

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

**FARKLI ORANLARDA BİZMUT TUNGSTAT VEYA KALAY İLE
KATKILANMIŞ POLİMER KOMPOZİTLERİN RADYASYON
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meryem YILMAZ

FİZİK ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Ferdi AKMAN**

BİNGÖL 2021

ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların eksiksiz tamamlanabilmesi için gerekli desteği vermekten hiçbir zaman imtina etmeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Ferdi AKMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tezim için gerekli numunelerin hazırlanması hususunda göstermiş olduğu özveri ve destek için Öğr. Gör. Sayın Hasan POLAT hocama ayrıca teşekkür ederim.

Tez savunmam esnasında yaptıkları yönlendirmeler ve katkılarından dolayı değerli hocalarım Doç. Dr. Kamuran DİLSİZ ve Dr. Öğr. Üyesi M. Fatih TURHAN hocama teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama tüm süreç boyunca gösterdikleri destekleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Meryem YILMAZ

Bingöl 2021

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Radyasyonun Sınıflandırılması.....	13
3.1.1. Doğrudan İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitleri ve Kaynakları.....	14
3.1.1.1 Elektronlar.....	14
3.1.1.2. Pozitronlar.....	15
3.1.1.3. Ağır Yüklü Tanecikler.....	15
3.1.1.4. Daha Ağır Yüklü Tanecikler.....	15
3.1.2. Doğrudan İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonun Sınıflandırılması.....	16
3.2. Fotonlar.....	16
3.3. Foton Etkileşimleri.....	17
3.3.1. Fotoelektrik Etki.....	18
3.3.2. Compton Olayı.....	20
3.3.3. Çift Oluşum Olayı.....	22
3.4. Fotonun Madde İçinde Azaltılması.....	24
3.5. Lineer Azaltma Katsayısı.....	26

3.6. Foton Enerjisinin ve Soğurucu Atom Numarasının Foton Azaltmasında Önemi.....	28
3.7. Üstel Bozunma.....	30
3.8. Radyasyonun Biyolojik Etkileri.....	33
3.9. Radyasyondan Korunma.....	35
3.9.1. Zaman.....	36
3.9.2. Mesafe.....	36
3.9.3. Zırhlama.....	37
3.10. Yarıiletken Dedektörler.....	39
3.11. Gama Işını Dedektörleri.....	40
3.12. Germanyum Gama Işını Dedektörleri.....	41
3.13. Germanyum Dedektörlerinin Konfigürasyonları.....	42
3.13.1. Düzlemsel Konfigürasyon.....	43
3.13.2. Koaksiyel Konfigürasyon.....	45
3.14. Numunelerin Hazırlanması.....	47
3.15. Deney Geometrileri.....	50
3.16. Radyasyon Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi.....	52
 4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	 56
 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	 114
 KAYNAKLAR LİSTESİ.....	 122
ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μ	: Lineer Azaltma Katsayısı
μ/ρ	: Kütle Azaltma Katsayısı
A	: Atomik Ağırlık
a	: Auger Verimi
HPGe	: Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü
HVL	: Yarı Kalınlık Değeri
I	: Başlangıçtaki foton şiddeti
I_0	: Soğurmadan Geçtikten Sonraki Foton Şiddeti
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
MFP	: Serbest Ortalama Yol
N_E	: Etkin Elektron Yoğunluğu
RPE	: Radyasyon Koruma Verimi
TF	: Radyasyon Geçirme Faktörü
TVL	: Onda bir Kalınlık Değeri
x	: Soğurucu Kalınlığı
Z	: Atom Numarası
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası
σ	: Tesir Kesiti
σ_t	: Toplam Atomik Soğurma Tesir Kesiti
$\sigma_{t,a}$	: Toplam Atomik Tesir Kesiti
$\sigma_{t,e}$	: Toplam Elektronik Tesir Kesiti
$\sigma_{t,m}$	: Toplam moleküler tesir Kesiti

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Radyasyonun sınıflandırılması.....	13
Şekil 3.2.	Elektromanyetik spektrum.....	16
Şekil 3.3.	Fotoelektrik olayın şematik gösterimi	19
Şekil 3.4.	Compton olayın şematik gösterimi	20
Şekil 3.5.	Compton elektronuna aktarılan foton enerjisi kesrinin grafiksel olarak gösterimi	21
Şekil 3.6.	Çift oluşum olayının şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.7.	İyi ve zayıf geometrinin şematik gösterimi	25
Şekil 3.8.	Radyasyon şiddetindeki azalmanın şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.9.	Lineer azaltma katsayısı (μ), enerji transfer katsayısı (μ_{tr}), ve lineer enerji azaltma katsayısı (μ_{en}) olayları arasındaki ilişki.....	28
Şekil 3.10.	Su ve kurşun için lineer azaltma katsayısının foton enerjisine göre fotoelektrik, Compton ve çift oluşum tesir kesitlerinin toplam lineer katsayısına rölatif katkılarının grafiği.....	29
Şekil 3.11.	Lineer azaltma katsayısının atom numarası ile değişimi.....	30
Şekil 3.12.	Üstel radyoaktif bozunma yasasının grafiksel gösterimi.....	32
Şekil 3.13.	Radyasyonun doğrudan ve dolaylı etkisi.....	34
Şekil 3.14.	Kriyostat gövdesi içinde modern HPGe dedektörü ve önyükseltici düzeni.....	42
Şekil 3.15.	Düzlemsel bir HPGe dedektörünün konfigürasyonu. Ge yarı iletken v tipi (p^+ kontak doğrultucu), π tipi (n^+ kontak doğrultucu) veya lityum sürüklenmiş olabilir.....	44
Şekil 3.16.	Düzlemsel dedektörlerin konfigürasyonunda üç varyant. Elektrotlar, katı siyah çizgiler olarak abartılı kalınlıkta gösterilmiştir.....	45

Şekil 3.17.	Üstte büyük hacimli koaksiyel dedektörlerin üç yaygın şekli gösterilmektedir. Her biri, silindirik bir kristalin eksenini boyunca bir kesit görünüşü temsil eder.....	46
Şekil 3.18.	Kompozit numune hazırlama süreci.....	48
Şekil 3.19.	%5, %10, %15 ve %20 oranlarında $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitler.....	49
Şekil 3.20.	%5, %10, %15 ve %20 oranlarında Sn ile katkılanmış polimer kompozitler.....	49
Şekil 3.21.	Dar ışınlı deney geometrisi.....	51
Şekil 4.1.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin RPE değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	63
Şekil 4.2.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TF değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	63
Şekil 4.3.	Sn ile katkılanmış kompozitlerin RPE değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	64
Şekil 4.4.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TF değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	64
Şekil 4.5.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	68
Şekil 4.6.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	69
Şekil 4.7.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı (μ, cm^{-1}) değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	73
Şekil 4.8.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	74
Şekil 4.9.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	78
Şekil 4.10.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	79
Şekil 4.11.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	82
Şekil 4.12.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	83

Şekil. 4.13.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	86
Şekil 4.14.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	87
Şekil 4.15.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	91
Şekil 4.16.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	92
Şekil 4.17.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	95
Şekil 4.18.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	96
Şekil 4.19	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	99
Şekil 4.20.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi.....	100
Şekil 4.21.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarasının enerjiye göre değişimi.....	104
Şekil 4.22.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarasının enerjiye göre değişimi.....	105
Şekil 4.23.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğunun enerjiye göre değişimi.....	108
Şekil 4.24.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğunun enerjiye göre değişimi.....	109
Şekil 4.25.	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenliğinin enerjiye göre değişimi.....	112
Şekil 4.26.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenliğinin enerjiye göre değişimi.....	113

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Polimer kompozitlerin element bileşimi ve yoğunlukları.....	49
Tablo 3.2.	Deneylerde kullanılan radyo izotop kaynakların bilgileri.....	51
Tablo 4.1.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin koruma verimi değerleri.....	59
Tablo 4.2.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin koruma verimi değerleri.....	60
Tablo 4.3.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon geçirme faktörü değerleri.....	61
Tablo 4.4.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon geçirme faktörü değerleri.....	62
Tablo 4.5.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm ² /g) değerleri.....	66
Tablo 4.6.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm ² /g) değerleri.....	67
Tablo 4.7.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı (μ ,cm ⁻¹) değerleri	71
Tablo 4.8.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı (μ , cm ⁻¹) değerleri	72
Tablo 4.9.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL (cm) değerleri..	76
Tablo 4.10.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL (cm) değerleri.....	77
Tablo 4.11.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL (cm) değerleri..	80
Tablo 4.12.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL (cm) değerleri.....	81
Tablo 4.13.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP (cm) değerleri..	84
Tablo 4.14.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP (cm) değerleri.....	85
Tablo 4.15.	Bi ₂ (WO ₄) ₃ ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerleri.....	89
Tablo 4.16.	Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerleri	90

Tablo 4.17. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerleri.....	93
Tablo 4.18. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerleri...	94
Tablo 4.19. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti teorik değerleri	97
Tablo 4.20. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti teorik değerleri.....	98
Tablo 4.21. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarası değerleri.....	102
Tablo 4.22. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarası değerleri.....	103
Tablo 4.23. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğu değerleri.....	106
Tablo 4.24. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğu değerleri.....	107
Tablo 4.25. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri.....	110
Tablo 4.26. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri.....	111

FARKLI ORANLARDA BİZMUT TUNGSTAT VEYA KALAY İLE KATKILANMIŞ POLİMER KOMPOZİTLERİN RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada; polimer kompozitlerde radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirmek için kompozit içine inorganik bileşikler katkılanmıştır. Katkılanan inorganik bileşikler malzemenin etkin atom numarasını ve yoğunluğunu artıracak doğrultuda hedeflendiğinden, üretilen kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliğinde bir artış olmasına sebep olmuştur. Çalışmamızda bu artışın eğilimi farklı oranlarda inorganik bileşikler kompozitlere katkılanarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda doymamış polyester tabanlı ve inorganik bileşikler ile katkılanmış polimer kompozitler hazırlanmıştır ve bunların gama radyasyonu azaltma özellikleri incelenmiştir. Doymamış polyester reçine ile metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt oktoat (%6) birleştirilerek bir polimer matriks hazırlanmış ve bu polimer matrikse dolgu malzemesi olarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn malzemeleri belirli oranlarda katkılanmıştır. Elde edilen polimer kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemek için kütle azaltma katsayıları, radyasyon koruma verimleri, radyasyon geçirme oranları, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değerleri, onda-bir kalınlık değerleri, serbest ortalama yol değerleri, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlik parametrelerinin deneysel ve teorik sonuçları elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radyoaktif kaynaklarından yayımlanan yirmi iki farklı enerjide ve HPGe dedektörü yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir deneysel sonuç, teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin radyasyon koruma verimi, radyasyon geçirme oranı, kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık ve onda-bir kalınlık değerleri, serbest ortalama yol parametresi, moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik gibi 13 farklı radyasyon zırhlama parametresi düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerinde incelendiğinde, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu ve özellikle düşük enerji bölgesinde radyasyonu daha iyi azalttığı yapılan çalışmalar sonucunda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama; HPGe dedektör; WinXCOM; Polimer kompozit; bizmut tungstat; kalay.

RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES MADE WITH BISMUTH TUNGSTATE OR TIN IN DIFFERENT PROPORTIONS

ABSTRACT

In this study, inorganic compounds were added into the composite to improve the radiation shielding properties of polymer composites. Since the doped inorganic compounds were targeted to increase the effective atomic number and density of the material, it caused an increase in the radiation shielding properties of the produced composites. In our study, the trend of this increase was investigated by adding different ratios of inorganic compounds to the composites.

