511	0,1114	0,1150	0,1173	0,1114	0,1114	0,1113	0,1114	0,1114	0,1114
661,7	0,0998	0,1011	0,1049	0,0998	0,0998	0,0998	0,0997	0,0997	0,0997
1173,2	0,0760	0,0769	0,0797	0,0760	0,0759	0,0759	0,0758	0,0758	0,0757
1274,5	0,0728	0,0737	0,0763	0,0728	0,0727	0,0727	0,0727	0,0726	0,0726
1332,5	0,0711	0,0720	0,0746	0,0711	0,0711	0,0711	0,0710	0,0709	0,0709

4.2.2 Kütle azaltma katsayısına ait bulgular

Kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısının malzeme yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanır. Tablo 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13'te üretilen polimer malzemelerinin kütle azaltma katsayıları sunulmaktadır. Grafikler ve tablolardan da görüldüğü üzere, gama radyasyonu enerjisindeki artışla birlikte kütle azaltma katsayısında bir azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 4.10 Saf PLA ve Cr₂O₃ boyalı numunesinin kütle azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA			Cr ₂ O ₃ -1 dip			Cr ₂ O ₃ -10 dip			Cr ₂ O ₃ -20 dip		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	0,5265	0,6259	0,6268	0,5722	0,6785	0,6796	0,5939	0,7027	0,7038	0,5967	0,7025	0,7036
30	0,2687	0,3159	0,3162	0,2907	0,3416	0,3419	0,2988	0,3505	0,3509	0,2956	0,3459	0,3463
40	0,2117	0,2380	0,2381	0,2286	0,2569	0,2571	0,2331	0,2619	0,2621	0,2281	0,2561	0,2563
50	0,1905	0,2070	0,2071	0,2054	0,2232	0,2233	0,2087	0,2268	0,2269	0,2031	0,2206	0,2208
59,5	0,1796	0,1912	0,1912	0,1936	0,2061	0,2061	0,1963	0,2090	0,2090	0,1905	0,2028	0,2028
80,9	0,1650	0,1717	0,1716	0,1778	0,1849	0,1849	0,1800	0,1872	0,1872	0,1741	0,1812	0,1812
302,9	0,1113	0,1122	0,1122	0,1199	0,1208	0,1208	0,1212	0,1221	0,1221	0,1170	0,1179	0,1179
356	0,1051	0,1055	0,1054	0,1131	0,1136	0,1135	0,1144	0,1148	0,1147	0,1104	0,1109	0,1108
383,9	0,1021	0,1025	0,1024	0,1100	0,1103	0,1103	0,1112	0,1115	0,1115	0,1074	0,1077	0,1076
511	0,0913	0,0911	0,0911	0,0984	0,0981	0,0981	0,0994	0,0992	0,0991	0,0960	0,0958	0,0957
661,7	0,0818	0,0814	0,0813	0,0881	0,0877	0,0876	0,0891	0,0886	0,0886	0,0860	0,0856	0,0855
1173,2	0,0623	0,0620	0,0619	0,0671	0,0668	0,0667	0,0678	0,0675	0,0674	0,0654	0,0652	0,0651
1274,5	0,0596	0,0594	0,0594	0,0642	0,0640	0,0639	0,0649	0,0647	0,0646	0,0627	0,0625	0,0624
1332,5	0,0583	0,0581	0,0580	0,0628	0,0625	0,0624	0,0634	0,0632	0,0631	0,0613	0,0610	0,0609

Tablo 4.11 Saf PLA ve Sb₂O₃ boyalı numunesinin kütle azaltma katsayısı

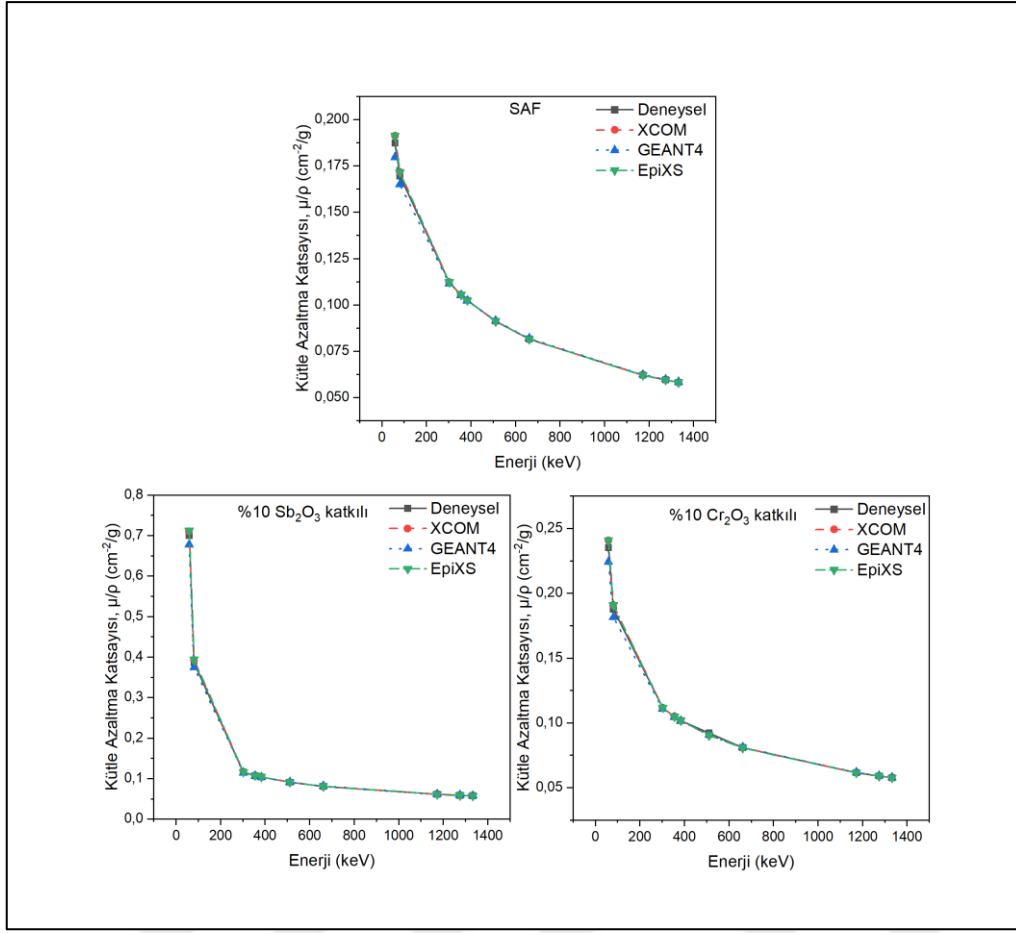
Enerji (keV)	Saf PLA			Sb ₂ O ₃ -1 dip			Sb ₂ O ₃ -10 dip			Sb ₂ O ₃ -20 dip		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	0,5265	0,6259	0,6268	0,5474	0,6441	0,6448	0,6313	0,7343	0,7349	0,6383	0,7405	0,5630
30	0,2687	0,3159	0,3162	0,2692	0,3152	0,3148	0,2962	0,3449	0,3435	0,2964	0,3448	0,2914
40	0,2117	0,2380	0,2381	0,2489	0,2749	0,2751	0,3290	0,3571	0,3573	0,3416	0,3695	0,2229
50	0,1905	0,2070	0,2071	0,2061	0,2225	0,2227	0,2496	0,2675	0,2678	0,2549	0,2728	0,1953
59,5	0,1796	0,1912	0,1912	0,1854	0,1970	0,1970	0,2122	0,2249	0,2251	0,2142	0,2269	0,1810
80,9	0,1650	0,1717	0,1716	0,1619	0,1685	0,1685	0,1730	0,1803	0,1803	0,1720	0,1793	0,1632
302,9	0,1113	0,1122	0,1122	0,1045	0,1053	0,1053	0,1045	0,1054	0,1054	0,1023	0,1031	0,1070
356	0,1051	0,1055	0,1054	0,0986	0,0990	0,0989	0,0985	0,0990	0,0989	0,0964	0,0968	0,1005
383,9	0,1021	0,1025	0,1024	0,0958	0,0961	0,0961	0,0957	0,0961	0,0960	0,0936	0,0940	0,0977
511	0,0913	0,0911	0,0911	0,0856	0,0855	0,0854	0,0855	0,0854	0,0853	0,0836	0,0835	0,0869
661,7	0,0818	0,0814	0,0813	0,0767	0,0764	0,0763	0,0766	0,0762	0,0762	0,0749	0,0745	0,0776
1173,2	0,0623	0,0620	0,0619	0,0584	0,0581	0,0580	0,0582	0,0580	0,0579	0,0569	0,0567	0,0591
1274,5	0,0596	0,0594	0,0594	0,0559	0,0557	0,0556	0,0558	0,0556	0,0555	0,0546	0,0544	0,0566
1332,5	0,0583	0,0581	0,0580	0,0546	0,0544	0,0544	0,0545	0,0543	0,0542	0,0533	0,0531	0,0553

Tablo 4.12 Saf PLA ve %10 Cr₂O₃ veya Sb₂O₃ katkılı numunelerin kütle azaltma katsayısı

Enerji (keV)	Saf PLA			%10 Cr ₂ O ₃ katkılı			%10 Sb ₂ O ₃ katkılı		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	0,5265	0,6259	0,6268	1,7249	1,8610	1,8641	2,0924	2,3040	2,2987
30	0,2687	0,3159	0,3162	0,6319	0,6982	0,6993	0,7733	0,8721	0,8528
40	0,2117	0,2380	0,2381	0,3645	0,4014	0,4021	1,6934	1,7590	1,7593
50	0,1905	0,2070	0,2071	0,2675	0,2908	0,2911	0,9971	1,0420	1,0436
59,5	0,1796	0,1912	0,1912	0,2242	0,2406	0,2407	0,6776	0,7107	0,7125
80,9	0,1650	0,1717	0,1716	0,1813	0,1907	0,1907	0,3741	0,3927	0,3932
302,9	0,1113	0,1122	0,1122	0,1106	0,1117	0,1116	0,1143	0,1162	0,1161
356	0,1051	0,1055	0,1054	0,1042	0,1049	0,1047	0,1064	0,1076	0,1074
383,9	0,1021	0,1025	0,1024	0,1013	0,1018	0,1017	0,1030	0,1039	0,1038
511	0,0913	0,0911	0,0911	0,0905	0,0904	0,0904	0,0910	0,0912	0,0911
661,7	0,0818	0,0814	0,0813	0,0811	0,0807	0,0807	0,0811	0,0809	0,0809
1173,2	0,0623	0,0620	0,0619	0,0617	0,0615	0,0613	0,0614	0,0612	0,0611
1274,5	0,0596	0,0594	0,0594	0,0591	0,0589	0,0588	0,0589	0,0587	0,0586
1332,5	0,0583	0,0581	0,0580	0,0577	0,0576	0,0575	0,0575	0,0573	0,0572

Tablo 4.13 Numunelerin deneysel olarak kütle azaltma katsayıları

Numunelerin Kütle Azaltma Katsayısının Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması (cm ² /g)									
Enerji (keV)	Saf PLA	%10 Cr ₂ O ₃ katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ katkılı	Cr ₂ O ₃ 1 Dip	Cr ₂ O ₃ 10 Dip	Cr ₂ O ₃ 20 Dip	Sb ₂ O ₃ 1 Dip	Sb ₂ O ₃ 10 Dip	Sb ₂ O ₃ 20 Dip
59,5	0,1796	0,2164	0,4220	0,1980	0,2034	0,1981	0,2435	0,2693	0,2833
80,9	0,1650	0,1889	0,2809	0,1809	0,1842	0,1785	0,1862	0,1968	0,2007
302,9	0,1113	0,1216	0,1292	0,1200	0,1213	0,1172	0,1048	0,1046	0,1023
356	0,1051	0,1147	0,1213	0,1132	0,1145	0,1105	0,0987	0,0984	0,0962
383,9	0,1021	0,1115	0,1177	0,1101	0,1113	0,1075	0,0958	0,0956	0,0934
511	0,0913	0,1016	0,1048	0,0984	0,0995	0,0961	0,0855	0,0852	0,0833
661,7	0,0818	0,0893	0,0937	0,0882	0,0892	0,0861	0,0766	0,0763	0,0745
1173,2	0,0623	0,0680	0,0712	0,0671	0,0678	0,0655	0,0582	0,0580	0,0566
1274,5	0,0597	0,0651	0,0682	0,0643	0,0650	0,0628	0,0558	0,0556	0,0542
1332,5	0,0583	0,0636	0,0666	0,0628	0,0635	0,0613	0,0545	0,0543	0,0530



Şekil 4.4 Saf PLA, %10 Sb₂O₃ katkılı, %10 Cr₂O₃ katkılı numunelerin kütle azaltma katsayısı grafikleri

Şekil 4.4'te üretilen Saf PLA, %10 Sb₂O₃ katkılı, %10 Cr₂O₃ katkılı numunelerin kütle azaltma katsayılarına ait grafikler yer almaktadır. Bu grafikte, deneysel, teorik (XCOM, EpiXS) ve simülasyon (GEANT4) sonuçları yer almaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi, numunelerin MAC değerleri özellikle düşük enerji seviyelerinde daha yüksek sonuçlar göstermektedir. Zırhlama performansı açısından MAC değerlerine bakıldığında, en iyi sonuç %10 Sb₂O₃ katkılı numune ile elde edilmiştir.