In experimental studies, polymer composites based on unsaturated polyester and doped with inorganic compounds were prepared and their gamma radiation reduction properties were investigated. A polymer matrix was prepared by combining unsaturated polyester resin with methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) and cobalt octoate (6%), and $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ or Sn materials were added to this polymer matrix at certain rates as filling material. In order to examine the gamma radiation reduction properties of the obtained polymer composites, mass attenuation coefficients, radiation shielding efficiencies, radiation transmission rates, linear attenuation coefficients, half thickness values layer, tenth thickness values layer, mean free path values, atomic, molecular and electronic cross sections, effective Experimental and theoretical results of atomic numbers, effective electron densities and effective conductivity parameters were obtained. Experimental studies were carried out with the help of HPGe detector at 22 different energies emitted from ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radioactive sources in the photon energy range of 59.5 to 1408.0 keV. Each experimental result obtained was compared with the theoretical results.

When 13 different radiation shielding parameters are examined in low, medium and high energy regions, such as adiation shielding efficiency, radiation transmission rate, mass and linear attenuation coefficients, half thickness and one-tenth thickness values layer, mean free path parameter, molecular, atomic and electronic cross sections, effective atomic number, electron density and conductivity of polymer composites reinforced with $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ or Sn. We found as a result of studies, for this polymer composites reinforced with $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ are a better radiation shielding material than those reinforced with Sn, and they reduce radiation better, especially in the low energy region.

Keywords: Radiation shielding; HPGe detector; WinXCOM; Polymer composite; bismuth tungstetate; tin.

1. GİRİŞ

Dünyamızın neredeyse hemen her yerinde radyoaktif maddelere rastlamak mümkündür. Hatta insan vücudu bile az da olsa radyoaktif madde içerir. Toprakta bulunan doğal radyasyon sebebiyle gıdalarda da radyoaktif madde bulunur. Yani dünyamızın var oluşundan bu yana üzerinde yaşayan tüm canlılar bir şekilde radyasyona maruz kalmaktadır.

Radyasyon ortamda taşınan enerji olarak tanımlanabilir ve bu enerjinin foton denen enerji paketçikleriyle taşındığını söyleriz. Radyasyonu iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana başlık altında inceleyebiliriz. Bir atoma enerji aktarılarak atomdan elektron koparılmasına iyonlaşma denir. Bu durumda taşınan bu enerji, atomlarda iyonlaşmaya sebep olursa ‘iyonlaştırıcı radyasyon’ adını alır. İyonlaştırıcı radyasyon duyu organlarımız tarafından kolaylıkla ayırt edilemez, renksiz ve kokusuz olduğundan bu tür bir radyasyonun şiddeti, ortaya çıkardığı enerjisi veya türü ancak geliştirilmiş özel dedektörlerle algılanıp ölçülebilir. Alfa parçacığı, beta parçacığı ve nötronlar parçacık radyasyonlarına, gama ve X-ışınları ise elektromanyetik dalgalara örnektir ve hepsi iyonlaştırıcı radyasyondur.

Hayatımızın her köşesinde bir etkisi olmasına rağmen, radyasyonun varlığı yüzyıldan biraz daha uzun bir süre önce keşfedilmiş ve o zamandan itibaren temel bazı uygulamalar için önemli katkılar sağlayacağı düşünülerek kullanılmaya başlanmıştır. 1895 yılında Röntgen tarafından X-ışınlarının gözlenmesi ile başlayan süreçte birbirini takip eden ve çığır aşan gelişmelere kapılar aralanmıştır. 1896 yılında Becquerel’in Uranyum tuzunun ışınlar yaydığını keşfetmesiyle Nükleer Fizik çağı başlamış ve radyoaktivite ifadesi ilk kez kullanılmıştır. Bunu takip eden süreçte Marie-Pierre Curie çifti radyoaktif elementleri keşfederek uzun soluklu çalışmalara imza atmışlardır.

Radyoaktivite, atom çekirdeklerinin sahip olduğu fazla enerjilerini radyasyon yayımlayarak bırakması olayını ifade etmektedir. Bu olaya aynı zamanda radyoaktif bozunma da denir. Radyoaktif bir çekirdeğin bozunma olayı olasılıklara bağlı bir süreçtir ve belirli bir zaman süresinde bozunma olasılığı hesaplanabilir ancak kesin olarak ne zaman bozunma olacağı belirlenemez. Radyoaktif atomların birim zamanda yaydıkları radyasyon aktivite olarak adlandırılır. Radyoaktif maddelerin aktiflik durumları her bir maddede farklı sürelerle sahip olacakları şeklinde değişiklik gösterir.

Radyoaktif maddeler pek çok uygulama sahasında etkinlik göstermektedir. Bunlar arasında X-ışınları ve gama ışınlarının bilimsel çalışmalarda kullanımları ilk başta akla gelenlerdir. Radium üzerine yapılan çalışmalar sonrasında keşfedilen gama ışınları, radyoaktif atom çekirdeği tarafından yayımlanan bir elektromanyetik ışıındır ve oldukça tehlikeli bir radyasyon türüdür. Gama radyasyonu, neredeyse tüm maddelerden geçebilecek kadar güçlü bir radyasyondur ve etkileştiği ortamlarda enerjisini farklı etkileşimler ile bırakabilir. Bu etkileşmelerin en baskın olanları fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur. X-ışınları da bir elektromanyetik ışıındır ve elektronik tabakalar arasındaki geçişlerden veya elektronun adım adım yavaşlatılmasıyla yayımlanırlar. Elektron bulutunun içerisindeki enerji seviyelerinde gerçekleşen olaylar sonucu oluşan boşluklar diğer enerji seviyelerindeki elektronlar tarafından doldurulur bunun sonucunda X-ışınları ortaya çıkar. X-ışınları fotoelektrik olay ve Compton saçılması gibi etkileşmeler yaparak enerjisini yayımlar.

Gama ve X-ışınlarının şiddetini azaltmak veya soğurmak için genellikle kurşun plaka (levha) kullanılır. Ancak, kurşun elementinin sağlık açısından birçok negatif etkisinin olduğu yüzyıllardır bilinmektedir. Nükleer santraller, hastanelerin radyolojik birimleri ve bilimsel araştırma laboratuvarlarında zırhlama malzemesi olarak kullanılan kurşun, bunlardan başka yaşamın birçok alanında aktif olarak kullanılmaktadır. Kurşun, çocuklarda sinir sistemi hasarına neden olarak gelişimsel gecikmelere, zekâ geriliğine ve organ hasarlarına neden olabilir. Yetişkinler de ise kan basıncı, doğurganlık ve bilişsel yetenek eksikliklerine sebep olabilmektedir. Günümüzde, radyasyon zırhlama malzemesi olarak yaygın kullanılan kurşun levhalar yerini alabilecek yeni bir malzeme arayışı hızla devam etmektedir. Bu malzemelerden biri de üretimi kolay ve maliyeti düşük olan polyester tabanlı farklı malzemeler ile katkılanmış kompozitler olabilir.

Polimer kompozit malzemeler pratikte yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bilimsel araştırmalarda kullanımı ise gün geçtikçe sürekli olarak artmaktadır. Bu materyaller ile yapılan çalışmaların gelecekte çok daha yeni alanlarda kullanımına yol açacağı şüphesizdir. Yapı ve özellikleri hususunda polimer kompozitler cam ve karbon plastikler, polimer betonlar, vernik boya malzemeleri, ahşap polimer malzemeleri, güçlendirilmiş elastomerler gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. Katkı malzemesinin polimere eklenmesi malzemenin özelliklerinde değişikliklere neden olmaktadır ve bu değişiklikler arzu edilen yönde değiştirilebilmektedir. Ayrıca, polimere dolgu malzemenin eklenmesi malzeme üretiminin maliyetinde de düşüşe neden olacağı dikkatten kaçmamalıdır. Pratikte dolgu malzemesi kullanımı, polimer özelliklerinin ve oluşan kompozitin özelliklerinin geniş bir aralıkta değişmesine olanak sağlar. Mükemmel yapısal ve mekanik özellikleri nedeniyle polimer kompozitlerin endüstri ve enstrüman tasarımında, otomobil endüstrisinde, inşaat mühendisliğinde, tarımda ve diğer birçok alanda kullanımları umut verici görünmektedir.

Polimer kompozitler ambalaj malzemeleri, otomotiv, sağlık, elektronik, havacılık, makine mühendisliği, inşaat gibi yaşamın birçok alanında geniş bir yelpazede uygulama alanı bulunan ve hızla gelişmeye devam eden kompozit türüdür. Bu tür kompozitler elektriksel, optik, manyetik ve yapısal anlamda sahip oldukları ilginç özelliklerinden dolayı son yıllarda çok ilgi çeken malzemeler olmuşlardır. Polimer kompozit malzemeler, bir polimer matriks ve dolgu maddesinden oluşan çok bileşenli bir malzeme olarak tanımlanabilir. Dolgu maddesi olarak organik ve inorganik kimyasallar kullanılabilir. Polimer malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirmek için inorganik bileşikler ile desteklenmesi gerekir. Bu inorganik bileşikler malzeme içinde bulunan elementlerin ortalama atom numaralarının etkinliğini ve malzemenin yoğunluğunun artışına destek verecektir. Bu da malzemenin radyasyon zırhlama özelliğinde bir artış olmasına sebep olacaktır.

Bağlayıcı olarak kullanılan doymamış polyester reçinelerin imalatı son yıllarda artmıştır ve bunlar polimer kompozit malzemelerde kullanılabilmektedir. Bu bağlamda, sunulan tez önerisinde doymamış polyester tabanlı ve inorganik bileşikler ile katkılanmış polimer kompozitler hazırlanmıştır ve bunların gama radyasyonu azaltma özellikleri incelenmiştir. Doymamış polyester reçine ile metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt oktoat (%6) birleştirilerek bir polimer matriks hazırlanmış ve bu polimer matrikse dolgu malzemesi

olarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn malzemeleri belli oranlarda katkılanmıştır. Elde edilen polimer kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemek için kütle azaltma katsayıları, radyasyon koruma verimleri, radyasyon geçirme oranları, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değerleri, onda-bir kalınlık değerleri, serbest ortalama yol değerleri, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlik parametrelerinin deneysel ve teorik sonuçları elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radyoaktif kaynaklarından yayımlanan yirmi iki farklı enerjide ve HPGe dedektör yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilecek her bir deneysel sonuç, teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kurşun ve türevlerinin sıklıkla kullanıldığı radyasyon zırhlama alanında bunlara alternatif bir malzeme arayışı yıllardır sürmektedir ve bu arayış son yıllarda hız kazanmıştır. Bu arayış içerisinde olan birçok araştırmacı ve araştırma grupları birçok malzemeyi incelemiştir. Bu malzemeler arasında beton çeşitleri, alaşımlar, cam malzemeler gibi birçok materyal türü bulunmaktadır. Bashter (1996) sıradan, hematit-serpantin, ilmenit elimonit, bazalt-manyetit, ilmenit, çelik-hurda ve çelik-manyetit betonları için 10 keV-1 GeV aralığında foton enerjilerindeki kütle azaltma katsayıları ve lineer azaltma katsayılarını elde etmek için teorik hesaplamalar yapmıştır. Kullanılan betonların yoğunlukları 2,3 ile 5,11 g.cm⁻³ arasında değişmekteydi. İncelenen bütün numunelerin lineer azaltma katsayı değerleri 1,5 ila 6 MeV enerji arasında ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Akkurt vd. (2010) barit ve barit ile üretilen betonun foton azaltma katsayıları incelemiştir. Lineer azaltma katsayıları bu araştırmacılar tarafından 1 keV-1 GeV enerji aralığında incelenmiş, 662, 1173 ve 1332 keV’de bir NaI(Tl) dedektör içeren bir gama spektrometresi sistemi kullanılarak yapılan ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile kurşununkiler karşılaştırılmıştır. Kharita vd. (2011) borik asit, borik frit ve borax ilavesinin, karbonat ve hematit agregalarından yapılan iki radyasyon zırhlayıcı betonun radyasyon azaltma özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. İcelli vd. (2011) 1 keV–100 MeV enerji aralığında konsantre kolemanit ve emet kolemanit kili için Compton, fotoelektrik, nükleer çift oluşum, elektronik çift oluşum, toplam kütle azaltma katsayısı, elektron yoğunluğu ve etkin atom numarası gibi foton azaltma karakteristiklerini incelemiştir. Malzemelerin radyasyon zırhlama özelliği B₂O₃ içeriği açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışma tarafından iddia edilen en önemli vaatlerden biri, herhangi bir malzemedeki B₂O₃ içeriğinin fazla veya az olması, çevre, inşaat, radyasyon kalkanı ve nötron yakalama uygulamaları için tek başına tanımlayıcı bir parametre olmayabileceğidir.

B₂O₃ içeriğinin yanı sıra, eğer varsa bir malzemede bulunan SiO₂, CaO, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃, PbO, K₂O gibi diğer bileşiklerin kantitatif ve kalitatif analizinden konsantrasyon değerleri dikkate alınmalıdır. Kucuk vd. (2013) poliamid-6 (PA-6), poli-metil metakrilat (PMMA), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi polimerlerin 59,5, 511,0, 661,6, 1173,2, 1274,5 ve 1332,5 keV foton enerjilerinde kütle azaltma katsayılarını ölçmüşlerdir. Etkin atom numaraları (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunlukları (N_E), incelenen numuneler için elde edilen kütle azaltma katsayıları kullanılarak deneysel ve teorik açıdan ortaya konmuştur. Seçilen polimerlerin deneysel değerlerinin, teorik değer ile iyi bir uyum içinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Geraldelli vd. (2013) yedi adet doku benzeri maddenin (naylon, poliasetat, polimetilmetakrilat (PMMA), su, kas benzeri, kemik benzeri ve yağ benzeri) lineer azaltma katsayılarını ve saçılma özelliklerini karakterize etmişlerdir. Singh vd. (2015) dozimetride potansiyel uygulamaları olan bazı polimerler için kütle azaltma katsayılarını Monte Carlo simülasyon kodu (MCNP-4C) kullanarak farklı gama fotonu enerjilerinde (59,5, 279,1, 511,0, 661,6, 662,0, 1115,5, 1173,0, 117,2, 1274,5 ve 1332,5 keV) hesaplamışlardır. Hassan vd. (2015) iki tip nano-kurşun bileşiği ile katkılanmış betonlar üretmişlerdir ve bunların gama ışını zırhlama özelliklerini araştırmışlardır. Beton numuneleri yerel yapı malzemelerinin standartlarına göre hazırlanmış ve sırasıyla birlikte çökeltme ve oksalat öncü teknikleri kullanılarak hazırlanan farklı nano PbO ve PbTiO₃ oranları ile katkılanmıştır. Ek olarak, tanecik boyutunun beton zırhlama özellikleri üzerindeki etkisini kontrol etmek için ticari PbO₂ toz katkı maddesi kullanılmışlardır. Gama ışını azaltma özelliklerini, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co kaynakları kullanılarak 662, 1173 ve 1332 keV enerjilerde kurşun bileşiklerin ilave yüzdesinin bir fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. Pb bileşik katkılı beton numunelerde meydana gelen mikroyapı değişiklikleri, pozitron yok etme spektroskopisi (PAS) kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar normal beton ile karşılaştırılmıştır. Nano-PbO ile katkılanan betonun gama ışını azaltma özelliklerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Mann vd. (2015) 6 farklı polimer ve plastik malzeme (kemik benzeri plastik (B-100), polivinil klorür (PVC), hava-eşdeğer plastik (C-552), radyo kromik boyalı film (naylon bazlı), polietilen tereftalat (mylar), polimetil metakrilat (PMMA), beton (NBS)) için, kütle azaltma katsayıları, kütle-enerji azaltma katsayıları, etkin atom numarası, KERMA (birim kütle başına salınan kinetik enerji) gibi gama ışını etkileşim parametrelerini kullanarak 10keV-1400 keV enerji aralığında radyasyon zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Waly vd. (2015) bazı malzemeleri beton bileşimine çeşitli oranlarda ekleyerek, normal beton ile

karşılaştırma yapmak için numuneler hazırlamışlardır ve hazırlanan numunelerin lineer ve kütle azaltma katsayılarını, serbest ortalama yollarını ve yarı kalınlık değeri parametrelerini hesaplanmışlardır. 0,015 MeV – 15 MeV enerji aralığında katkılanan malzemelerin normal betonun radyasyon zırhlama özelliklerini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Sayyed (2016) 8 farklı akıllı polimerin gama ve nötron zırhlama özelliklerini incelemiştir. Gama zırhlama özellikleri için 1 keV ile 100 GeV enerji aralığında WinXCOM programı yardımıyla kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu değerlerini ve nötron zırhlama özellikleri için etkin uzaklaştırma tesir kesitlerini hesaplamıştır. Belgin vd. (2016) ilk defa izoflatik polyester (PES) matrisli iyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyon (IEMR) koruyucu kompozitlerinde doğal titanyum demir oksit dolgu malzemelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki çalışmalar sonucunda hazırlanan kompozitlerin kütle azaltma katsayılarının düşük enerji bölgelerinde temel kurşun performansının %80'ine ulaştığı gözlemlemiştir. Singh (2016) 1 keV–100 GeV enerji aralığında etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve kütle azaltma katsayısı gibi parametreleri yarı iletken ve sintilasyon dedektörler kullanarak bazı malzemeler için hesaplanmıştır. Deneysel elde edilen etkin atom numaraları ZXCOM programı ile elde edilen sonuçları teorik sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Vahabi vd. (2017) MCNP kodunu kullanarak bazı polimerler için kütle azaltma katsayısı sonuçlarını 59,5, 29,1, 511,0, 661,6, 662,0, 1115,5, 1173,2, 1274,5 ve 1332,5 keV foton enerjilerinde hesaplamıştır. Manjunatha (2017) 8 keV-1330 keV enerji aralığında değişen gama enerjilerinde polimetil metakrilat (PMMA) ve kapton polimid polimerleri için kütle azaltma katsayıları, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu parametrelerini belirlemiştir ve bu sonuçları teorik değerlerle karşılaştırarak aralarında uyum olduğunu gözlemlemiştir. Mirji vd. (2017) 10 sentetik polimerin (polietilen (PE), polistiren (PS), polikarbonat (PC), polivinil alkol (PVA), polivinil klorür (PVC), polietilen tereftalat (PET), polivinil pirolidon (PVP), politetrafloroetilen (PTFE), polipropilen (PP) ve polimetil metakrilat (PMMA)) kütle azaltma katsayılarını 14,4 keV-1332 keV gama enerji aralığında belirlemişlerdir ve bu sonuçlar için ikincil merteye polinom denklemi ve logaritmik enterpolasyon formülünü üretmişlerdir. Li vd. (2017a) W (tungsten) ve Er_2O_3 (erbiyum oksit) dolgu maddeleri içeren tek yönlü bazalt elyaf takviyeli epoksi reçine matriks kompozit laminantlar üretilerek kütle azaltma katsayılarını teorik olarak hesaplamışlardır. Dolgu içeriği ve gama ışın foton enerjisinin kompozitin zırhlama özelliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Li vd. (2017b) Er_2O_3 (erbiyum oksit) içeren radyasyon koruyucu bazalt lifi (BF) takviyeli epoksi matris

kompozitler üretmişlerdir ve 31 keV ile 662 keV enerji aralığında X ve γ -ışınlarının radyasyon zırhlama performanslarını incelemek için kütle azaltma katsayılarını NaI(Tl) dedektörü yardımıyla ölçmüşlerdir. Malkapura (2017) kendiliğinden yerleşen beton (PISCC) karışımlarını içeren yeni polimer sınıfının nötron radyasyonu koruyucu özelliklerini incelemiştir. Numunelerinin hazırlarken polietileni toz haline getirerek 3 farklı hacimde geleneksel beton karışımlarında nehir kumunun yerine kullanmıştır. Tekin vd. (2017) WO₃ nano-parçacıklarının kütle azaltma katsayılarını MCNPX (2.4.0 versiyonu) kodu kullanarak araştırmışlardır. Saf betonlar ile nano WO₃ katkılı betonları ve mikro WO₃ katkılı betonları karşılaştırmışlardır. Bhosale vd. (2017) polioksimetilen (CH₂O), poliakrilonitril (C₃H₃N), doğal kauçuk (C₅H₈), polietil akrilat (C₅H₈O₂), polifenil metakrilat (C₁₀H₁₀O₂) ve polietilen tetraftalat (C₁₀H₈O₄) polimerleri için etkin atom numaraları, kütle azaltma katsayıları ve etkin elektron yoğunlukları parametrelerini incelemiştir. Bu parametreleri elde etmek için deneysel çalışmalarında NaI(Tl) dedektör ve ⁵⁷Co, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co ve ²²Na radyoaktif kaynaklarından yayımlanan 122, 356, 511, 662, 840, 1170, 1275 ve 1330 keV enerjili fotonları kullanmışlardır. Singh vd. (2017) çelik cüruf ve iki tip (yumuşak ve sert) demir cürufu kullanarak 10 farklı numune hazırlanmışlardır. Dar ışın geometrisini kullanarak düşük ve orta enerji aralığında (60 keV, 136 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV) farklı gama radyasyonu madde etkileşim parametrelerini teorik olarak hesaplanmışlardır ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Tekin vd. (2017) beton, tuğla ve çimento sıvaları için MCNP-X (version 2.4.0) kodunu kullanarak 59,5, 356, 662, 1173, 1274 ve 1333 keV enerjilerinde kütle azaltma katsayılarını hesaplanmışlardır. Mkhairber vd. (2018) temel malzeme olarak epoksi ve takviye olarak farklı katkı oranlarında (%10, %20, %30, %40, %50) C, Ni, PbO ve Bi kullanarak ve 1x10x10 boyutlarında kompozit malzeme üretmişlerdir. 1218 keV-1480 keV enerji aralığında, NaI(Tl) dedektörü yardımıyla ölçümler yaparak bu kompozitlerin lineer azaltma katsayılarını, etkin atom numaralarını ve yarı kalınlık değerlerini belirlemişlerdir. Elde edilen parametreleri inceleyerek takviye oranı ve gama ışını enerjisinin radyasyon zırhlama özelliklerini değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Hazırlanan kompozitler, sırasıyla termogravimetrik analiz ve çekme testi yöntemleri kullanılarak termal dirençleri ve mekanik özellikleri bakımından da araştırılmıştır. Kurşun monoksitin polimere eklenmesi, termal direncini ve gerilme özelliklerini kötüleştirirken, bu gözlenen olumsuz etkilerin, kil nano-parçacık tarafından azaltılabileceğini rapor etmişlerdir. Kompozitlerin gama zırhlama performansını ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co radyasyon