4.2.3 Yarı kalınlık değerine ait bulgular

Yarı kalınlık değeri (YKD), numune üzerine gelen radyasyon yoğunluğunun yarıya düşmesi için gerekli olan kalınlık olarak tanımlanır. YKD değeri ne kadar küçükse, numunenin gama radyasyonu zırhlama kabiliyeti o kadar iyi olur. PLA numunelerine ait YKD değerleri, Tablo 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablolar incelendiğinde, gama enerjisi arttıkça YKD değerinin de arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 4.14 Saf PLA ve Cr Boyalı numunesinin yarı kalınlık değeri (cm)

Enerji (keV)	Saf PLA			Cr ₂ O ₃ -1 dip			Cr ₂ O ₃ -10 dip			Cr ₂ O ₃ -20 dip		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	1,0790	0,9077	0,9063	1,0701	0,9023	0,9009	1,0429	0,8814	0,8801	1,0024	0,8514	0,8501
30	2,1143	1,7985	1,7966	2,1062	1,7924	1,7905	2,0729	1,7671	1,7652	2,0236	1,7293	1,7274
40	2,6831	2,3871	2,3852	2,6784	2,3833	2,3813	2,6565	2,3648	2,3628	2,6220	2,3355	2,3335
50	2,9818	2,7447	2,7428	2,9797	2,7428	2,7409	2,9669	2,7310	2,7291	2,9450	2,7108	2,7089
59,5	3,1622	2,9715	2,9711	3,1616	2,9709	2,9705	3,1542	2,9635	2,9631	3,1397	2,9493	2,9489
80,9	3,4418	3,3089	3,3095	3,4430	3,3099	3,3105	3,4412	3,3077	3,3083	3,4348	3,3009	3,3014
302,9	5,1010	5,0637	5,0631	5,1045	5,0671	5,0665	5,1086	5,0711	5,0705	5,1090	5,0712	5,0706
356	5,4058	5,3853	5,3896	5,4096	5,3889	5,3933	5,4139	5,3932	5,3976	5,4144	5,3936	5,3979
383,9	5,5597	5,5429	5,5460	5,5636	5,5467	5,5498	5,5681	5,5512	5,5543	5,5686	5,5516	5,5547
511	6,2185	6,2318	6,2362	6,2228	6,2360	6,2405	6,2280	6,2411	6,2456	6,2286	6,2417	6,2461
661,7	6,9388	6,9737	6,9801	6,9436	6,9785	6,9849	6,9494	6,9843	6,9907	6,9501	6,9850	6,9913
1173,2	9,1187	9,1563	9,1719	9,1250	9,1627	9,1783	9,1327	9,1703	9,1859	9,1337	9,1713	9,1869
1274,5	9,5176	9,5536	9,5647	9,5242	9,5602	9,5713	9,5322	9,5681	9,5793	9,5331	9,5691	9,5802
1332,5	9,7418	9,7755	9,7923	9,7485	9,7822	9,7991	9,7567	9,7904	9,8072	9,7577	9,7914	9,8082

Tablo 4.15 Saf PLA ve Sb Boyalı numunesinin yarı kalınlık değeri (cm)

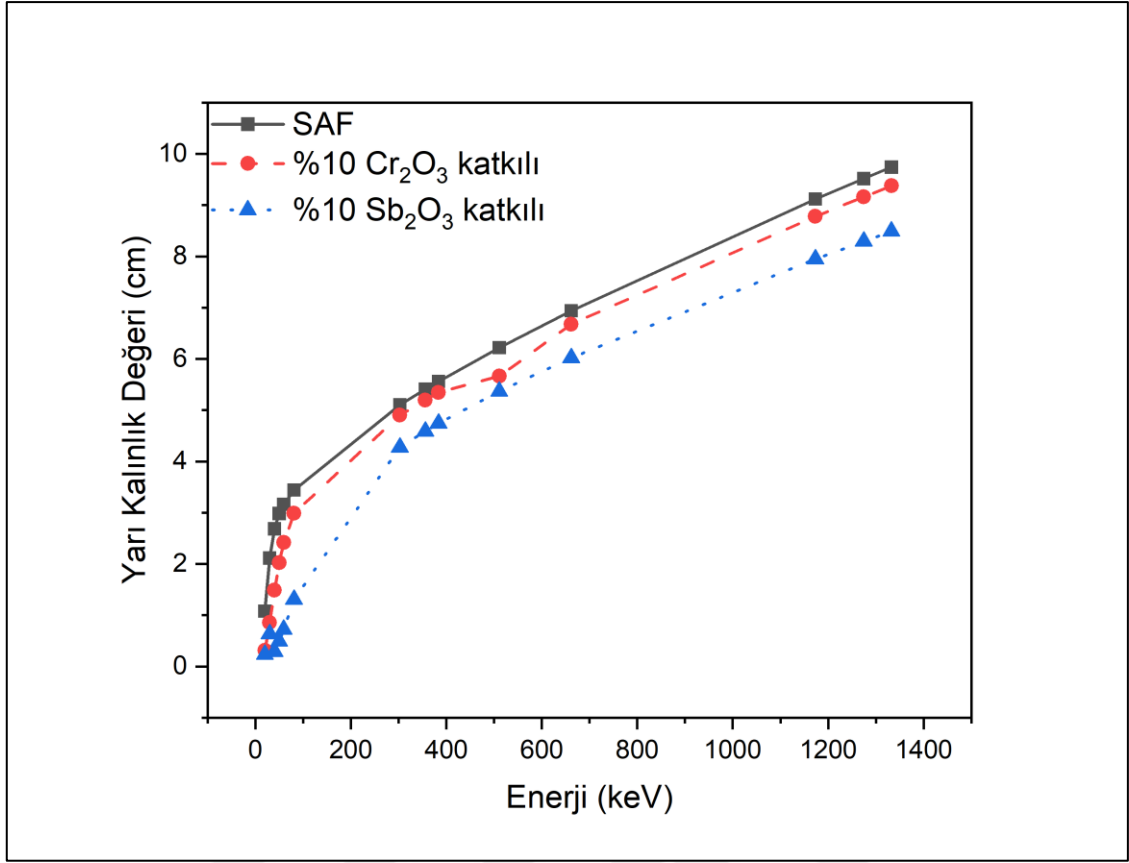
Enerji (keV)	Saf PLA			Sb ₂ O ₃ -1 dip			Sb ₂ O ₃ -10 dip			Sb ₂ O ₃ -20 dip		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	1,0790	0,9077	0,9063	0,9720	0,8260	0,8251	0,8400	0,7224	0,7221	0,8118	0,6998	0,9204
30	2,1143	1,7985	1,7966	1,9765	1,6880	1,6899	1,7910	1,5379	1,5442	1,7482	1,5030	1,7781
40	2,6831	2,3871	2,3852	2,1371	1,9353	1,9340	1,6122	1,4855	1,4847	1,5170	1,4022	2,3249
50	2,9818	2,7447	2,7428	2,5812	2,3908	2,3890	2,1252	1,9828	1,9809	2,0329	1,8994	2,6529
59,5	3,1622	2,9715	2,9711	2,8691	2,7010	2,6998	2,4998	2,3587	2,3568	2,4194	2,2839	2,8623
80,9	3,4418	3,3089	3,3095	3,2857	3,1566	3,1568	3,0655	2,9421	2,9416	3,0123	2,8904	3,1754
302,9	5,1010	5,0637	5,0631	5,0882	5,0495	5,0488	5,0725	5,0314	5,0308	5,0649	5,0231	4,8403
356	5,4058	5,3853	5,3896	5,3914	5,3732	5,3775	5,3826	5,3588	5,3631	5,3756	5,3512	5,1521
383,9	5,5597	5,5429	5,5460	5,5495	5,5316	5,5347	5,5383	5,5186	5,5216	5,5316	5,5113	5,3015
511	6,2185	6,2318	6,2362	6,2097	6,2220	6,2265	6,2013	6,2123	6,2167	6,1947	6,2053	5,9609
661,7	6,9388	6,9737	6,9801	6,9302	6,9645	6,9709	6,9229	6,9562	6,9626	6,9161	6,9491	6,6717
1173,2	9,1187	9,1563	9,1719	9,1090	9,1463	9,1619	9,1018	9,1387	9,1543	9,0935	9,1302	8,7664
1274,5	9,5176	9,5536	9,5647	9,5075	9,5432	9,5543	9,5000	9,5353	9,5465	9,4914	9,5265	9,1419
1332,5	9,7418	9,7755	9,7923	9,7314	9,7648	9,7817	9,7239	9,7569	9,7737	9,7150	9,7479	9,3596

Tablo 4.16 Saf PLA ve Cr/Sb %10 Katkılı numunelerinin yarı kalınlık değeri (cm)

Enerji (keV)	Saf PLA			%10 Cr ₂ O ₃ katkılı			%10 Sb ₂ O ₃ katkılı		
	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS	GEANT4	WinXCOM	EpiXS
20	1,0790	0,9077	0,9063	0,3142	0,2912	0,2907	0,2335	0,2120	0,2125
30	2,1143	1,7985	1,7966	0,8576	0,7762	0,7749	0,6318	0,5602	0,5729
40	2,6831	2,3871	2,3852	1,4868	1,3502	1,3478	0,2885	0,2777	0,2777
50	2,9818	2,7447	2,7428	2,0260	1,8638	1,8616	0,4900	0,4689	0,4681
59,5	3,1622	2,9715	2,9711	2,4170	2,2526	2,2508	0,7211	0,6875	0,6857
80,9	3,4418	3,3089	3,3095	2,9886	2,8421	2,8413	1,3059	1,2442	1,2424
302,9	5,1010	5,0637	5,0631	4,9004	4,8522	4,8534	4,2727	4,2050	4,2063
356	5,4058	5,3853	5,3896	5,1979	5,1667	5,1732	4,5902	4,5411	4,5461
383,9	5,5597	5,5429	5,5460	5,3472	5,3240	5,3258	4,7430	4,7029	4,7035
511	6,2180	6,2318	6,2362	5,9842	5,9915	5,9954	5,3659	5,3566	5,3605
661,7	6,9388	6,9737	6,9801	6,6789	6,7086	6,7145	6,0187	6,0339	6,0399
1173,2	9,1187	9,1563	9,1719	8,7784	8,8128	8,8277	7,9465	7,9724	7,9861
1274,5	9,5176	9,5536	9,5647	9,1619	9,1956	9,2056	8,2952	8,3199	8,3302
1332,5	9,7418	9,7755	9,7923	9,3775	9,4079	9,4245	8,4905	8,5142	8,5289

Tablo 4.17 Numunelerin yarı kalınlık değerlerinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması (cm)

Enerji (keV)	Saf PLA	%10 Cr₂O₃ Katkılı	%10 Sb₂O₃ Katkılı	Cr₂O₃ 1 dip	Cr₂O₃ 10 dip	Cr₂O₃ 20 dip	Sb₂O₃ 1 dip	Sb₂O₃ 10 dip	Sb₂O₃ 20 dip
59,5	3,1621	2,8285	1,4679	3,0917	3,0442	3,0197	2,1851	1,9698	1,8293
80,9	3,4418	3,2411	2,2050	3,3841	3,3626	3,3514	2,8572	2,6953	2,5813
302,9	5,1011	5,0330	4,7925	5,1019	5,1030	5,1034	5,0776	5,0694	5,0631
356	5,4021	5,3351	5,1049	5,4067	5,4084	5,4093	5,3895	5,3886	5,3849
383,9	5,5598	5,4876	5,2594	5,5607	5,5625	5,5634	5,5509	5,5478	5,5451
511	6,2188	6,0226	5,9076	6,2199	6,2221	6,2232	6,2199	6,2204	6,2210
661,7	6,9391	6,8513	6,6045	6,9404	6,9425	6,9439	6,9460	6,9488	6,9509
1173,2	9,1191	9,0042	8,6947	9,1203	9,1239	9,1263	9,1359	9,1408	9,1456
1274,5	9,5173	9,3973	9,0749	9,5199	9,5238	9,5251	9,5238	9,5409	9,5461
1332,5	9,7420	9,6190	9,2890	9,7447	9,7475	9,7489	9,7598	9,7667	9,7708



Şekil 4.5 Saf PLA, %10 Sb₂O₃ katkı ve %10 Cr₂O₃ katkı numunelerinin yarı kalınlık değeri grafiği

Şekil 4.5'te Saf PLA, %10 Sb₂O₃ katkı ve %10 Cr₂O₃ katkı numunelerinin yarı kalınlık değerine ait grafikler yer almaktadır. Grafikten de anlaşılacağı üzere numunelerin YKD değerleri özellikle düşük enerjilerde daha iyi sonuç vermektedir. Zırhlama performansı olarak YKD değerleri ile kıyaslama yapılacak olursa en iyi sonucu %10 Sb₂O₃ katkı numune vermiştir.

4.2.3 Etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu parametrelerine ait bulgular

Bir malzemenin etkin atom numarası (Z_{etk}), radyasyonla etkileşimini belirleyen bir faktördür. Düşük etkin atom numarası malzemenin radyasyon şiddetini daha az azalttığını gösterirken, yüksek etkin atom numarası radyasyon şiddetinin daha fazla azalttığını gösterir. 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

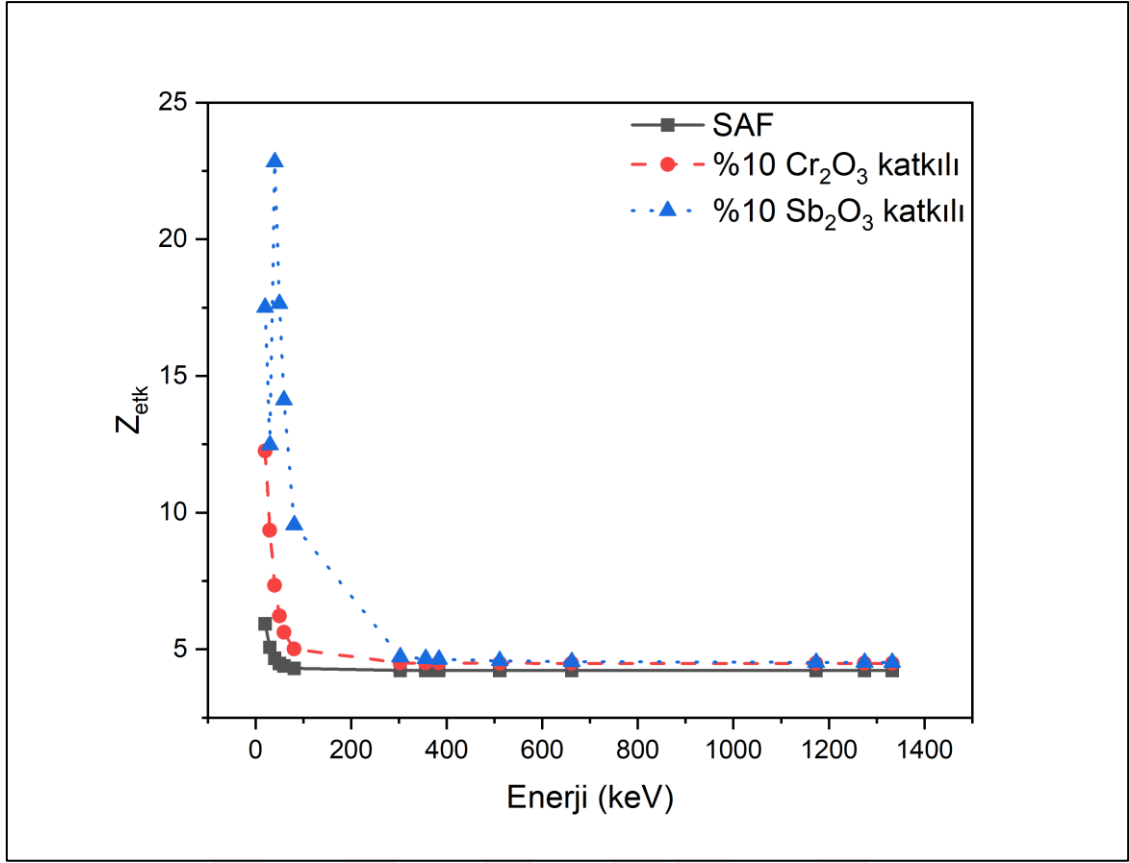
istenmeyen etkilerini azaltmak mümkündür. Z_{etk} incelemesine ait bulgular Tablo 4.18’de verilmekte ve ayrıca ilgili grafikler Şekil 4.6’da yer almaktadır.

Etkin elektron yoğunluğu (N_e), malzemenin her birim kütlesi başına denk gelen elektron sayısı olarak ifade eder.

Bir malzemenin elektron yoğunluğu ne kadar yüksekse, gelen radyasyonla etkileşime girme ve onu azaltma olasılığı da o denli yüksek olacaktır. Etkin elektron yoğunluğuna ait bulgular Tablo 4.19’da verilmekte ve ayrıca ilgili grafik Şekil 4.7’de görülebilir.

Tablo 4.18 Z_{etk} değerine ait teorik sonuçlar

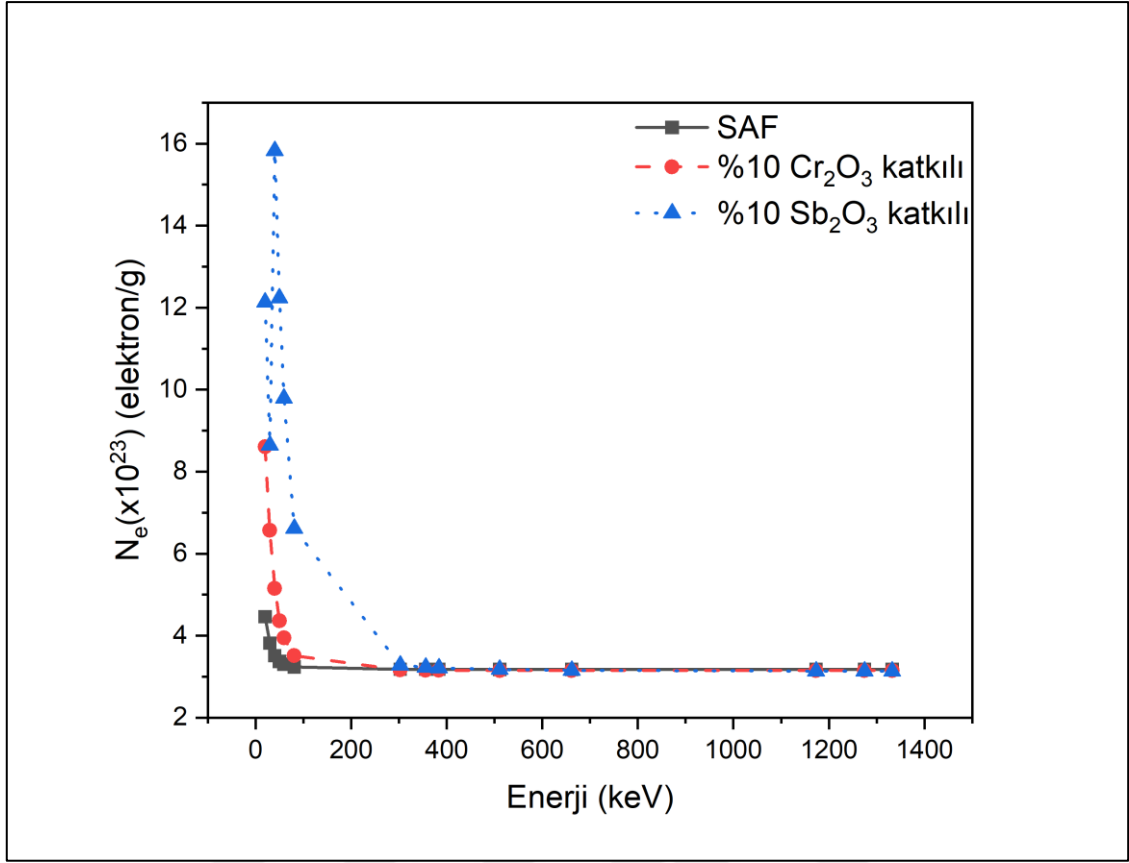
Energy (keV)	%10 Cr_2O_3 katkılı	%10 Sb_2O_3 katkılı	Saf PLA
20	12,2591	17,5039	5,9324
30	9,3575	12,4763	5,0727
40	7,3462	22,8356	4,6682
50	6,2205	17,6548	4,4827
59,5	5,6228	14,1258	4,3925
80,9	5,0056	9,5510	4,3036
302,9	4,5057	4,7274	4,2281
356	4,4995	4,6612	4,2267
383,9	4,4973	4,6378	4,2262
511	4,4919	4,5801	4,2250
661,7	4,4890	4,5516	4,2243
1173,2	4,4863	4,5252	4,2236
1274,5	4,4867	4,5244	4,2239
1332,5	4,4871	4,5245	4,2242



Şekil 4.6 Z_{eff} değerine ait grafik

Tablo 4.19 Etkin elektron yoğunluğuna ait teorik sonuçlar ($\times 10^{23}$) (elektron/g)

Energy (keV)	%10 Cr_2O_3 katkılı	%10 Sb_2O_3 katkılı	Saf PLA
20	8,6027	12,1323	4,4618
30	6,5665	8,6475	3,8153
40	5,1551	15,8278	3,5110
50	4,3652	12,2369	3,3715
59,5	3,9457	9,7908	3,3036
80,9	3,5126	6,6200	3,2368
302,9	3,1618	3,2767	3,1800
356	3,1575	3,2308	3,1790
383,9	3,1559	3,2145	3,1786
511	3,1521	3,1745	3,1777
661,7	3,1501	3,1548	3,1771
1173,2	3,1482	3,1365	3,1766
1274,5	3,1485	3,1360	3,1768
1332,5	3,1487	3,1360	3,1770



Şekil 4.7 Etkin elektron yoğunluğu sonucuna ait grafik

4.2.4 Yığılma faktörlerine ait bulgular

4.2.4.1 Enerji soğurma yığılma faktörlerine ait bulgular

Enerji soğurma yığılma faktörü, maruz kalma yığılma faktörüne benzerdir ancak zırh malzemesi tarafından soğurulan enerji miktarına odaklanır. Bu faktör, radyasyonun malzemeler ve biyolojik dokular üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulduğunda özellikle önemlidir, çünkü radyasyonun malzeme içinde biriktirdiği enerjiyi hesaba katar. Enerji soğurma yığılma faktörü, radyasyon içinden geçerken malzeme tarafından ne kadar enerjinin soğurulduğunu dikkate alır. Bu faktör ayrıca gelen radyasyonun enerjisinden ve zırh malzemesinin özelliklerinden etkilenir.

Birikim faktörü, radyasyondan korunma prensibi kapsamında geliştirilen radyasyon zırhı malzemeler için önemli bir parametredir. 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 tabanlı kompozitlerin teorik yığılma faktörü bulguları enerji soğurma (EABF) ve maruziyet (EBF) değerleri durumlarında 1 MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP mesafeleri için Tablo 4.20 ile 4.27 arasında yer almaktadır.

Tablo 4.20 Enerji soğurma yığılma faktörü (1-MFP) sonuçları

Enerji (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,0816	1,0428	1,2586
20	1,1753	1,0889	1,6021
30	1,5107	1,2613	2,8234
40	1,9714	1,1036	4,0948
50	2,6204	1,1791	4,9620
60	3,2071	1,2673	5,1697
80	4,1454	1,4807	4,9087
100	4,4717	1,7652	4,6328
150	4,0606	2,5511	3,7311
200	3,6271	2,9404	3,3507
300	3,0391	3,0368	2,8380
400	2,7368	2,8209	2,6206
500	2,5458	2,6240	2,4616
600	2,4100	2,4847	2,3653
800	2,2335	2,2754	2,2017
1000	2,1138	2,1297	2,1066
1500	1,9419	1,9360	1,9373
2000	1,8369	1,8347	1,8402
3000	1,7087	1,7065	1,7126
4000	1,6260	1,6160	1,6270
5000	1,5631	1,5470	1,5650
6000	1,4987	1,4899	1,5110
8000	1,4236	1,3983	1,4300
10000	1,3613	1,3390	1,3733
15000	1,2678	1,2416	1,2793

Tablo 4.20’de 1 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Enerjiye bağlı değişim gözlemlenerek, en büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.21 Enerji soğurma yığılma faktörü (5-MFP) sonuçları

Energy (keV)	%10 Cr ₂ O ₃ katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ katkılı	Saf PLA
15	1,1772	1,0920	1,6355
20	1,3945	1,1949	2,7767
30	2,3008	1,5923	9,0853
40	4,1530	1,2092	24,0615
50	7,2776	1,3679	43,4045
60	11,6613	1,5856	58,5580
80	21,9009	2,1958	70,1100
100	30,0632	3,0895	68,0761
150	34,4064	6,0172	52,9528
200	31,3239	9,1694	41,8273
300	24,2492	12,3030	28,6684
400	19,5440	12,6323	22,0081
500	16,4592	12,0409	17,9688
600	14,2649	11,2496	15,3015
800	11,4436	9,7897	11,9775
1000	9,6777	8,7213	10,0080
1500	7,3932	7,1256	7,4305
2000	6,1242	6,0834	6,1389
3000	4,7975	4,7865	4,8049
4000	4,0844	4,0594	4,0945
5000	3,6257	3,5916	3,6423
6000	3,2918	3,2550	3,3133
8000	2,8468	2,7919	2,8694
10000	2,5548	2,4944	2,5867
15000	2,1186	2,0547	2,1547