kaynakları kullanarak değerlendirmişlerdir. PbO içeriğinin artması ile kompozitlerin lineer azaltma katsayılarının ve kütle azaltma katsayılarını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Alshipli vd. (2018) epoksi reçinesi ile bağlanmış *Rhizophora* spp. katkılı kompozitlerin lineer ve kütle azaltma katsayılarını üç farklı ağırlık yüzdesinde (%5, %10 ve %15) teorik olarak hesaplamışlardır ve insan karaciğer dokusu ve suyun aynı enerjilerde deneysel ölçümleriyle kendi sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Numunelerin lineer ve kütle azaltma katsayılarını ölçmek için ^{241}Am ve ^{109}Cd nokta kaynaklarından yayımlanan 26,3, 59,5 ve 88,0 keV enerjilerini kullanmışlardır. Li vd. (2018) bir polimer matrisine eklenen bizmut nano-parçacıklar ile hazırlanmış olan kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerinin aynı kütle oranındaki mikro-parçacıklardan birkaç kat daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir. Mikro-parçacıkların kütlesinin %2'si kadar nano-parçacık kullanıldığında radyasyon zırhlama özelliklerinin yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Yani, radyasyon zırhlamada nano yapıların daha etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Hassanzadeh (2018) MnFe_2O_4 nano-parçacıkları ile üretilmiş yeni bir materyalin gama ışını azaltma katsayılarını ve etkin doz oranlarını SiO_2 nano-parçacıkları içeren beton malzemesinin teorik ve deneysel sonuçları ile karşılaştırmıştır. Büyükyıldız vd. (2018) polietersülfon, polieterimid, akrilonitril bütadien stiren kopolimeri, poliamid 66, polifitalamit ve polipropilen kopolimerler, yüksek performanslı polimerler ve takviye olarak cam ve karbon fiberler kullanılarak numuneler hazırlamışlardır. Bu numunelerin etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları, kütle azaltma katsayıları, serbest ortalama yolları, yarı kalınlık değerleri, enerji soğurma ve maruz kalma biriktirme faktörlerini (EABF ve EBF) farklı foton enerjilerinde araştırmışlardır. Deneysel ölçümlerini ise 81-356 keV enerji aralığında gerçekleştirmişlerdir. Cherkashina (2019) bizmut silikatın, poliimid matriks tabanlı radyasyon koruyucu bir kompozit için dolgu maddesi olarak kullanılması olasılığını ve perspektifleri hakkında bilgiler sunmuştur. 0,4 MeV ve 0,662 MeV gama enerjilerinde kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini deneysel olarak belirlemiştir. Kaçal vd. (2019) gamma-ışını azaltma özelliklerini 8 farklı polimer (polyamid (naylon 6) (PA-6), poliakrilonitril (PAN), polivinilidendeklorür (PVDC), polianilin (PANI), polietileneterftalat (PET), polifenilen sülfür (PPS), poliprol (PP) ve polietilen (PPR)) için yüksek çözünürlüklü HPGe dedektör yardımı ile 81 keV - 1333 keV enerji aralığında farklı radyoaktif kaynakları kullanarak incelemişlerdir. Tüm polimerlerin lineer azaltma katsayılarını düşük enerjilerde hızla azaldığını ve 267 keV ile 835 keV enerji bölgesinde ise artan enerji ile keskin olmayan bir şekilde azaldığını

gözlemlemişlerdir. Sharma vd. (2019) bizmut (III) oksiklorür (BiClO) katkılı polimer betonların gama zırlama özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen polimer kompozitlerde doymamış polyester, BiClO, metil etil keton peroksit (MEKP) ve %6 kobalt oktoat (CO-6) sırasıyla reçine, dolgu maddesi, başlatıcı ve hızlandırıcı olarak kullanmışlardır. Radyoaktif nokta-izotop kaynaklarından (^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am) yayımlanan 59,5 keV ile 1408,0 keV arasındaki 22 farklı enerjide HPGe dedektör yardımı ile deneysel ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen deneysel verileri, FLUKA kod sonuçları ve XCOM sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Tekin vd. (2020) Fe takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Bu kompozitlerin radyasyon zırlama özellikleri lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, HVL, TVL, MFP ve etkin atom numarası değerlerini belirlemişlerdir. Kütle azaltma katsayısını belirlemek için dar ışın geometrisini kullanmışlardır. Ölçülen sonuçlar XCOM ve Monte Carlo programları ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. En yüksek Fe ilavesi (%20) olan kompozitin radyasyon zırlamasının daha iyi olduğu tespit etmişlerdir. Akman vd. (2020) farklı oranlarında katkılanmış PbI_2 içeren polimer kompozitlerin radyasyon koruma özellikleri incelenmişlerdir. Hazırlanan kompozit %5, %10, %15 ve %20 oranlarında PbI_2 ile katkılanmıştır. 8 radyoaktif nokta kaynak 59,5keV- 1408,0 keV enerji aralığında HPGe dedektörü kullanarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. PbI_2 ile %20 katkılanmış kompozitin daha iyi bir zırlama sağladığı tespit edilmiştir. Özkalaycı vd. (2020) ise katkısız bir polimer kompozitin ve PbCl_2 içeren polimer kompozitin radyasyon koruma özellikleri incelenmişlerdir. PbCl_2 ve polyester reçinesi sırasıyla dolgu ve baz malzemeleri olarak kullanılmıştır. Örneklerin deneysel verileri bir HPGe ü kullanılarak alınmış ve 59,5keV - 1408,0 keV aralığındaki enerjilerle ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{57}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{54}Mn ve ^{60}Co radyoaktif nokta kaynakları kullanılmıştır. Deneysel veriler hem FLUKA koduyla simüle edilen verilerle hem de WinXCOM'da teorik olarak hesaplanan verilerle karşılaştırılmıştır. PbCl_2 (%20) polimer kompozitin, katkısız polimer kompozite göre radyasyondan korunma veriminin özellikle 59,5 keV enerjide %244 daha fazla olduğu belirlemişlerdir. Katkılanmamış olan numune ve PbCl_2 ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katkılanmış diğer polimer kompozit numuneleri karşılaştırıldığında %20 katkılı PbCl_2 örneğinin en iyi radyasyon koruma özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Akman vd. (2020) BaTiO_3 ve CaWO_4 ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katkılanmış iki grup polimer kompozit hazırlanmışlardır. Bu kompozitlerin radyasyon zırlama özelliklerini incelemek için 59,5 keV ile 1408,0 keV arasında bulunan 22 farklı enerjide HPGe ü kullanılarak lineer azaltma

katsayısı, HVL (yarı kalınlık değeri), radyasyon koruma verimliliği, serbest ortalama yol ve etkin atom numarası parametrelerini belirlemişlerdir. Karşılaştırılan deneysel ve teorik değerler sonucunda %20 oranında katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerinin çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta, %20 CaWO_4 kompozitinin %20 BaTiO_3 kompozitinden daha iyi bir zırhlama sağladığı bulmuşlardır. Kacal vd. (2020) Zn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin gamma-ışını azaltma özelliklerini incelemişlerdir. HPGe ü yardımıyla 59,5keV-1408,0 keV enerji aralığında hazırlanan kompozitlerin kütle azaltma katsayılarını ölçmüşlerdir. Zn ilavesi arttıkça zırhlama özeliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Tekin vd. (2020) $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ katkılı polimer kompozitler üretmişlerdir. Üretilen yeni polimer kompozit malzemelerin nükleer zırhlama performansını, farklı enerjilerde deneysel ve WinXCOM teorik programını kullanarak belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar MCNP-X simülasyon programı kullanılarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ek olarak, gama, nötron, proton ve alfa radyasyonu için çok çeşitli koruma parametreleri incelenmiştir. Gama radyasyonu için kütle azaltma katsayıları (μ_m), yarı kalınlık değeri (HVL), onda bir kalınlık değeri (TVL), serbest ortalama yol (MFP), lineer azaltma katsayıları (μ), etkin atom numarası (Z_{eff}) gibi pek çok parametreyi belirlemişlerdir ve bazı parametrelerdeki (HVL, TVL, MFP) daha düşük değerlerin, kompozit malzemenin daha iyi koruma özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Akman vd. (2021) HPGe dedektörü kullanarak farklı oranlarda CdTe katkılanmış %5, %10, %15 ve %20) polimer kompozitlerin gama ışını koruma özellikleri teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Katkılanma arttıkça koruma veriminde artış görüldüğü belirlemişlerdir. Akman vd. (2021) ferrokrom ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik radyasyon koruma özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel kütle azaltma katsayıları gama spektrometresi ve çeşitli radyoaktif nokta kaynakları kullanarak tayin etmişlerdir ve sonuçlar MCNPX kodu ile elde edilenlerle karşılaştırmışlardır.

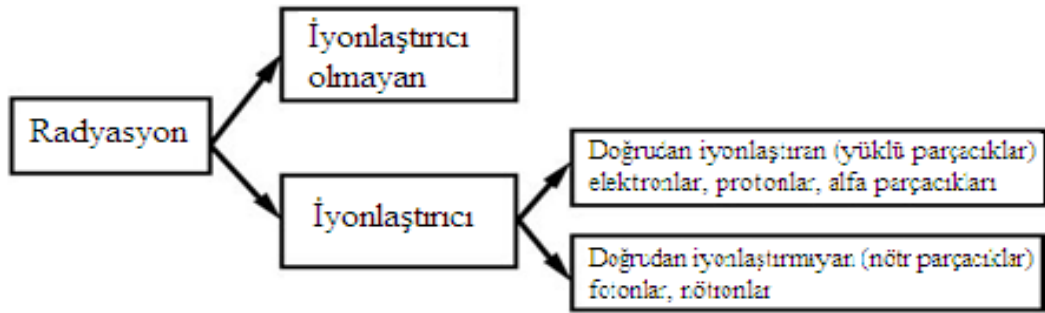
Güncel literatür incelenmesinden de görüldüğü gibi kompozit numuneler üzerine gerçekleştirilen radyasyon zırhlama çalışmaları nadirdir ve bu tür malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması günümüzde hız kazanmıştır. Hatta

polyester tabanlı inorganik malzeme katkılı polimer kompozitler üzerinde yapılan radyasyon zırhlama çalışmaları yok denecek kadar azdır. Hazırlanacak olan polyester tabanlı ve $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn katkılı kompozitler literatürde henüz hiç çalışılmamıştır ve ayrıca kütle azaltma katsayısı, radyasyon koruma verimi, radyasyon geçirme oranı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, serbest ortalama yol değeri, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametrelerinin geniş bir enerji aralığında (59,5 keV ile 1408,0 keV) incelendiği kapsamlı bir çalışma literatürde henüz bulunmamaktadır. Bu bağlamda önerilen tez ile bu alandaki bir boşluğun kapanmasına da destek verilmiştir

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Radyasyonun Sınıflandırılması

Radyasyon, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, maddeyi iyonlaştırma yeteneğine göre ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki ana kategoriye ayrılır. İyonlaşma atomlarının potansiyeli, yani bir atomu iyonlaştırmak için gereken minimum enerji, alkali elementler için birkaç eV tan, helyum gibi asal gazlar için 24,6 eV a kadar değişmektedir.