Tablo 4.21’de 5 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Enerjiye bağlı değişim gözlemlenmiş olup en büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.22 Enerji soğurma yığılma faktörü (10-MFP) sonuçları

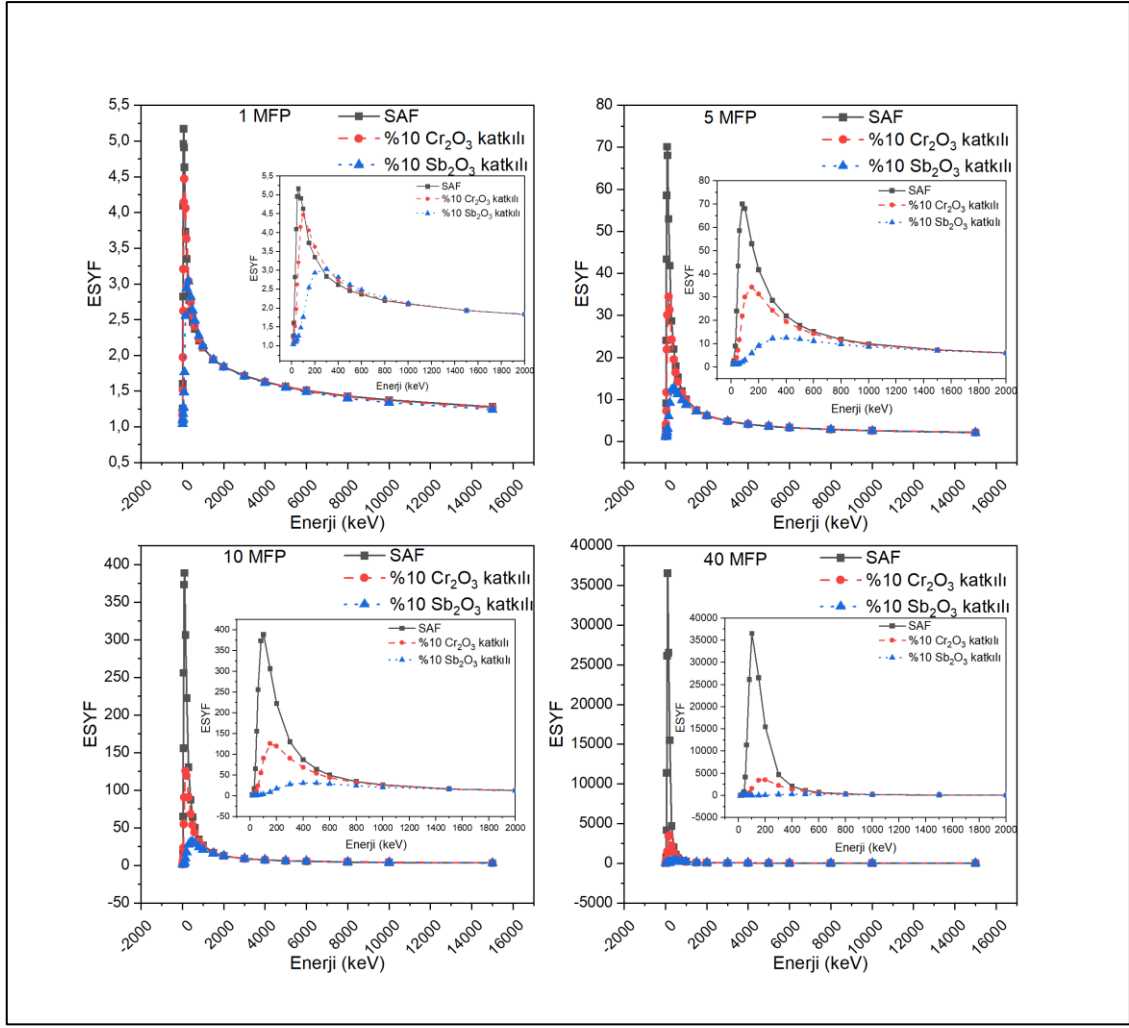
Energy (keV)	%10 Cr ₂ O ₃ katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ katkılı	Saf PLA
15	1,2269	1,1178	1,8577
20	1,5178	1,2489	3,6691
30	2,8330	1,7861	16,7962
40	6,0001	1,2646	64,9280
50	12,4680	1,4720	155,8740
60	23,3052	1,7689	255,9460
80	54,8631	2,6535	373,2070
100	90,1018	4,0662	388,7100
150	125,4830	9,4212	306,3220
200	119,3420	17,1560	222,2910
300	90,1432	27,5117	130,4450
400	68,0416	31,0791	87,1421
500	53,5426	30,6095	64,1576
600	43,8458	28,6581	50,0141
800	31,8421	24,4608	34,5880
1000	24,9396	20,8980	26,3384
1500	16,7482	15,9045	16,8631
2000	12,7262	12,7044	12,7628
3000	8,9762	9,0260	8,9702
4000	7,1748	7,2109	7,1678
5000	6,1049	6,1176	6,1059
6000	5,4006	5,3890	5,4133
8000	4,4677	4,4485	4,4837
10000	3,8921	3,8551	3,9114
15000	3,0596	3,0170	3,0951

Tablo 4.22’de 10 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.23 Enerji soğurma yığılma faktörü (40-MFP) sonuçları

Energy (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,3516	1,1756	2,4940
20	1,8507	1,3803	7,2835
30	4,7231	2,3425	81,4397
40	14,6040	1,4067	803,9970
50	50,5426	1,7479	4163,8100
60	142,3350	2,2769	11386,3000
80	560,8170	4,1102	26146,3000
100	1516,1700	7,6896	36546,5000
150	3409,0700	27,8703	26520,5000
200	3525,2500	85,3818	15494,7000
300	2259,6600	198,2750	4678,4200
400	1326,5800	286,8910	2060,3600
500	827,2020	297,1980	1121,8600
600	575,8850	270,9860	693,6060
800	315,6720	205,2830	350,2240
1000	202,2850	161,3870	217,3050
1500	99,8737	95,6214	99,6029
2000	63,3819	66,1088	63,7490
3000	36,6912	38,6859	36,3729
4000	26,3137	27,8980	25,7610
5000	21,0517	22,4675	20,5646
6000	17,2249	17,9493	17,4651
8000	14,1820	15,2705	13,8243
10000	11,6349	12,5299	11,1770
15000	8,3101	9,2916	8,0434

Tablo 4.23'te 40 MFP için enerji soğurma yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik yığılma faktörü (enerji soğurma) karşılaştırmaları grafiği

Yukarıda nümerik değerleri verilen tablolarda teorik enerji soğurma yığılma faktörü sonuçları Şekil 4.8’de 1 MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP’de görselleştirilerek verilmiştir. Daha detaylı gösterim yapabilmek için yakınlaştırmalar yapılmıştır. Açık bir şekilde görülmektedir ki Saf PLA numunesi en yüksek değere sahiptir.

4.2.4.2 Maruziyet yığılma faktörü sonuçları

"Maruziyet yığılma faktörü" radyasyon zırlama alanında kullanılan bir terimdir. Bu faktör, radyasyonun bir malzemeye veya maddeye nüfuz etme, içeride etkileşime girme ve bu etkileşim sırasında enerji kaybetme sürecini temsil eder.

Tablo 4.24 Maruziyet yığılma faktörü (1-MFP) sonuçları

Enerji (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,0820	1,0432	1,2552
20	1,1748	1,0870	1,5852
30	1,4827	1,2567	2,7189
40	1,9003	1,1049	4,0795
50	2,4812	1,1688	5,2009
60	2,8769	1,2352	5,6663
80	3,2788	1,3712	5,5426
100	3,3452	1,4906	5,2619
150	3,1441	1,7230	4,0023
200	2,9259	1,8697	3,4214
300	2,6300	1,9761	2,9746
400	2,4577	1,9857	2,7094
500	2,3304	1,9589	2,5458
600	2,2345	1,9365	2,4149
800	2,1068	1,8930	2,2456
1000	2,0116	1,8352	2,1273
1500	1,9324	1,7957	1,9952
2000	1,8477	1,7826	1,8842
3000	1,7152	1,6878	1,7405
4000	1,6284	1,6112	1,6456
5000	1,5588	1,5421	1,5706
6000	1,5128	1,4984	1,5223
8000	1,4209	1,4109	1,4343
10000	1,3600	1,3521	1,3690
15000	1,2690	1,2639	1,2743

Tablo 4.24'te 1 MFP için maruziyet yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.25 Maruziyet yığılma faktörü (5-MFP) sonuçları

Enerji (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,1742	1,0916	1,6238
20	1,3897	1,1943	2,7396
30	2,2576	1,5850	8,6271
40	4,0264	1,2095	24,0743
50	6,7573	1,3569	46,4368
60	9,9755	1,5329	66,6257
80	15,6539	1,9564	85,1479
100	19,4154	2,4582	84,2164
150	21,7144	3,7760	64,7308
200	20,6360	5,1366	49,4955
300	17,6064	6,7302	32,9511
400	15,1741	7,4345	24,7245
500	13,3278	7,5973	19,8326
600	11,9232	7,5086	16,6207
800	9,9787	7,1207	12,7855
1000	8,6752	6,6690	10,5398
1500	7,3464	6,1491	7,9519
2000	6,1845	5,7336	6,4872
3000	4,8428	4,7028	4,9753
4000	4,1152	4,0559	4,1853
5000	3,6253	3,5904	3,6641
6000	3,3127	3,2905	3,3449
8000	2,8536	2,8427	2,8751
10000	2,5550	2,5413	2,5672
15000	2,1223	2,1063	2,1371

Tablo 4.25'te 5 MFP için maruziyet yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.26 Maruziyet yığılma faktörü (10-MFP) sonuçları

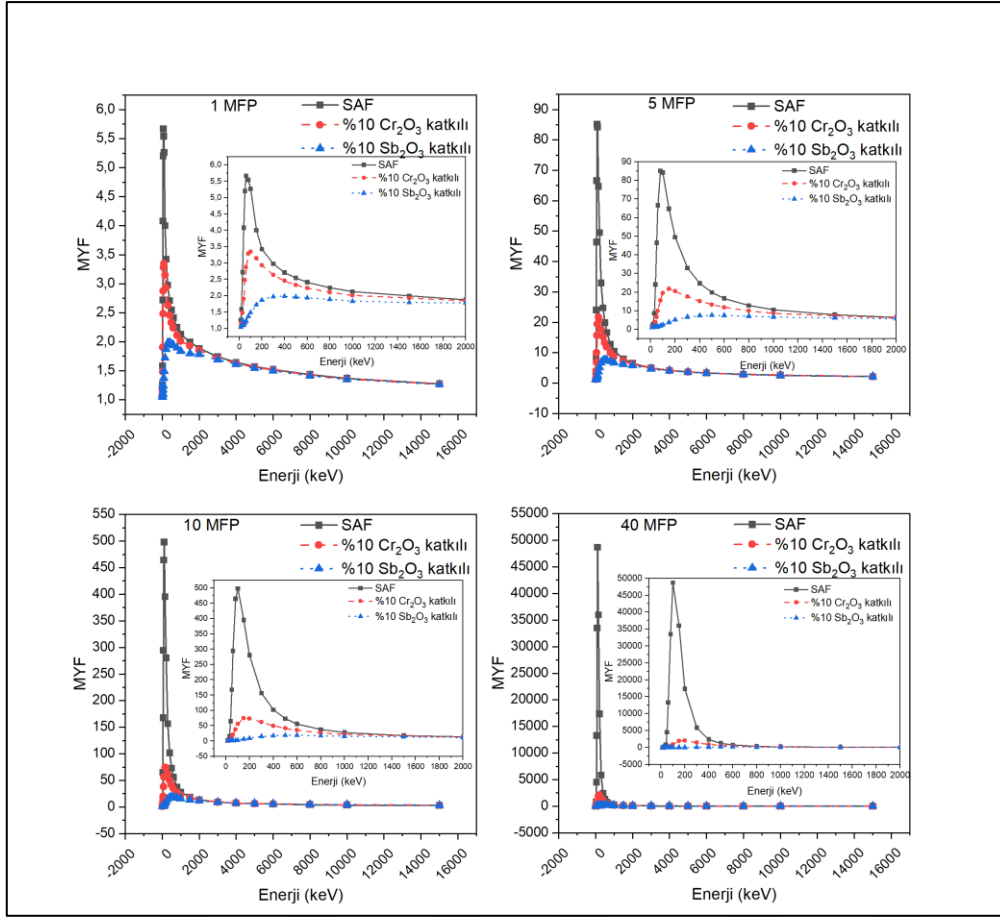
Enerji (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,2236	1,1175	1,8447
20	1,5120	1,2494	3,6172
30	2,7880	1,7755	15,9466
40	5,8391	1,2648	64,9874
50	11,5386	1,4617	167,7590
60	19,7979	1,7088	294,4180
80	38,3534	2,3523	464,5090
100	55,9957	3,2160	497,9540
150	74,1231	5,8918	395,2190
200	73,2937	9,4684	280,4420
300	61,3002	14,6385	156,4560
400	49,8947	17,6667	101,7040
500	41,3632	18,6212	72,9241
600	35,2575	18,5080	55,9065
800	26,9807	17,1985	37,6392
1000	21,9159	15,5386	28,1958
1500	16,6498	13,4701	18,2573
2000	12,8664	11,8831	13,6073
3000	9,0841	8,8537	9,3262
4000	7,2371	7,2086	7,3403
5000	6,1132	6,1304	6,1502
6000	5,4178	5,4791	5,4457
8000	4,4854	4,5413	4,4751
10000	3,8953	3,9410	3,8797
15000	3,0633	3,0913	3,0649

Tablo 4.26’da 10 MFP için maruziyet yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.