Şekil 3.1. Radyasyonun sınıflandırılması

- İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun enerjisi maddenin iyonlaşma potansiyelinden daha düşük olduğu için maddeyi iyonlaştıramaz.
- İyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi maddenin iyonlaşma potansiyelini aştığından maddeyi doğrudan veya dolaylı olarak iyonize edebilir. Bu radyasyon iki ana kategoriye içerir:
 - Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon; (yükü parçacıklar) elektron, proton, alfa parçacıkları, ağır iyonlar
 - Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon; fotonlar (X-ışınları, γ -ışınları), nötronlar

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, Coulomb etkileşimleri ve ortamdaki atomların yörünge elektronları ile iyonlaşmış yüklü parçacıkların arasındaki enerjiyi ortam boyunca depolar. Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon (fotonlar veya nötronlar) iki aşamalı bir süreç boyunca enerjiyi depolar. İlk adımda, yüklü bir parçacık ortam içinde serbest bırakılır (fotonlar, elektronları veya pozitronları serbest bırakır, nötronlar ise protonları veya daha ağır iyonları serbest bırakır). İkinci adımda, serbest bırakılan yüklü parçacıklar, tabaka elektronlarıyla direkt Coulomb etkileşimleri üzerinden ortam boyunca enerjiyi depolarlar. Hem doğrudan hem de dolaylı olarak iyonlaştırıcı radyasyonlar, özellikle kanser tedavisinde radyoterapi, terapötik radyoloji ve radyasyon onkolojisi alanlarında kullanılır.

3.1.1. Doğrudan İyonlaştırıcı Radyasyon Çeşitleri ve Kaynakları

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, çeşitli yüklü parçacık gruplarından oluşur; hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar), ağır yüklü parçacıklar olarak (protonlar, döteronlar ve alfa parçacıkları) ve daha ağır yüklü parçacıklar (örn. Karbon-12).

3.1.1.1. Elektronlar

Elektronlar medikal fizikte önemli bir rol oynarlar. Kanser tedavisinde doğrudan kullanılırlar, foton ve elektron doz birikiminden sorumludurlar ve radyasyon dozimetrik hesaplamalarda deneysel ve teorik olarak belirlenirler. Elektronlar genellikle oluştuğu olaya göre özel isimler alabilirler. Bunlardan bazıları;

- Fotoelektrik etki ile ortama salınan elektronlar, fotoelektronlar olarak adlandırılır.
- Compton etkisi ile ortama salınan elektronlara Compton ya da geri tepme elektronları olarak adlandırılır.
- Bir tabaka elektronu alanındaki veya çekirdek alanındaki çift oluşum etkileşimi tarafından ortama salınan elektronlar, çift oluşum elektronları olarak adlandırılırlar.
- Çekirdek tarafından β^- radyoaktif bozunma ile salınan elektronlar β elektronları olarak adlandırılırlar.
- 4 MeV ile 30 MeV enerji aralığında kinetik enerjiye sahip radyoterapide kullanılan lineer hızlandırıcılar, betatronlar veya mikrotronlar tarafından üretilen elektronlar, mega-voltaj elektronları olarak adlandırılırlar.

- Auger etkisi olayında üretilen elektronlar Auger elektronları, Coster-Kronig elektronlar veya Süper Coster-Kronig elektronlar olarak adlandırılırlar.

3.1.1.2. Pozitronlar

Pozitronlarda elektronlar gibi meydana geldiği olaya göre isimlendirilebilirler. Örneğin, çift oluşum veya üçlü oluşum tarafından üretilen pozitronlar çift oluşum pozitronları olarak adlandırılırken, çekirdeklerden β^+ radyoaktif bozunma ile salınan pozitronlar, pozitron emisyon tomografisinde (PET) kullanılır ve beta parçacıkları olarak adlandırılır. (Podgoršak 2006)

3.1.1.3. Ağır Yüklü Tanecikler

Radyoterapide kullanılmak üzere ağır yüklü parçacıklar; siklotronlar, senkrotronlar veya ağır parçacık hızlandırıcılarında çekirdeğin veya iyonların hızlandırılmasıyla üretilir.

- Proton: Hidrojen-1 (1_1H) atomunun çekirdeğidir.
- Döteron: Döteryum çekirdeği (2_1H) toplam 2,22 MeV bağlanma enerjisiyle birleştirilmiş bir proton ve bir nötrondan oluşan atomdur.
- Triton: Tritiyum çekirdeği (3_1H) toplam 8,48 MeV bağlanma enerjisiyle birleştirilmiş bir proton ve iki nötrondan oluşan atomdur.
- Helyum-3: helyum-3 (3_2He) atom çekirdeği toplam 7,72 MeV bağlanma enerjisi ile birleştirilmiş 2 proton ve 1 nötrondan oluşan atomdur.
- α parçacığı: helyum-4 (4_2He) atomunun çekirdeği toplam 28,3 MeV bağlanma enerjisi ile birleştirilmiş 2 proton ve 2 nötrondan oluşan atomdur.

3.1.1.4. Daha Ağır Yüklü Tanecikler

Daha ağır yüklü parçacıklar, karbon-12 ($^{12}_6C$), azot-14 ($^{14}_7N$) veya neon-20 ($^{20}_{10}Ne$) gibi çekirdek atomları veya daha ağır atomların iyonlarıdır.

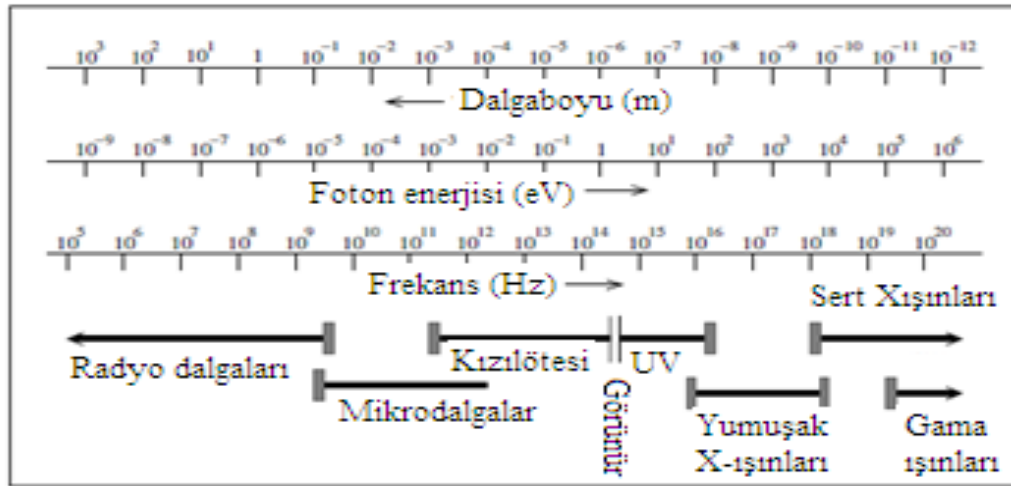
3.1.2. Doğrudan İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonun Sınıflandırılması

Dolaylı olarak iyonlaştırıcı foton radyasyonu dört ayrı foton grubundan oluşur:

- Karakteristik (flüoresan) X-ışınları; atomik kabuklar arasındaki elektron geçişlerinden kaynaklanır.
- Bremsstrahlung fotonları; elektron ile atom çekirdeğinin Coulomb etkileşimlerinden ortaya çıkmaktadır.
- Gama ışınları; nükleer geçişlerden meydana gelmektedir.
- Yok-olma enerjisi radyasyonu veya fotonu; çift oluşum sonu oluşan pozitron-elektron çiftinin tekrar birleşmesinden ortaya çıkan fotonlardır.

3.2. Fotonlar

Bir foton elektromanyetik enerjinin en küçük birimini temsil eder ve parçacık fiziğinin Standart Modelinde temel bir parçacık olarak işlem görür. Bu modelde fotonun durgun kütlesi olmadığı varsayılmaktadır. Foton bir ortamda hareket ederken, ortamla etkileşimi nedeniyle yavaşlar ve etkili bir kütle elde eder. Ancak, vakumda kütesiz olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.2. Elektromanyetik Spektrum

Fotonlar sadece görünür ışıığa karşılık gelmez. Aslında ışık, tam enerji spektrumunun çok dar bir bölgesini kapsar (bakınız Şekil 3.2). Ayrıca, gözle görülür ışık olarak gördüğümüz şey, tek tek fotonlardan ibaret sayılmaz, bunun yerine bir dizi fotonun üst üste binmesidir. Spektrumun görünür ışık bölgesinde olmayan fotonları üretmenin birçok yolu vardır. Örneğin, yüklü bir parçacık hareket ettiğinde (bir teldeki değişen bir akım gibi), etrafında

uzayda yayılan elektromanyetik dalgalar oluşturur. Bu dalgaların altında yatan elektromanyetik alandaki uyarma olarak kabul edilir ve bu uyarıların bir miktarına (kuantumuna) foton denir.

Bir fotonun taşıdığı enerji, etkileşime girdiği diğer parçacıklar tarafından çeşitli şekillerde soğurulabilir. Aynı zamanda, diğer parçacıklar gibi, bir foton diğer parçacıklardan yayılabilir ve hatta yerçekimine maruz kalabilir.

Radyasyona maruz kalma ve biyolojik hasar açısından genellikle gama (γ) ışınları, röntgen ışınları ve ultraviyole ışınları gibi yüksek enerjili fotonlar ile ilgileniyoruz. Enerjileri yüksek olan bu fotonlar daha derinlere nüfuz edebilir ve görünür ışık gibi düşük enerjili fotonlardan daha fazla hasara neden olabilir. Fotonların önemli bir özelliği, durgun kütlesi olmamasına rağmen momentum taşımalarıdır. E enerjisine sahip bir fotonun momenti p , frekans (ν), dalga boyu (λ) cinsinden,

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada c ışık hızını, h ise Planck sabitini ifade etmektedir. (Podgoršak 2006)

3.3. Foton Etkileşimleri

Bir fotonun tanımlanması, radyasyondan korunmadaki rollerinin oldukça iyi anlaşılmış olmasına rağmen zordur. Daha belirgin özellikleri durgun kütlesi değildir, daima ışık hızında hareket eder ve bir dalga olmasına rağmen parçacık olarak etkileşime girebilir. Bir fotonun yapısı veya bileşimi bilinmemektedir, ancak elektron gibi gerçek bir parçacıktır ve fiziksel bir büyüklüğü yoktur ve alt bileşenleri bulunmamaktadır.

Bir fotonun enerjisi $h\nu$, momentumu h/λ 'dır ve enerjisi, momentum cinsinden $E=pc$ olarak tanımlanabilir. Einstein, bir fotonun, durgun kütlesi olmamasına rağmen, bir parçacıkmiş gibi yerçekimine maruz kaldığını gösterdi. Fotonlar fizik alanında temel parçacıktır çünkü elektromanyetik enerjinin taşınması görevini üstlenirler.

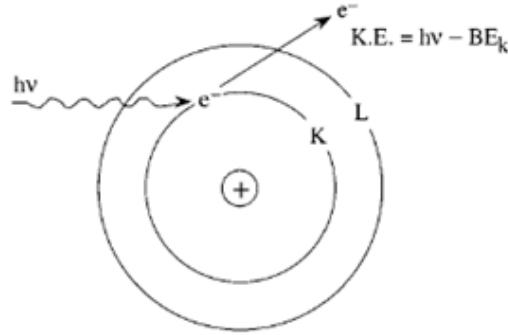
Fotonlar ilginç şekillerde ortaya çıkar. Örneğin yüksek enerji elde etmek istendiğinde Bremsstrahlung üretimi, radyoaktif dönüşüm veya nükleer etkileşimler ile ortaya çıkabilir. Hem bir dalga hem de bir parçacık olmanın ikilemi merak uyandırıcıdır, ancak ortamdaki foton etkileşimlerini açıklamak için her iki özellik de gereklidir. Girişim ve kırınım olaylarının kökeni ve görünümü açıkça dalga özellikleridir ve fotoelektrik ve Compton olaylarında ise parçacık özelliği ön plandadır. Her ikisinin de aynı anda var olabileceğini kabul etmek zordur, ancak her iki özellik de fotonları tamamen tanımlamak için gereklidir. Ne dalga ne de parçacık teorisi her zaman tamamen doğru değildir, ancak her ikisi de Bohr'un tanımladığı gibi birbirlerini tamamlayıcı niteliktedir.

Fotonların şiddetinin azaltılması ve enerji depolaması için maddeyle etkileşime girdiği temel olaylar; fotoelektrik etki, Compton olayı ve çift üretilimidir. Fotonlar ayrıca Rayleigh saçılması, Bragg saçılması, foto-parçalanma ve nükleer rezonans saçılması gibi başka olaylar ile de maddeyle etkileşime geçebilir. Ancak, bunlar ihmal edilebilir bir seviyededir ve radyasyondan korunma çalışmalarında genellikle göz ardı edilirler. (Martin, 2006)

3.3.1. Fotoelektrik Etki

Düşük enerjili bir foton, fotoelektrik etki olarak bilinen bir işlemle, bağlı bir tabaka elektronu ile etkileşime geçebilir ve onu atomda uzaklaştırılabilir. Elektron, gelen foton enerjisi ile elektronun tabakaya bağlanma enerjisi arasında fark kadar bir enerji ile atomdan fırlatılır. Elektronu yörüngesinden koparmak için gereken minimum enerji onun bağlanma enerjisi olarak adlandırılır. Etkileşim, bağlı bir elektron ile gerçekleşmelidir, çünkü bu koşullarda enerji ve momentum korunumu sağlanacaktır ve bu olay çoğu zaman iç kabuk elektronlarından biriyle gerçekleşir. Elektron kabuğunda bir boşluk yaratıldığı için, örneğin olayın K kabuğunda olduğunu varsayarsak, tipik olarak K kabuğunu doldurmak için

karakteristik bir X-ışını da yayılacaktır. Üretilen karakteristik X-ışınlarının ayrıca ortam içinde, tipik olarak başka bir fotoelektrik etkileşim veya Auger elektronlarının fırlatılması olaylarının meydana gelmesi çok muhtemeldir.



Şekil 3.3. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi

Şekil 3.3'te fotoelektrik olayın şematik gösterimi sunulmuştur. Şekilde, $h\nu$ gelen fotonun enerjisini, K.E. fırlatılan elektronun kinetik enerjisini ve BE_K ise elektronun K tabakasına bağlanma enerjisini göstermektedir. Fotoelektrik soğurma katsayısı τ , soğurucu malzemenin atom numarası (Z) ve gelen fotonun enerjisi (E) ile ilişkilidir ve bu ilişki aşağıdaki denklemde belirtilmiştir.

$$\tau \sim sbt. \frac{Z^{4-5}}{E^{3,5}} \quad (3.2)$$

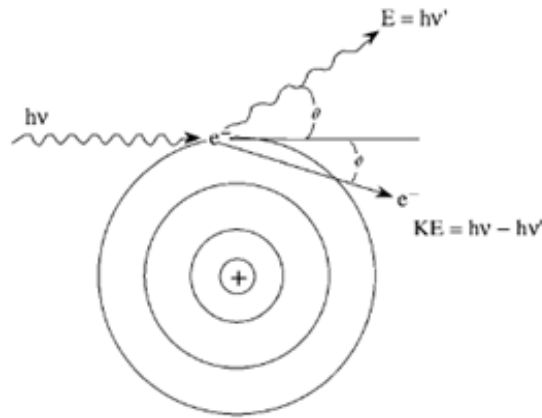
Z^4 bağımlılığı düşük enerjilerde geçerli iken Z^5 bağımlılığı olayın baskın olduğu daha yüksek enerjilerde geçerlidir. Fotoelektrik soğurmanın en çok yüksek atom numaralı malzemelerde ve düşük enerjili fotonlarda (0,5 MeV'den az) baskın olduğu denklem (3.2)'den açıktır. Kurşun gibi yüksek atom numaralı malzemelerde, L veya M X-ışınları yayılımı olabilir ve bunlar ya soğurucu ortamda emilecektir ya da fotonun maddeden geçişine katkı sağlayacaktır. Fotoelektrik etki aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sadece bağlı elektronlarla oluşur, çünkü enerji ve momentum korunumu bu şekilde sağlanacaktır.

- Etkileşim katsayısı, gelen fotonun enerjisinin tabaka elektronunun bağlanma enerjisine yakın olduğunda daha büyük değerler alacaktır. Buradaki şart gelen fotonun enerjisinin tabaka elektronunu sökebilecek düzeyde olmasıdır.
- Fotoelektrik soğurma katsayısı, Z^{4-5} ile doğru orantılıdır ve $E^{3,5}$ ile ters orantılıdır.

3.3.2. Compton Olayı

Compton saçılma etkileşimleri, orta enerjili (0,5-1,0 MeV) gama ışınları için özellikle önemlidir ve düşük atom numaralı malzemeler için baskın bir olaydır. Compton saçılması, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, gelen fotonun "serbest" veya çok gevşek bir şekilde bağlı bir elektron ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir olaydır. Hem enerji hem de momentum bu olayda korunur.



Şekil 3.4. Compton olayının şematik gösterimi

Gelen fotonun dalga boyundaki değişim, yaygın olarak Compton kayması olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad A^\circ \quad (3.3)$$

eşitlikte, $\Delta\lambda$ dalga boyundaki değişimi, h Planck sabitini, m_0c elektronun durgun kütesini ve θ ise gelen ve saçılan fotonlar arasındaki açıyı temsil eder.

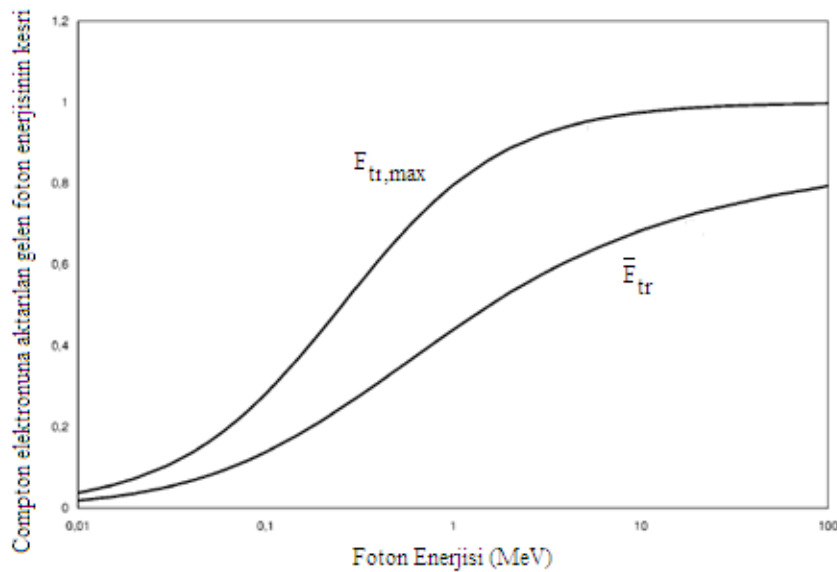
Fotonun dalga boyundaki değişiminin (veya enerjideki azalmanın) sadece saçılma açısı ile belirlenmesi dikkat çekicidir. Genellikle Compton dalga boyu olarak adlandırılan h/m_0c

terimi $2,426 \cdot 10^{-12}$ m değerine sahiptir. Geri tepen elektrona enerji transferi, radyasyon dozu oluşturmak için bölgesel olarak soğurma yapıldığında Compton etkileşimlerinin en önemli sonucudur. Bu değişken bir miktardır ve dışarı atılmış elektronlar için sıfırdan maksimum bir değere kadar değişebilir.

Compton elektronuna aktarılan foton enerjisinin $h\nu$ oranı Şekil 3.5'te gösterilmektedir; E_{tr} değeri, saçılma açısına bağlıdır; burada $\bar{E}_{tr}$, rastgele işlemlerden dolayı ortalama değerdir ve $E_{tr,max}$, maksimum saçılma açısı (180°) için verilmiştir.

Compton tesir kesiti, etkileşime girilen malzemenin atom numarası ile doğru ve gelen fotonun enerjisi ile ters orantılıdır.

$$\sigma \sim sbt. \frac{Z}{E} \quad (3.4)$$



Şekil 3.5. Compton elektronuna aktarılan foton enerji kesrinin grafiksel olarak gösterimi

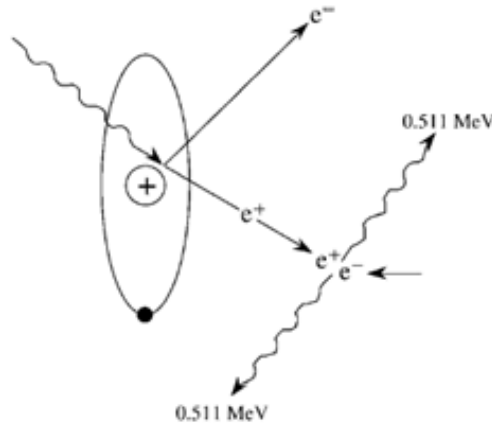
Compton Saçılması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Compton etkileşimi bir foton ve geri tepme elektronu üreten ve bir "serbest" elektron ile bu elektronun bağlanma enerjisine göre çok yüksek enerjiye sahip bir foton ile meydana gelir.

- Elektronu aktarılan kinetik enerji, saçılan fotonun saçılma açısına doğrudan orantılıdır ve ortalama olarak foton enerjisi ile artar.
- Compton tesir kesiti artan enerji ile azalır ve artan atom numarası ile artar. Bu bağımlılıklar fotoelektrik etkiye göre daha düşüktür.
- 100 keV'in üzerinde enerjili fotonlar için, Compton etkileşimleri düşük atom numaralı malzemelerde, fotoelektrik veya çift üretim etkileşimlerinden çok daha baskındır. (Martin, 2006)

3.3.3. Çift Oluşum

Yüksek enerjili ($>1,022$ MeV) bir foton, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bir çekirdeği çevreleyen güçlü elektromanyetik alanla etkileşime girdiğinde, enerjisi, biri negatif olarak yüklenen (elektron) bir çift elektron kütlelerine dönüştürülebilir; bunlardan biri negatif yüklü (elektron) ve diğeri, pozitif yüklü olan pozitronudur. Ayrıca bir pozitron, bir elektron ve bir geri tepme elektronundan oluşan, bir elektronun Columb alanında meydana gelen üçlü oluşum olarak adlandırılan bir olay da mevcuttur. Çift oluşum, bir fotonun enerjisinin kütleye dönüştüğü, Einstein'ın özel görelilik teorisinin klasik bir örneğidir ve pozitron ve elektron kütleleri oluşuktan sonra kalan enerjinin ($h\nu - 1,022$ MeV) elektron ve pozitrona aktarılmasından dolayı enerjinin korunduğu bir olaydır. Kalan bu enerji $e^+ e^-$ çiftlerinin kinetik enerjileri olarak ortaya çıkar, fakat bu enerji eşit olarak paylaşılmaz. Pozitif yüklenmiş çekirdek, elektronu çekerken ek bir tepme sağlayan pozitif yüklü pozitronu iter ve böylece kinetik enerjisinde bir azalma ile yavaşlar. Bu şartlar nedeniyle, pozitron, ortalama elektrondan maksimum 0,0075.Z kadar daha fazla kinetik enerji almalıdır. Pozitron ve elektron tarafından çift oluşum etkileşimlerinde paylaşılan enerjideki küçük fark, radyasyon dozimetrisi veya saptaması nedeniyle çok azdır, çünkü mevcut enerji, $h\nu - 1,022$ MeV, nasıl paylaşıldığına bakılmaksızın, aynı ortalama sonuç ile söğurulacaktır.