Tablo 4.27 Maruziyet yığılma faktörü (40-MFP) sonuçları

Enerji (keV)	%10 Cr₂O₃ katkılı	%10 Sb₂O₃ katkılı	Saf PLA
15	1,3504	1,1766	2,4848
20	1,8475	1,3812	7,1525
30	4,7021	2,3291	76,9908
40	14,0293	1,4044	800,9820
50	49,3926	1,7401	4513,4200
60	123,2980	2,2046	13308,1000
80	389,1510	3,6778	33507,1000
100	923,3250	6,0900	48684,9000
150	1948,2700	17,3526	35996,8000
200	2064,7800	43,1284	17356,4000
300	1454,8800	99,8526	5859,1000
400	935,3960	153,8970	2445,4800
500	618,7740	171,0930	1302,8200
600	453,1750	166,3150	780,8130
800	262,5020	139,5580	384,1370
1000	176,0920	118,7010	230,7150
1500	99,4654	80,2615	107,5490
2000	64,2725	61,7772	68,2646
3000	37,2767	37,9220	37,7795
4000	26,4647	27,9362	26,3494
5000	20,9903	21,5115	20,5061
6000	17,5957	19,3279	17,6376
8000	14,2746	15,2635	12,5534
10000	11,5807	13,0101	11,2455
15000	8,3105	9,6164	7,9749

Tablo 4.27’de 40 MFP için maruziyet yığılma faktörü verilmektedir. Her bir numune için ayrı bir sütunda farklı gama radyasyonu enerjisinde değerler sunulmuştur. Bu sayede enerjiye bağlı değişim gözlemlenebilmektedir. En büyük değerler Saf PLA için gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9 1, 5, 10 ve 40 Ortalama Serbest Yol mesafeleri için teorik birikim faktörü (maruziyet) karşılaştırmaları grafiği

Yukarıdaki şekilde nümerik değerleri verilen tablolarda teorik maruziyet yığılma faktörü sonuçları Şekil 4.9’da 1 MFP, 5 MFP, 10 MFP ve 40 MFP’de görselleştirilerek verilmiştir. Daha detaylı gösterim yapabilmek için yakınlaştırmalar yapılmıştır. Açık bir şekilde görülmektedir ki Saf PLA numunesi en yüksek değere sahiptir.

4.2.5 Radyasyon koruma verimliliği

Radyasyon koruma verimliliği (RKV) radyasyon maruziyetinin azaltılmasına yönelik bir kavramdır. RKV, malzemelerin radyasyon soğurma niteliklerini değerlendirmede yardımcı olarak radyasyona maruziyetten kaynaklanan potansiyel sağlık risklerinin en aza indirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen numunelerin RKV değerlerinin deneysel, teorik ve simülasyon bulguları eşitlik 2.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.28, Tablo 4.29 ve Tablo 4.30’da yer almaktadır. Sonuç grafikleri ise Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 arasında yer almaktadır.

Tablo 4.28 Numunelerin GEANT4 % olarak radyasyon koruma verimi değerleri

Enerji (keV)	Saf	Cr ₂ O ₃ -1 dip	Cr ₂ O ₃ -10 dip	Cr ₂ O ₃ -20 dip	Sb ₂ O ₃ -1 dip	Sb ₂ O ₃ -10dip	Sb ₂ O ₃ -20 dip	%10 Cr ₂ O ₃ katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ katkılı
20	27,4718	31,4630	34,8825	49,9152	39,3516	46,9849	57,4211	71,5605	81,5822
30	15,1184	17,4863	19,4126	29,0021	21,8013	25,7500	32,7311	36,9125	46,4907
40	12,1173	14,0277	15,5000	23,2300	20,3435	28,1614	36,6768	23,3348	74,5698
50	10,9729	12,7037	13,9977	20,9711	17,1643	22,1912	28,8907	17,7169	55,3477
59,5	10,3806	12,0186	13,2244	19,8094	15,5840	19,2095	24,9107	15,0802	42,1834
80,9	9,5789	11,0931	12,1915	18,2739	13,7512	15,9662	20,5548	12,3832	26,1057
302,9	6,5685	7,6245	8,3853	12,6870	9,1108	9,9788	12,7900	7,7459	8,8321
356	6,2099	7,2104	7,9317	12,0162	8,6212	9,4319	12,0974	7,3192	8,2472
383,9	6,0432	7,0180	7,7207	11,7037	8,3862	9,1792	11,7773	7,1224	7,9923
511	5,4207	6,2985	6,9318	10,5315	7,5291	8,2396	10,5859	6,7384	7,0984
661,7	4,8719	5,6635	6,2352	9,4919	6,7735	7,4134	9,5362	5,7439	6,3535
1173,2	3,7293	4,3395	4,7809	7,3080	5,1963	5,6903	7,3391	4,4009	4,8503
1274,5	3,5758	4,1615	4,5852	7,0128	4,9841	5,4584	7,0426	4,2206	4,6512
1332,5	3,4950	4,0677	4,4821	6,8570	4,8722	5,3362	6,8862	4,1256	4,5467

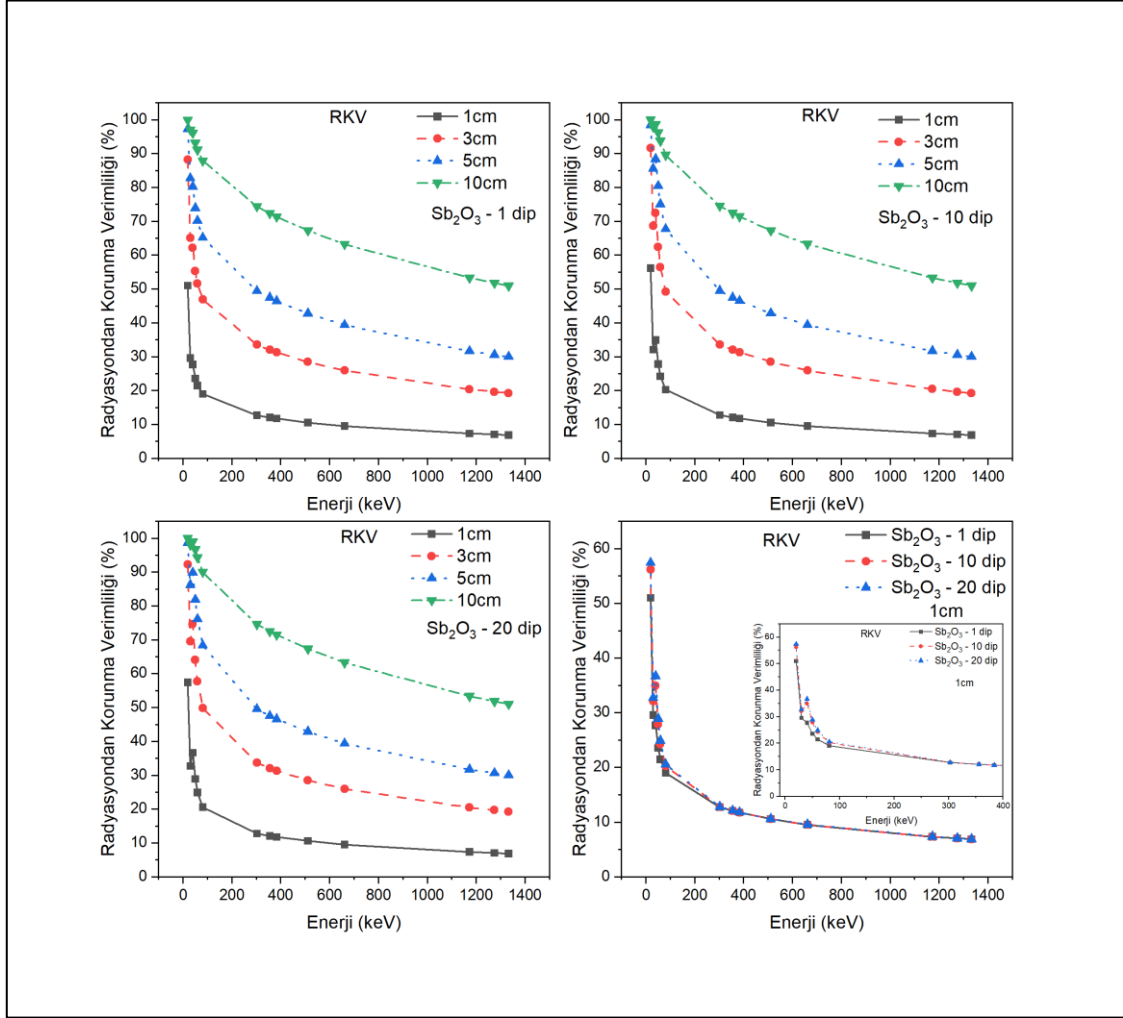
Tablo 4.29 Numunelerin EpiXS % olarak radyasyon koruma verimi değerleri

Enerji (keV)	Saf	Cr ₂ O ₃ -1 dip	Cr ₂ O ₃ -10 dip	Cr ₂ O ₃ -20 dip	Sb ₂ O ₃ -1 dip	Sb ₂ O ₃ -10 dip	Sb ₂ O ₃ -20 dip	%10 Cr ₂ O ₃ katkılı	%10 Sb ₂ O ₃ katkılı
20	31,7768	36,1938	39,8511	45,1666	44,5144	52,2137	48,9077	74,3056	84,4123
30	17,5439	20,2359	22,3882	25,6008	24,9962	29,1999	29,3643	39,9398	49,8199
40	13,5235	15,6336	17,2504	19,6611	22,2235	30,1728	23,3462	25,4068	75,8905
50	11,8696	13,7307	15,1203	17,1863	18,4099	23,6006	20,7847	19,1219	56,9961
59,5	11,0099	12,7404	14,0145	15,9054	16,4760	20,2486	19,4229	16,0985	43,7920
80,9	9,9421	11,5105	12,6491	14,3358	14,2709	16,5793	17,6891	12,9816	27,2396
302,9	6,6160	7,6794	8,4456	9,5837	9,1785	10,0572	11,9889	7,8179	8,9652
356	6,2279	7,2314	7,9548	9,0297	8,6426	9,4645	11,3061	7,3528	8,3238
383,9	6,0577	7,0348	7,7392	8,7864	8,4077	9,2057	11,0056	7,1499	8,0568
511	5,4057	6,2812	6,9129	7,8530	7,5096	8,2200	9,8504	6,3774	7,1053
661,7	4,8438	5,6310	6,1995	7,0462	6,7354	7,3728	8,8489	5,7143	6,3319
1173,2	3,7081	4,3149	4,7538	5,4088	5,1671	5,6587	6,8084	4,3769	4,8268
1274,5	3,5585	4,1414	4,5632	5,1926	4,9602	5,4326	6,5381	4,2010	4,6321
1332,5	3,4773	4,0471	4,4595	5,0750	4,8478	5,3097	6,3910	4,1055	4,5267