Şekil 3.6. Çift oluşum olayının şematik gösterimi

Çift oluşum etkileşimlerine ayrıca Şekil 3.6’da gösterilen her biri 0,511 MeV’lik iki yok olma fotonunun emisyonu eşlik eder. Pozitron, momentum ve kinetik enerjiye sahip olduğu sürece ayrı bir parçacık olarak var olacaktır. Bununla birlikte, tamamen soğurulduğunda, madde dünyasında anti maddesi olarak bilinen, pozitronun negatif yüklü bir elektronla etkileşime girmesi sonucu iki adet 0,511 MeV’lik foton vererek ortadan kaybolur, yani, kütle enerjiye dönüşür. Bu nedenle, yüksek enerjili fotonların soğurulması, foton enerjisinin bir elektron ve bir pozitron ürettiği, iyonlaşma yolu boyunca $h\nu - 1,022 \text{ MeV}$ kinetik enerjiye sahip iki parçacığa dönüşen, ardından kütleyi tekrar enerjiye dönüştürmek için serbest elektron ile pozitron yok etme işlemi olan karmaşık bir enerji yayılımı olayıdır.

Çift oluşum tesir kesiti (κ), 1,022 MeV’den (elektron-pozitron çifti oluşturmak için gerekli enerji) daha büyük enerjili fotonlar için atom numarası Z ’nin karesiyle ve gelen foton enerjisi E ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki ilişkiye sahiptir,

$$\kappa \sim sbt \cdot Z^2 \cdot (E - 1,022) \quad (3.5)$$

buradaki Z , atom numarasını ve E ise MeV cinsinden foton enerjisidir.

Çift oluşum olayı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

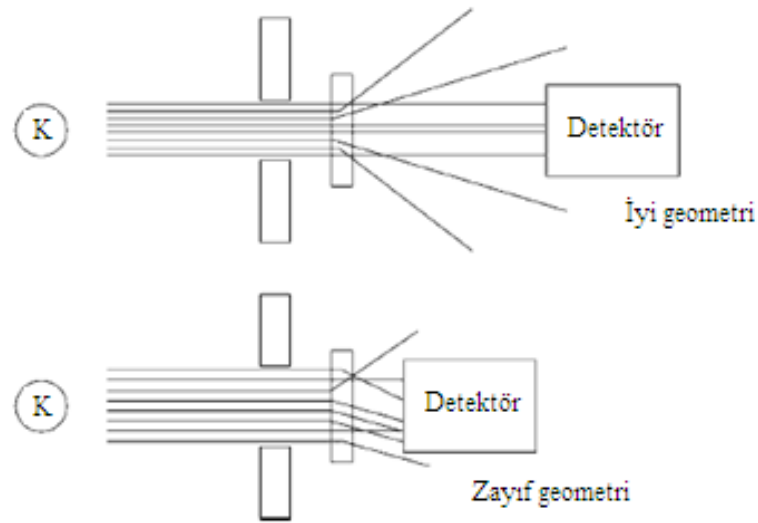
- Kinetik enerjili iki elektron kütlesi üretmek için esas olarak çekirdek alanında $h\nu \geq 1,022 \text{ MeV}$ olan fotonlar ile meydana gelirler.
- Pozitron ve elektron arasında paylaşılan kinetik enerji, $h\nu - 1,022 \text{ MeV}$ ’dir.

- Pozitron, iki adet 0,511 MeV'lik fotonlar üretmek için kinetik enerjisini dağıttıktan sonra serbest bir elektron ile yok olur.
- Tesir kesiti, 1,022 MeV eşiğinin üzerindeki enerji ile hızlı bir şekilde artar ve yaklaşık olarak Z^2 ile değişir. (Martin, 2006)

3.4. Fotonun Madde İçinde Azaltılması

Fotonun madde ile etkileşimi yüklü parçacıklarla etkileşimlerinden oldukça farklıdır. X-ışınları veya gama ışınları maddenin içinden geçtiğinde, bazıları soğurulur, bazıları etkileşim olmadan doğrudan geçer ve bazıları birincil ışındakilerden oldukça farklı yönlerde düşük enerjili fotonlar olarak saçılır.

Bir foton ışınının bir soğurucu tarafından azaltılması, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, “iyi geometri” veya “zayıf geometri”de meydana gelmesi ile karakterize edilir. Etkileşen her foton, uzaktaki bir dedektörü etkilemeyecek şekilde birincil ışından soğurulduğunda veya saçıldığında iyi bir geometri ortaya çıkar. İyi geometri mevcut olduğunda soğurucunun içinden hiçbir etkileşime girmeden doğrudan geçen fotonlar, dedektöre ulaşacak ve bu fotonların her biri, tüm orijinal enerjilerine sahip olacaktır. Bu durum, birincil fotonlar dar bir ışınla sınırlandırıldığında ve dedektör küçük ve dağınık fotonların yeterince büyük bir açısına sahip olması için yeterince uzakta olduğunda ortaya çıkar. Bu durumdan dolayı, geometri “dar ışın” geometrisi olarak da tanımlanır. Soğurucu varken ve yokken yapılan dar ışın geometrisi ile alınan ölçümler, foton kesrinde büyük bir verime sahip olacaktır. Zayıf geometride veya “geniş ışın geometrisinde”, saçılan fotonların önemli bir kısmı, etkileşim olmadan iletilenlere ek olarak, dedektöre ulaşacaktır. Bir dedektöre ulaşan fotonlar daha sonra birçok enerjinin saçılan fotonları ve asıl olarak birincil ışında bulunan saçılmamış fotonları içeren karmaşık bir enerji spektrumuna sahip olacaktır. Bu geometri ile alınan ölçümlerde elde edilen spektrumun altında kalan alanın belirlenmesi oldukça zordur.



Şekil 3.7. İyi ve zayıf geometrinin şematik gösterimi

Hemen hemen tüm madde foton etkileşimlerinin bir dedektöre ulaşan foton sayısını azalttığı “iyi geometride” ve foton ile dedektör arasındaki ilişkinin saçılan fotonların dedektöre ulaşacağı şekilde olduğu "zayıf geometri"de foton ışınının azaltılması Şekil 3.7’de görülmektedir. Belirli enerjili fotonların azaltma katsayılarını dar bir ışın veya iyi geometri koşulları altında belirlemek daha uygundur.

İyi geometride foton şiddetindeki değişim (Şekil 3.7’de gösterildiği gibi), soğurucu kalınlığının bir fonksiyonudur ve matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$-\frac{dI}{dI_0} = \mu dx \quad (3.6)$$

Burada μ orantılılık sabiti, x soğurucu kalınlığı, I ve I_0 ise başlangıçtaki ve soğurucudan geçtikten sonraki foton şiddetidir.

Fotonların tümü aynı enerjiye sahipse (yani ışın mono-enerjik ise) ve fotonlar iyi geometri koşulları altında azaltılmışsa (yani, ışın dar ve saçılan fotonlar içermiyorsa), denklem (3.6) bu şartlarda düzenlenirse:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{dI_0} = \int_0^x -\mu x \quad (3.7)$$

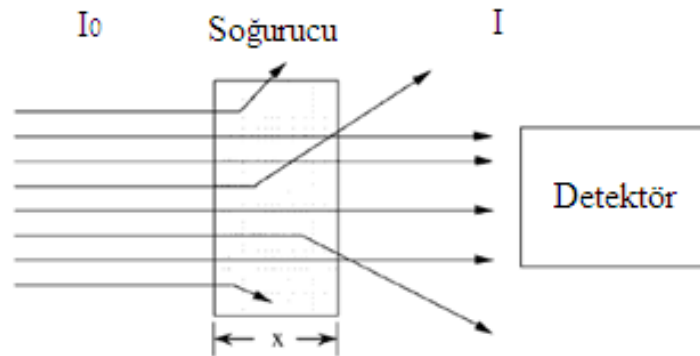
bu denklemin integrali alınırsa:

$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (3.8)$$

elde edilir. Bu denklem üzerinde gerekli matematiksel işlemlerden yapıldıktan sonra:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada I_0 radyoaktif kaynaktan yayımlanan radyasyon şiddetini, I soğurucudan geçtikten sonra dedektör tarafından sayılan radyasyon şiddetini, μ orantı sabiti lineer azaltma katsayısını ve x soğurucu kalınlığını ifade etmektedir. Denklem (3.9) Beer-Lambert Kanunu olarak bilinmektedir. Bu ifadeye göre radyasyon şiddetinin üstel azalması, foton şiddetinin teorik olarak tamamen soğurulamayacağını ifade eder. Ancak, radyasyon şiddeti algılanamayacak (veya ölçülemeyecek) seviyelere düştüğünde tamamen soğurma olmuş gibi düşünülebilir. Soğurucudan geçtikten sonra radyasyon şiddetindeki azalmanın şematik gösterimi Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Radyasyon şiddetindeki azalmanın şematik gösterimi

3.5. Lineer Azaltma Katsayısı

Radyasyon şiddeti ve lineer azaltma katsayısı arasındaki ilişki fotoelektrik, Compton ve yeterli enerjili fotonlar için çift oluşum olayları ile açıklanabilir. Yani bu üç olay foton şiddetinin azaltılmasında baskın olaylardır. Ayrıca, dar ışın geometrisinde, bir foton

şiddetinin, x kalınlığında bir soğurucu ile etkileşime girmesi için toplam olasılık, her bir olayın bireysel olasılıkları çarpılarak elde edilir:

$$I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\tau x} \cdot I_0 e^{-\sigma x} \cdot I_0 e^{-\kappa x} = I_0 e^{-(\tau+\sigma+\kappa)x} \quad (3.10)$$

burada, lineer azaltma katsayısı, bir ortamdaki foton etkileşimi ana olayların her birinin olma olasılığının toplamıdır.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3.11)$$

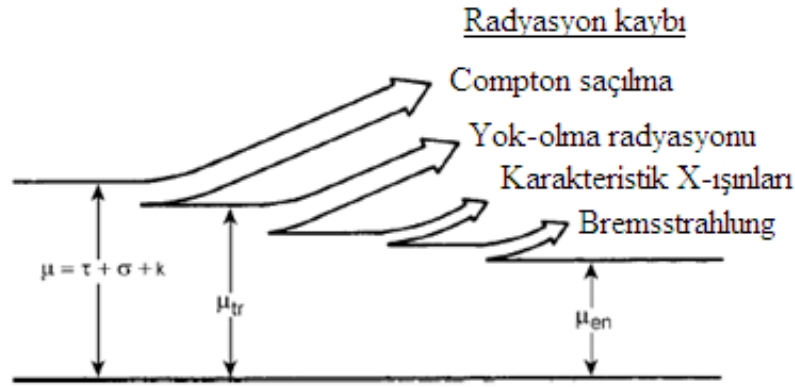
τ , σ ve κ sırasıyla fotoelektrik, Compton ve çift oluşum tesir kesitleridir.