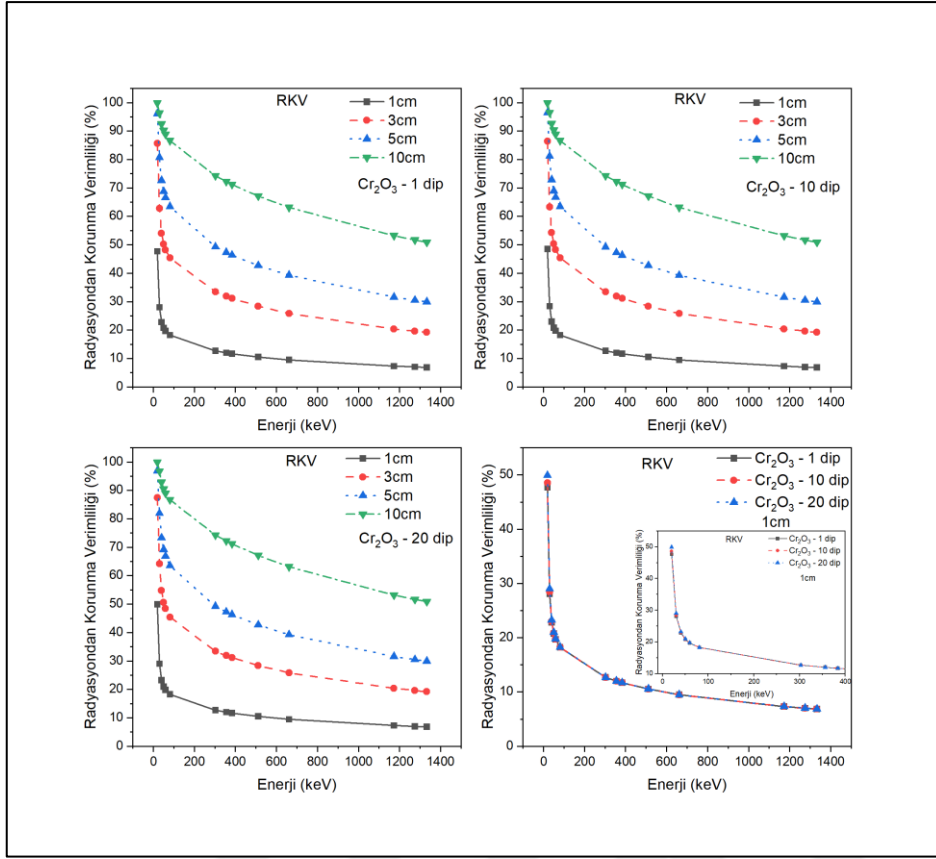
Tablo 4.30 Numunelerin WinXCOM % olarak radyasyon koruma verimi değerleri

Enerji (keV)	Saf	Cr ₂ O ₃ -1 dip	Cr ₂ O ₃ -10 dip	Cr ₂ O ₃ -20 dip	Sb ₂ O ₃ -1 dip	Sb ₂ O ₃ -10 dip	Sb ₂ O ₃ -20 dip	%10 Cr ₂ O ₃ katkı	%10 Sb ₂ O ₃ katkı
20	31,7367	36,1497	39,8043	45,1157	44,4802	52,1967	58,6589	74,2466	84,4785
30	17,5269	20,2166	22,3668	25,5763	25,0198	29,3000	33,7194	39,8881	50,5967
40	13,5133	15,6219	17,2374	19,6458	22,2105	30,1591	35,6494	25,3684	75,8835
50	11,8623	13,7223	15,1109	17,1755	18,3970	23,5808	27,7782	19,1021	56,9380
59,5	11,0087	12,7390	14,0128	15,9034	16,4696	20,2337	23,7112	16,0869	43,7098
80,9	9,9438	11,5125	12,6511	14,3379	14,2714	16,5771	19,2540	12,9783	27,2052
302,9	6,6152	7,6785	8,4447	9,5826	9,1774	10,0560	11,5788	7,8198	8,9677
356	6,2327	7,2370	7,9609	9,0366	8,6492	9,4718	10,9093	7,3617	8,3324
383,9	6,0610	7,0386	7,7434	8,7910	8,4122	9,2105	10,6098	7,1522	8,0578
511	5,4095	6,2850	6,9177	7,8584	7,5148	8,2257	9,4814	6,3815	7,1103
661,7	4,8482	5,6360	6,2050	7,0524	6,7413	7,3793	8,5111	5,7192	6,3380
1173,2	3,7143	4,3221	4,7617	5,4177	5,1757	5,6680	6,5462	4,3841	4,8349
1274,5	3,5626	4,1461	4,5683	5,1984	4,9659	5,4388	6,2826	4,2055	4,6377
1332,5	3,4832	4,0540	4,4670	5,0835	4,8559	5,3187	6,1444	4,1126	4,5343

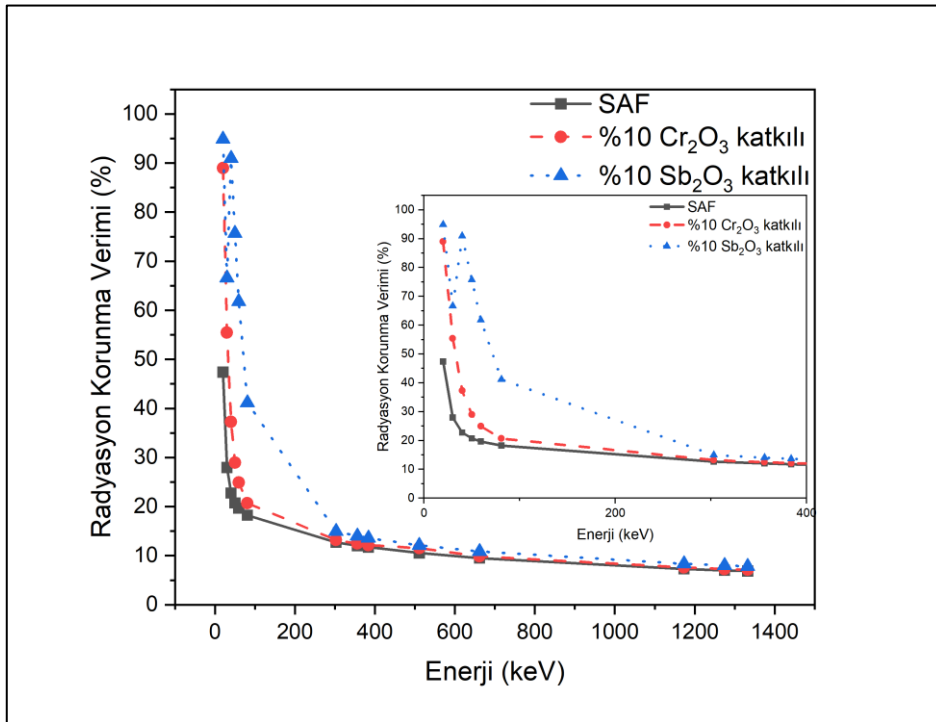
Yukarıda verilen Tablolardan da görüleceği üzere enerji arttıkça radyasyon koruma verimi değerleri düşmektedir.



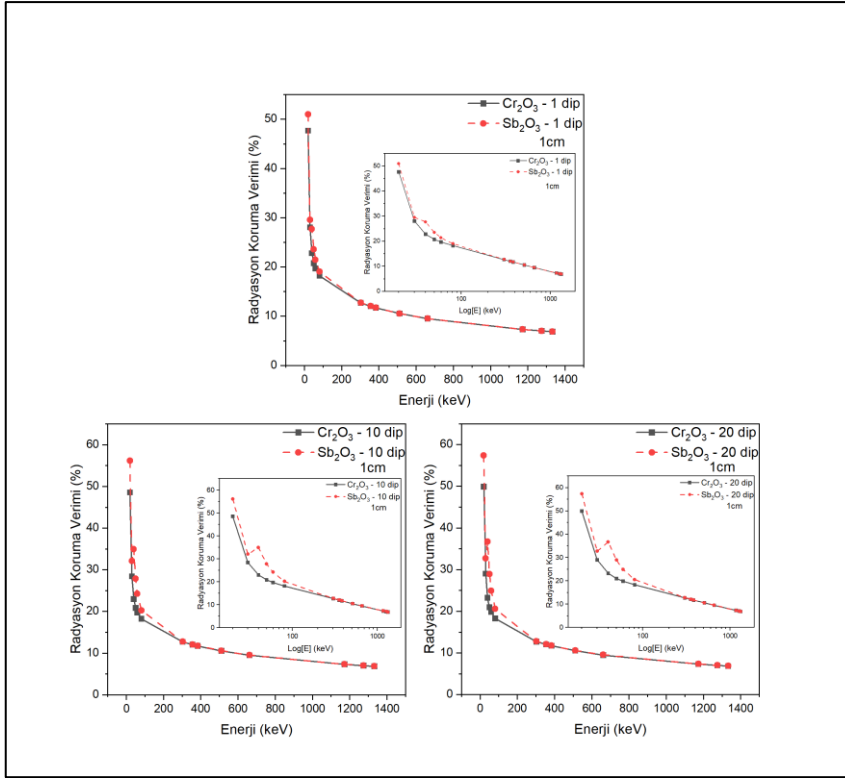
Şekil 4.10 Sb_2O_3 (1-10-20 dip boyalı) numunelerin radyasyon koruma verimi grafiği



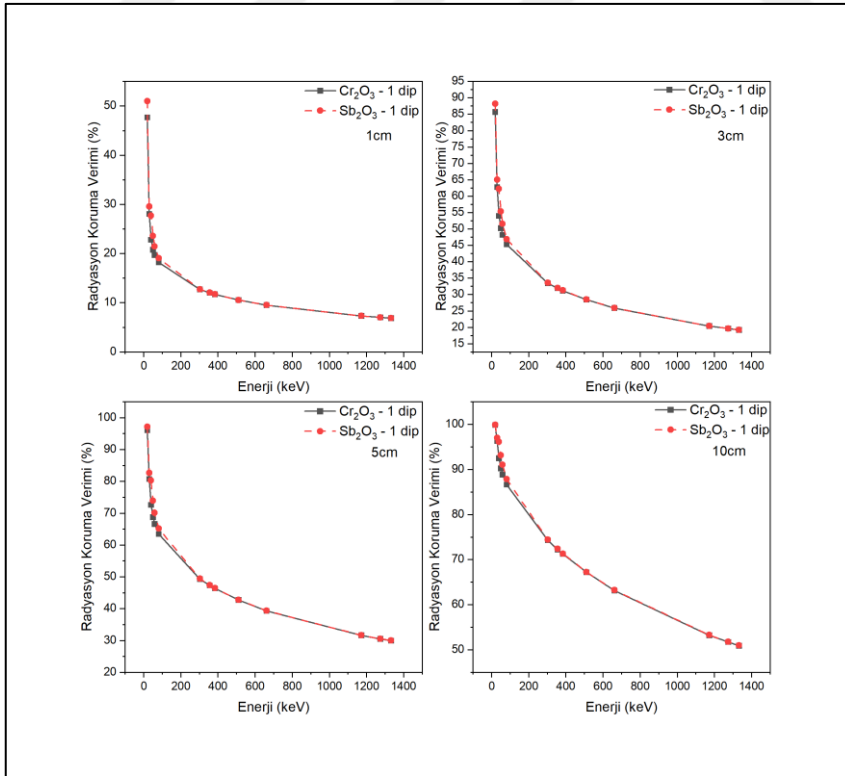
Şekil 4.11 Cr_2O_3 (1-10-20 dip boyalı) numunelerin radyasyon koruma verimi grafiği



Şekil 4.12 Saf PLA, %10 Sb_2O_3 katkılı ve %10 Cr_2O_3 katkılı numunelerinin radyasyon koruma verimi grafiği



Şekil 4.13 Sb₂O₃ (1-10-20 dip boyalı) ve Cr₂O₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin dip karşılaştırılması grafiği



Şekil 4.14 Sb₂O₃ (1-10-20 dip boyalı) ve Cr₂O₃ (1-10-20 dip boyalı) numunelerin farklı kalınlıklarda karşılaştırılması grafiği

4.3 Nötron Zırhlama Parametrelerine Ait Sonuçlar

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 4.31’de görülebilmektedir. Nötron zırh malzemesi olarak kullanılacak malzemenin uzaklaştırma tesir kesiti ne kadar yüksekse zırhlama kabiliyetinin de o kadar etkin olduğunu belirtmek gerekmektedir.

Tablo 4.31 Numunelerin uzaklaştırma tesir kesiti (cm^{-1})

Numuneler	Parametreler	H	Sb	C	O	Cr	Toplam cm^{-1}
%10 Cr_2O_3 katkılı kompozit	Ağırlıkça oranı	0,0509	0,0000	0,4546	0,4324	0,0622	0,0921
	Elemental yoğunluk	0,0650	0,0000	0,5813	0,5530	0,0795	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0389	0,0000	0,0292	0,0224	0,0017	
%10 Sb_2O_3 katkılı kompozit	Ağırlıkça oranı	0,0509	0,0759	0,4546	0,4186	0,0000	0,1010
	Elemental yoğunluk	0,0721	0,1077	0,6448	0,5939	0,0000	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0431	0,0015	0,0324	0,0241	0,0000	
PLA	Ağırlıkça oranı	0,0559	0,0000	0,5001	0,4440	0,0000	0,0934
	Elemental yoğunluk	0,0683	0,0000	0,6101	0,5417	0,0000	
	Uzaklaştırma tesir kesiti	0,0408	0,0000	0,0306	0,0219	0,0000	
Parafin							0,1224
Sıradan Beton							0,0542

Tablo 4.32 Numunelerin etkin uzaklaştırma tesir kesitleri ve 10 mm numune kalınlığında 4,5 MeV enerjili nötronların numunelerden geçen sayıları

Numuneler	Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti cm^{-1}	I (GEANT4)
%10 Cr_2O_3 katkılı kompozit	0,0921	8 617 849±2324
%10 Sb_2O_3 katkılı kompozit	0,1010	8 502 214±455
PLA	0,0934	8 603 724±3828

Tablo 4.31 ve Tablo 4.32'ye bakıldığında tez kapsamında seçilen kaplama malzemelerinden Cr_2O_3 'ün saf PLA'ya göre daha düşük hızlı nötron zırhlama kabiliyeti görülmektedir, Sb_2O_3 'ün ise çok az da olsa saf PLA'dan daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Yapılan katkılamanın PLA malzemesinin hızlı nötron zırhlama kabiliyetini kısmen geliştirdiği gözlemlenmiştir.

Birincil termal ve hızlı nötronların numune ile etkileşimi sonucu oluşan ikincil nötronların ve gamaların oranı ve bunların ortalama enerjileri Tablo 4.33'te verilmiştir. En çok ikincil gama oluşan sıradan beton, tez çalışmasında kullanılan malzemeler arasında ise %10 Sb_2O_3 katkılı kompozittir. Termal nötronların etkileşimi sonucu ikincil nötronlar oluşmamıştır. Birincil hızlı nötronların etkileşimi sonucu en çok ikincil gama oluşan kurşun, tez çalışmasında kullanılan malzemeler arasında ise %10 Sb_2O_3 katkılı kompozittir. Hızlı nötronların etkileşimi sonucu en çok ikincil nötron oluşan kurşun, tez çalışmasında kullanılan malzemeler arasında ise %10 Cr_2O_3 katkılı kompozittir.

Tablo 4.33 Termal ve hızlı nötronlar ile numunelerin etkileşimi sonucu ikincil nötron ve gama radyasyonları sayıları ve bunların ortalama enerjileri ve bu enerjilerde numunelerden geçen nötronların oranı

	Transmisyon		İkincil Termal Nötron				İkincil Hızlı Nötron	
	I/I0 Termal nötron (0,025 eV)	I/I0 Hızlı Nötron (4,5 MeV)	İkincil Gama /I0	Gama Ortalama Enerji (MeV)	Nötron	Nötron Ortalama Enerji	Gama Ortalama Enerji	Nötron Ortalama Enerji
%10 Cr₂O₃ katkılı kompozit	0,2479	0,8618	0,0128	3,2311	0	0	679,32 keV±0,0030	1,626 MeV±0,0012
%10 Sb₂O₃ katkılı kompozit	0,2224	0,8502	0,0164	2,0212	0	0	1,2345 MeV±0,0043	997,35 keV±0,0011
PLA	0,2169	0,8604	0,0072	2,2614	0	0	713,5 keV±0,0021	1,7297 MeV±0,0000
Kurşun	0,6856	0,7837	0,0081	5,5696	0	0	1,4288 MeV±0,1695	1,3288 MeV±0,0650
Parafin	0,0679	0,8096	0,0098	2,2499	0	0	1,5319 MeV±0,0000064	880,46 keV±0,0000008
Sıradan Beton	0,6864	0,8847	0,0306	3,0859	0	0	1,1275 MeV±0,0307	2,1335 MeV±0,0124

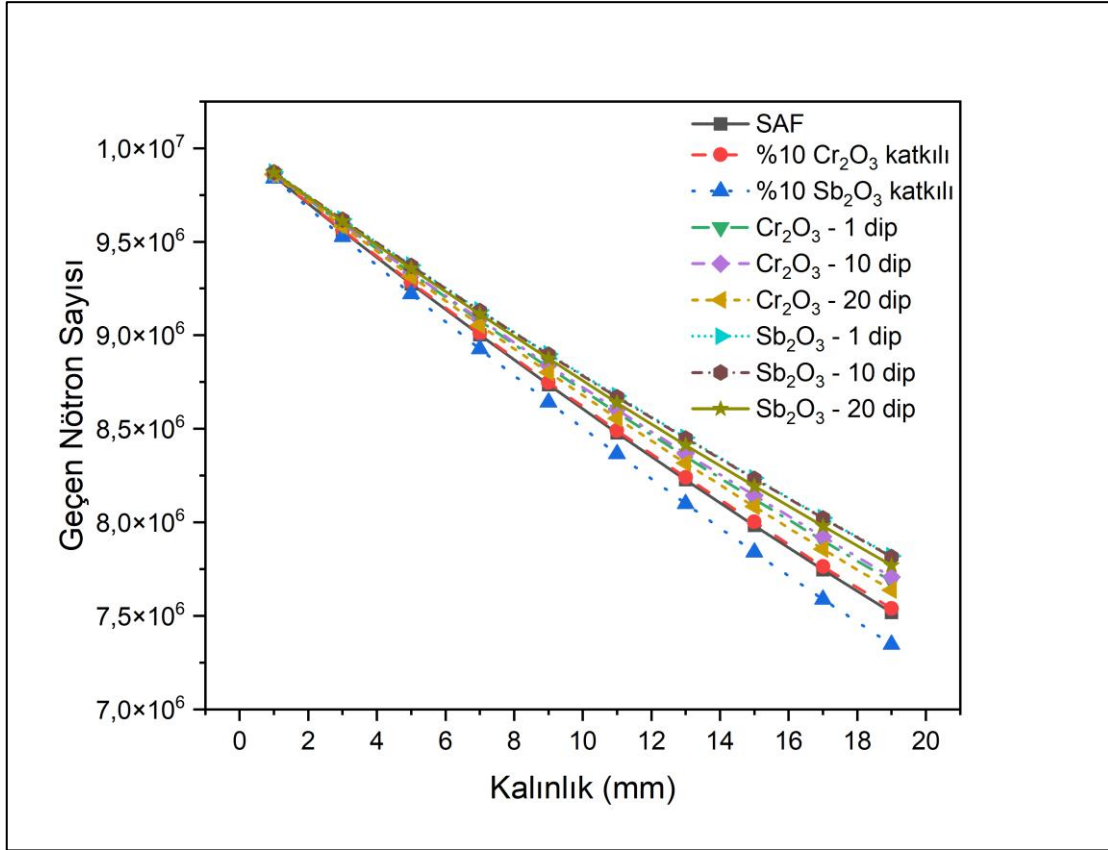
Tablo 4.34 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda nötron transmisyon değerleri

Numune	1mm	3mm	5mm	7mm	9mm	11mm	13mm	15mm	17mm	19mm
Saf PLA	9 849 874	9 558 793	9 274 724	9 002 348	8 735 656	8 476 754	8 226 601	7 981 969	7 746 092	7 517 804
%10 Cr₂O₃ katkıli kompozit	9 852 464	9 562 847	9 283 533	9 010 666	8 748 201	8 490 398	8 240 139	8 001 948	7 763 130	7 539 112
%10 Sb₂O₃ katkıli kompozit	9 839 279	9 526 069	9 220 574	8 926 756	8 642 204	8 366 497	8 100 263	7 839 742	7 587 641	7 347 879
Cr₂O₃ 1dip boya	9 862 136	9 592 491	9 331 845	9 075 885	8 826 975	8 585 568	8 350 569	8 124 061	7 901 798	7 685 527
Cr₂O₃ 10dip boya	9 863 757	9 597 122	9 336 795	9 085 058	8 840 127	8 601 610	8 368 440	8 143 534	7 923 155	7 706 832
Cr₂O₃ 20dip boya	9 859 247	9 583 703	9 315 490	9 054 645	8 802 418	8 556 207	8 315 932	8 084 090	7 856 624	7 637 050
Sb₂O₃ 1dip boya	9 872 327	9 619 878	9 374 732	9 133 742	8 899 540	8 675 238	8 453 299	8 236 826	8 024 528	7 820 240
Sb₂O₃ 10dip boya	9 871 113	9 618 508	9 370 563	9 129 856	8 895 910	8 668 884	8 448 528	8 232 009	8 022 079	7 814 446
Sb₂O₃ 20dip boya	9 868 679	9 609 282	9 355 989	9 112 659	8 874 797	8 639 173	8 412 159	8 192 958	7 979 164	7 769 849

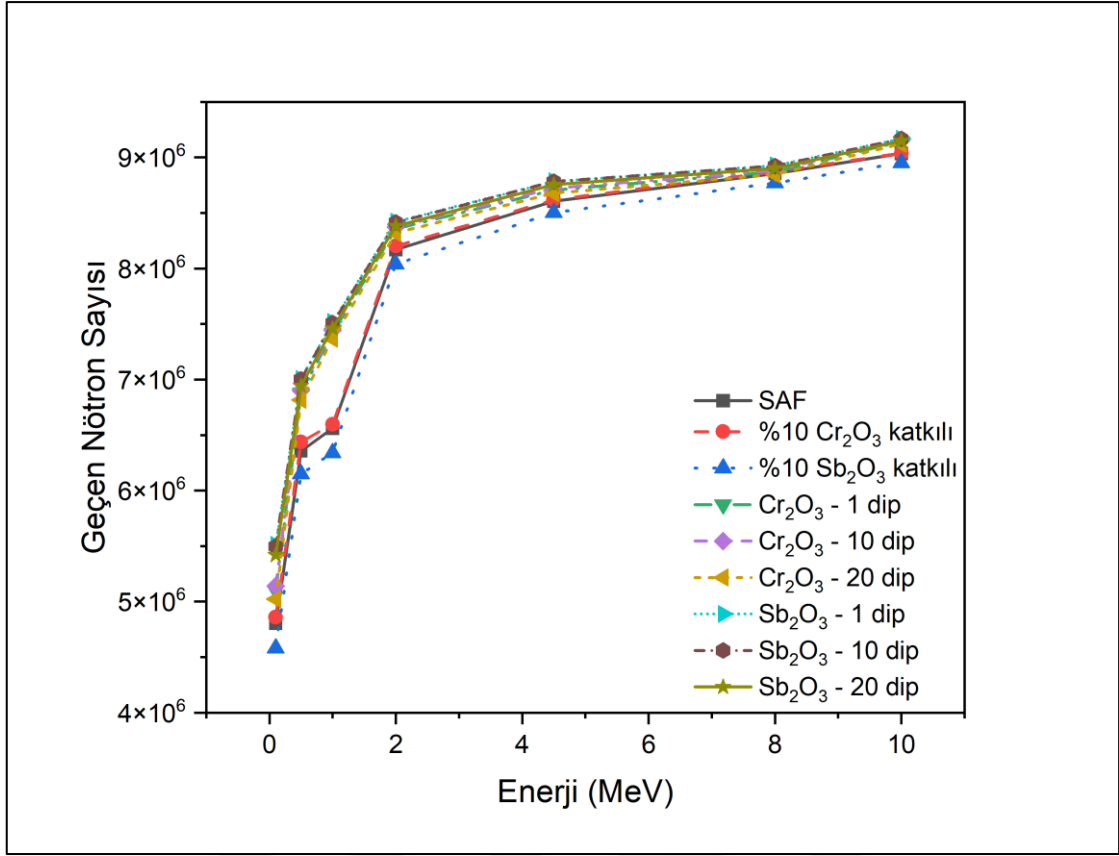
Tablo 4.35 Farklı enerjilerde 10 mm kalınlıkta nötron transmisyon değeri

Numune	0.1 MeV	0.5 MeV	1 MeV	2 MeV	4.5 MeV	8 MeV	10 MeV
Saf PLA	4 803 526	6 355 833	6 560 404	8 168 931	8 604 570	8 856 181	9 034 824
%10 Cr₂O₃ katkılı kompozit	4 860 068	6 437 592	6 597 402	8 201 980	8 618 871	8 871 008	9 039 149
%10 Sb₂O₃ katkılı kompozit	4 579 801	6 151 517	6 339 093	8 039 621	8 502 726	8 770 308	8 952 175
Cr₂O₃ 1dip boya	5 102 320	6 876 866	7 419 363	8 358 096	8 705 973	8 870 938	9 143 370
Cr₂O₃ 10dip boya	5 141 143	6 902 321	7 446 357	8 373 461	8 721 694	8 882 712	9 152 212
Cr₂O₃ 20dip boya	5 022 155	6 815 168	7 367 287	8 320 722	8 678 005	8 846 417	9 123 449
Sb₂O₃ 1dip boya	5 510 216	7 005 911	7 519 548	8 421 109	8 783 712	8 927 375	9 168 399
Sb₂O₃ 10dip boya	5 496 774	7 001 564	7 510 047	8 415 079	8 781 763	8 922 018	9 167 414
Sb₂O₃ 20dip boya	5 419 118	6 942 788	7 460 202	8 382 213	8 754 910	8 902 249	9 147 544

Tablo 4.34’te, 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklarda üretilen numuneler için nötron transmisyon değerleri sunulmaktadır. Bu verilerin grafiksel gösterimi ise Şekil 4.15’te yer almaktadır. Hem ilgili tablo hem de Şekil incelendiğinde, Sb_2O_3 (%10) katkıli numunenin, diğer numunelere kıyasla nötron transmisyon performansının daha iyi olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.15 4,5 MeV enerjide farklı kalınlıklardaki numunelerden geçen nötron transmisyon değerleri



Şekil 4.16 Farklı enerjilerde 10 mm kalınlıktaki numunelerden geçen nötron sayısı

Tablo 4.35'te, farklı enerjilerde 10 mm kalınlıkta geçen nötron sayısı değerleri sunulmaktadır. Bu verilerin grafiksel gösterimi ise Şekil 4.16'da yer almaktadır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Sunulan tez kapsamında geleneksel zırhlama malzemelerine alternatif bir zırh malzemenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda PLA polimer malzemesine odaklanılmıştır. PLA'nın seçilmesindeki en önemli etkenler üretim kolaylığı, sürdürülebilir olması, kurşuna göre avantajlı fiziksel özellikler sunması ve çevreye olumsuz etki yapmaması olarak sıralanabilmektedir. Tez çalışmasında, 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan Polilaktik Asit polimerine Cr_2O_3 ve Sb_2O_3 esaslı seramik toz boyaların ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerin, gama ve nötron radyasyonuna karşı zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir. Polimer malzeme içerisine seçilen seramik boyaların eklenmesinin yanı sıra, saf PLA'dan elde edilen numunelerin dış yüzeyleri de belirtilen seramik boyalar kullanılarak Dip (Dalma) yöntemiyle kaplanmıştır. Üretilen bu numunelerinde zırhlama kabiliyetleri incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen polimer kompozit malzemelerin her birinin birleşim yerlerinin katmanlaşması ve boşluk oranlarının tespit edilebilmesi için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları, teorik ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlarla uyumlu olup birbirlerini desteklemektedirler. Sonuçlara göre, %10 Sb_2O_3 katkılı PLA'nın diğer numunelere kıyasla gama zırhlama açısından en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer numunelerin sıralaması ise büyükten küçüğe doğru şu şekildedir; Sb_2O_3 20 dip, Sb_2O_3 10 dip, Sb_2O_3 1 dip, %10 Cr_2O_3 katkılı, Cr_2O_3 20 dip, Cr_2O_3 10 dip, Cr_2O_3 1 dip ve saf PLA. Nötron zırhlama analizleri sonucunda da %10 Sb_2O_3 katkılı numunenin diğer numunelere göre daha iyi zırhlama kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Radyasyon koruma verimliliği ve diğer parametreler dikkate alındığında, %10 Sb_2O_3 katkılı PLA'nın sürdürülebilirlik, çevresel etkiler ve fiziksel özellikleri ile özellikle düşük enerjili medikal gama radyasyonu uygulamaları için uygun bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Abouhaswa, A. S., Mhareb, M. H., Alalawi, A., & Al-Buriahi, M. S. (2020). *Physical, structural, optical, and radiation shielding properties of $B_2O_3 - 20Bi_2O_3 - 20Na_2O_2 - Sb_2O_3$ glasses: Role of Sb_2O_3* . Journal of Non-Crystalline Solids, 543,120-130. doi:http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120130
- AbuAlRoos, N. J., Amin, N. A., & Zainon, R. (2019). *Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review*. Radiation Physics and Chemistry, 165, Article: 108439. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439
- Agar, O., Khattari, Z., Sayyed, M., Tekin, H., Al-Omari, S., Maghrabi, M., . . . Kityk, I. (2019). *Evaluation of the shielding parameters of alkaline earth based phosphate glasses using MCNPX code*. Results in Physics, 12, 101-106. doi:http://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.054
- Agostinelli, S., Apostolakis, J., Arce, P., Burkhardt, H., Chytrcek, R., Cosmo, G., . . . Nieminen, P. (2003). *Geant 4—a simulation toolkit*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 506(3), 250-303. doi:http://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8
- Akman, F., Oğul, H., Polat, H., & Kaçal, M. (2020). *Impact of lead(II) iodide on radiation shielding properties of polyester composites*. Applied Physics A: Materials Science & Processing. doi:https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-020-03494-6
- Aktas, B., Acikgoz, A., Yilmaz, D., Yalcin, S., Dogru, K., & Yorulmaz, N. (2022). *The role of TeO_2 insertion on the radiation shielding, structural and physical properties of borosilicate glasses*. Journal of Nuclear Materials, 563, Article: 153619. doi:http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153619
- Araz, A. (2020). *Radyasyon Zırhlama için Yeni, Hafif, Kompozit Malzemeler*. Ataturk University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp (Tez No: 654184) adresinden alındı
- Bagheri, S., Khalafi, H., Tohidifar, M., & Bagheri, S. (2024). *Thermoplastic and thermoset polymer matrix composites reinforced with bismuth oxide as radiation shielding materials*. Composites Part B: Engineering, 278, Article: 111443. doi:http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111443
- Belgin, E. (2017). *Elektromanyetik radyasyon zırhlama uygulamaları için farklı metal tuz takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi*. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Kimya Ana Bilim Dalı. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=__GWvQ-37nnxvsvCPDRsOw&no=MBJRf1Y-u_1CuPQcGg5BNA adresinden alındı
- Darwesh, R., Alotaibi, J. S., Al-Hadeethi, Y., Sayyed, M. I., & ALasali, H. J. (2024). *Improved radiation shielding properties of epoxy resin composites using Sb_2O_3 and Al_2O_3 nanoparticles additives*. Annals of Nuclear Energy, 200, Article: 110385. doi:http://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110385
- Elsafi, M., Sayyed, M. I., & Almuqrin, A. H. (2024). *New polyester composites synthesized with additions of different sized ZnO to study their shielding efficiency*. Nuclear Engineering and Technology, 56(7), Article: 2821-2827. doi:http://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.044
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Levring, H. (2004). *WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients*. Radiation Physics and Chemistry, 71(3), Article: 653-654. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040

- Hila, F. C., Asuncion-Astronomo, A., Dingle, C. A., Jecong, J. F., Javier-Hila, A. M., Gili, M. B., . . . Jr., A. V. (2021). *EpiXS: A Windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8)*. Radiation Physics and Chemistry, 182, Article: 109331. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109331
- Kilicoglu, O., More, C. V., Akman, F., Dilsiz, K., Oğul, H., Kaçal, M. R., . . . Agar, O. (2022). *Micro Pb filled polymer composites: Theoretical, experimental and simulation results for γ -ray shielding performance*. Radiation Physics and Chemistry, 194, Article: 110039. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110039
- Kim, J. (2018). *Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding*. Korean J Pain 2018;31:145-146. doi:https://doi.org/10.3344/kjp.2018.31.3.145
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. <https://indico-tkli.sjtu.edu.cn/event/171/contributions/2123/attachments/982/1592/Knoll4thEdition.pdf> adresinden alındı
- Kruthika, K., Farheen, S. M., Krishnaveni, S., Manjunatha, H. C., Vidya, Y. S., Manjunatha, S., . . . Sridhar, K. N. (2024). *Aloe barbadensis - Assisted MgBiO/MgCuBiO/MgBaBiO nanocomposites as effective gamma shielding novel materials*. Progress in Nuclear Energy, 177, Article: 105470. doi:http://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105470
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*. https://www.engr.psu.edu/conedmat/courses/nuce497a/lamarsh_baratta-introduction_to_nuclear_engineering_textbook_3rd_edition.pdf adresinden alındı
- Malidarre, R., Kulali, F., Inal, A., & Oz, A. (2020). *Monte Carlo Simulation of the Waste Soda-Lime-Silica Glass System Contained Sb 2 O 3 for Gamma-ray Shielding*. Emerging Materials Research 9(4):1-7. doi:https://doi.org/10.1680/jemmr.20.00202
- Mann, K. S., Rani, A., & Heer, M. S. (2015). *Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays*. Radiation Physics and Chemistry, 106, Article: 247-254. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.08.005
- Mansy, M. S., Ghobashy, M. M., & Aly, M. I. (2024). *Enhancing gamma and neutron radiation shielding efficiency of LDPE/PVC polymers using cobalt, aluminum, and magnesium oxide fillers*. Radiation Physics and Chemistry, 222, Article: 111862. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111862
- More, C., Alsayed, Z., Badawi, M., Thabet, A., & Pawar, P. (2021). *Polymeric composite materials for radiation shielding: a review*. Environ Chem Lett 19, 2057–2090 (2021). doi:https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9
- Oğul, H., Gultekin, B., Bulut, F., & Us, H. (2024). *A comparative study of 3D printing and sol-gel polymer production techniques: A case study on usage of ABS polymer for radiation shielding*. Nuclear Engineering and Technology, 56(6), Article: 1943-1949. doi:http://doi.org/10.1016/j.net.2024.01.001
- Oğul, H. (2022). *Radiation attenuation properties of polymer composites mixed with tantalum carbide*. Radiation Effects and Defects in Solids, 177(5–6), 531–544. doi:https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2063124
- Oğul, H., Bulut, F., Agar, O., Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Polat, H., & Akman, F. (2023). *A comparative neutron and gamma-ray radiation shielding investigation of molybdenum and boron filled polymer composites*. Applied Radiation and Isotopes, 194, Article: 110731. doi:http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110731
- Oğul, H., Polat, H., Akman, F., Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Bulut, F., & Agar, O. (2022). *Gamma and Neutron Shielding Parameters of Polyester-based composites reinforced with boron and tin nanopowders*. Radiation Physics and Chemistry, 201, Article: 110474. doi:http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110474

- Reddy, B. C., Pasha, U. M., Manjunatha, H. C., Seenappa, L., Sathish, K. V., Gupta, P. S., . . . Krishnaveni, S. (2021). *Synthesis and characterization of multi functional nickel ferrite nano-particles for X-ray/gamma radiation shielding, display and antimicrobial applications*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 159, Article: 110260. doi:http://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110260
- Shaaban, K., Al-Baradi, A., & Ali, A. (2022). *The Impact of Cr₂O₃ on the Mechanical, Physical, and Radiation Shielding Characteristics of Na₂B₄O₇-CaO-SiO₂ Glasses*. Silicon 14, 10375-10382. doi:https://doi.org/10.1007/s12633-022-01783-8
- Susoy, G., Guclu, E. E., Kilicoglu, O., Tekin, H. O., Kamislioglu, M., Al-Buriahi, M. S., & Abuzaid, M. M. (2020). *The impact of Cr₂O₃ additive on nuclear radiation shielding properties of LiF-SrO-B₂O₃ glass system*. Materials Chemistry and Physics, 242, Article: 122481. doi:http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122481
- Sürücü, A. (2021). *Nanomalzemelerle güçlendirilmiş radyasyon zırhlama özelliğine sahip polimer kompozit üretilmesi*. Düzce Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / Kompozit Malzeme Teknolojileri Ana Bilim Dalı / Yüksek Lisans Tezi. https://acikerisim.duzce.edu.tr/items/f371f737-37a1-4d96-bae8-a99b7b8f53c6 adresinden alındı
- Tuna, T. (2017). *Polyester matrisli bor karbür takviyeli nötron radyasyonu zırhlama malzemesi geliştirilmesi ve karakterizasyonu*. Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı / İmal Usulleri Bilim Dalı / Yüksek Lisans Tezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=3I-WitwZfrEyhl3KqKYRDw&no=U5Ls_hm3YlgnbQpwsV_tsQ adresinden alındı
- Tüfekçi, M. (2017). *Ultra yüksek performanslı çimento esaslı ağır kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Yapı Bilim Dalı / Doktora Tezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=PrwBFNcwOZ3ypqfxGJPo4w&no=l4pGo3sgjktP4nl6q5Zt0w adresinden alındı
- Vural, Ö. (2019). *Antimon (cevheri ve konsantresi) ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin diagnostik x-ışınlarını zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi / Enerji Enstitüsü / Nükleer Araştırmalar Ana Bilim Dalı / Radyasyon Bilim ve Teknoloji Bilim Dalı / Yüksek Lisans Tezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=yMIVW19zL8hwSmrnmDv3pg&no=Pk00s-gWdhL9NecAepD0AQ adresinden alındı
- Zailan, F. D., Chen, R. S., Shahdan, D., Makhtar, N., Ahmad, S., Flaifel, M. H., . . . Sayyed, M. I. (2024). *Improved mechanical, magnetic and radiation shielding performance of rubbery polymer magnetic nanocomposites through incorporation of Fe₃O₄ nanoparticles*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 186, Article: 108385. doi:http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108385
- Zehir, B. B. (2023). *Molecular dynamics simulation and experimental investigation of mechanical properties of calcium carbonate and graphene reinforced polylactic acid nanocomposites*. J Mol Model 29, 187. doi:https://doi.org/10.1007/s00894-023-05598-1

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kaan ŞAVLI

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Sinop Şehit Halil ÖZDOĞRU Anadolu Lisesi, 2016

Lisans : Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Nükleer Enerji
Mühendisliği, 2020

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Elektrik Üretim Anonim Şirketi, Bursa Doğalgaz Kombine Çevrim
Santrali, Stajyer Mühendis, 08-09 2018

İş Yeri : TENMAK, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
Stajyer Mühendis, 07-08 2019