Her bir olay foton enerjisine ve soğurucunun atom numarasına bağlıdır. Bu ihtimaliyetlerin toplanması sonucu lineer azaltma katsayısı elde edilir. Foton şiddetinin soğurucu kalınlığına göre yarı logaritmik grafiği lineer bir çizgi olacağından soğurucu malzemenin yoğunluğuna bağlı olan bu azaltma katsayısı lineer azaltma katsayısı adını almıştır.

Radyasyona maruz kalma veya fotonlardan soğurulan doz, doku gibi bir ortamı geçerken çeşitli foton etkileşimleri tarafından biriken enerji miktarı ile belirlenir. Bazı etkileşimler ortamdaki enerji taşıyan radyasyon enerjisi ürettiğinden, lineer azaltma katsayısı, bir ortamdaki enerji birikimini belirlemek için kullanılamaz. Sonuç olarak, bu kaybı hesaba katan lineer bir enerji soğurma katsayısı μ_{en} tanımlanmıştır:

$$\mu_{en} = \mu - (\sigma + \text{diğer düşük olasılıklı etkileşimler}) \quad (3.12)$$

Ortamdan sayılmadan kaçabilen radyasyon enerjisi üretebilen olaylar, etkileşmeyen Compton saçılmış fotonlar, yüksek enerjili geri tepme elektronlarından kaynaklanan Bremsstrahlung, $h\nu > 1,022$ MeV ise yok olma radyasyonu ve etkileşmeyen karakteristik X-ışınlarıdır. Bu sayılmayan olayların lineer azaltma katsayısı üzerindeki etkileri Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

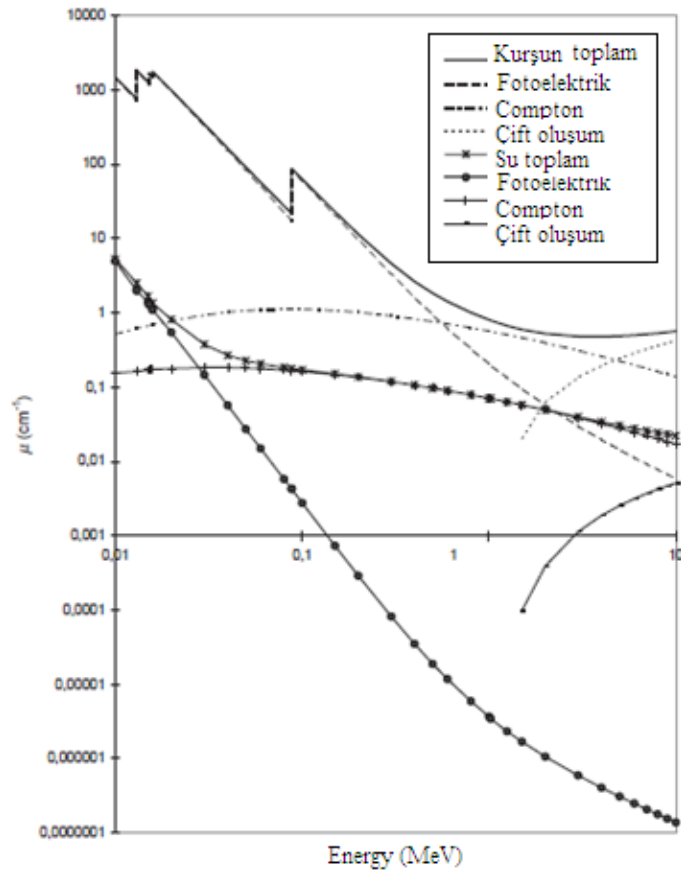


Şekil 3.9. Lineer azaltma katsayısı (μ), enerji transfer katsayısı (μ_{tr}) ve lineer enerji azaltma katsayısı (μ_{en}) olayları arasındaki ilişki

cm^2/g biriminde μ_{en}/ρ kütle enerji azaltma katsayısı, bir X-ışını veya gama ışını şiddeti bilindiğinde veya belirlendiğinde radyasyona maruz kalmanın veya maruz kalınan dozun belirlenmesinde en faydalı parametredir.

3.6. Foton Enerjisinin ve Soğurucu Atom Numarasının Foton Azaltılmasındaki Önemi

Radyasyondan korunma çalışmalarının çoğu, bireysel etkileşimler için tesir kesitleri yerine lineer azaltma katsayısı μ veya toplam kütle enerji azaltma katsayısı μ_{en}/ρ (radyasyon dozu hesaplamaları için) ile yapılır. Bununla birlikte, her bireysel etkileşim sürecinin özellikleri, farklı malzemelerdeki çeşitli enerjilerde hangisinin en önemli olduğunu belirler. Fotonların azaltma (veya soğurma) katsayıları gelen fotonun enerjisi ve soğurucu malzemenin atom numarası ile önemli ölçüde değişir. Şekil 3.10'da su ve kurşun elementi için enerji ve atom numarası ile lineer azaltma katsayısının ve tesir kesitlerinin nasıl değiştiği görülmektedir.

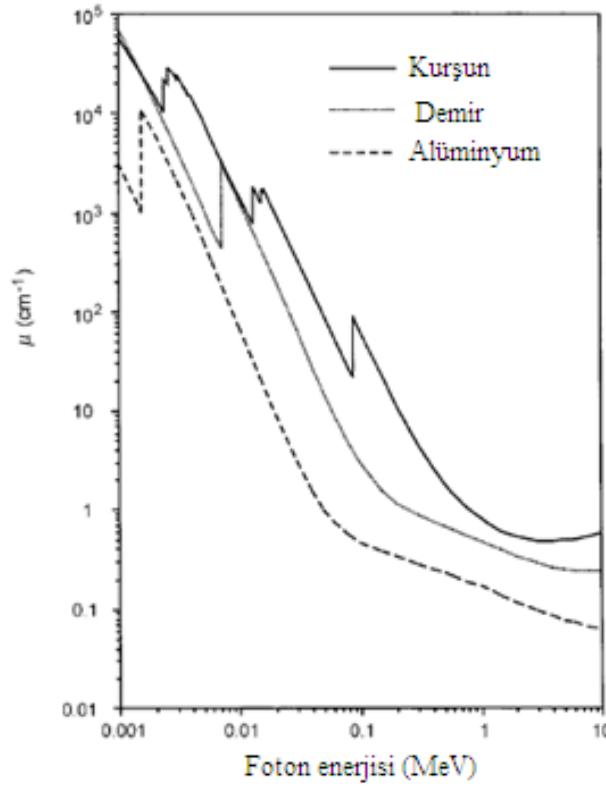


Şekil 3.10. Su ve kurşun için lineer azaltma katsayısının foton enerjisine göre fotoelektrik, Compton ve çift oluşum tesir kesitlerinin toplam lineer katsayısına rölatif katkılarının grafiği

Düşük enerjilerde (<15 keV), fotoelektrik etki, sudaki hemen hemen tüm etkileşimleri oluşturur. Foton enerjisi arttıkça, fotoelektrik tesir kesitinin katkısı hızla düşer ve Compton saçılma tesir kesiti (τ) suda yaklaşık 100 keV ve kurşunda yaklaşık 500 keV'de baskın hale gelir. Compton saçılma tesir kesiti, enerji ile azalarak yaklaşık 1 MeV'den sonra çift oluşum tesir kesiti baskın hale olmaya başlar.

Kurşunda da benzer şekilde fotoelektrik tesir kesiti düşük enerjilerdeki baskın etkileşimdir. Fotoelektrik tesir kesiti, artan foton enerjisi ile hızla azalır, ancak foton enerjisi, atomun K kabuğundan bir fotoelektronun çıkarılması için yeterli olduğunda aniden yükselir. Bu durumda K tabakasından bir elektron koparılmıştır ve fotoelektrik tesir kesiti maksimum değerine ulaşmıştır. Bu maksimum tesir kesitinin olduğu nokta kurşun elementinin K tabakası iyonlaşma enerjisidir. Birkaç yüz keV üzerindeki foton enerjilerinden sonra, Compton saçılma tesir kesiti, foton enerjileri 1,022 MeV çifti oluşum eşiğinin civarına kadar hakimdir. Bu eşik enerjisinden sonra çift oluşum tesir kesiti baskın olmaya başlar. Ayrıca, Şekil 3.11'de, atom numarasının arttırılması ile lineer azaltma katsayısının nasıl

değiştiği görülmektedir. Bu şekilden açıkça görüldüğü gibi artan atom numarası ile lineer azaltma katsayısı artmaktadır. (Martin, 2006)



Şekil 3.11. Lineer azaltma katsayısının atom numarası ile değişimi

3.7. Üstel Bozunma

Saf bir radyoaktif kaynağın aktivitesi, zamanla eksponensiyel olarak azalır. N, herhangi bir zamanda bir radyoaktif kaynaktaki atom sayısını temsil ediyorsa, dt zamanındaki dN değişimi λ orantı sabiti olmak üzere:

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (3.13)$$

ile ifade edilir.

İfadedeki negatif işareti zamanla azalmanın olduğunu gösterir. λ bozunma sabiti olarak adlandırılır ve zamanın tersi birime sahiptir. Bozunma oranı veya aktivite, A:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3.14)$$

ile verilir. (3.14) denklemi düzenlenirse:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (3.15)$$

şeklini alır ve her iki tarafın entegrali alınır:

$$\ln N = -\lambda t + c \quad (3.16)$$

elde edilir ve burada c, başlangıç koşullarına bağlı entegral sabitidir. Radyoaktif kaynakta başlangıçta (t = 0 zamanında) N₀ tane atom olduğunu varsayarsak denklem (3.16)'daki c=lnN₀ olduğu anlamına gelir ve bunu denklem (3.16)'da yerine yazarsak:

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (3.17)$$

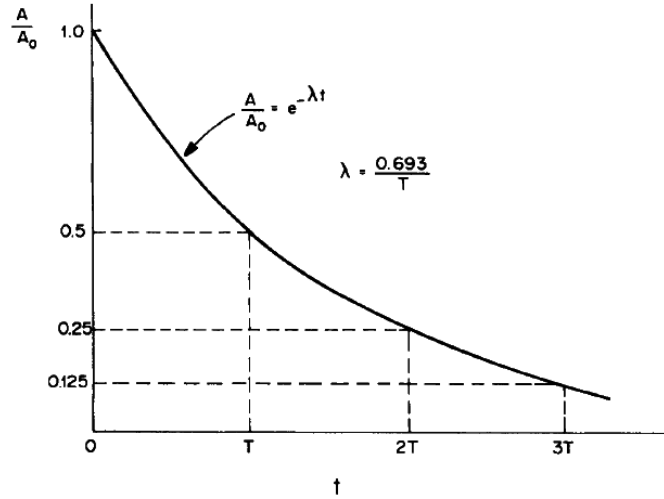
elde edilir ve bu ifade düzenlenirse:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (3.18)$$

denklemi elde edilir. Denklem (3.18) üstel radyoaktif bozunma yasasını tanımlar. Bir numunenin aktivitesi ve mevcut atomların sayısı birbiri ile orantılı olduğundan, bir aktivite aynı düşüş oranıyla ifade edilebilir:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} \quad (3.19)$$

A_0 , $t = 0$ anındaki aktivitedir. Denklem (3.19) grafiksel olarak Şekil 3.12’de görülmektedir. Radyoaktif kaynağın aktivitesinin yarıya düştüğü zaman yarı ömür (T) olarak adlandırılır.



Şekil 3.12. Üstel radyoaktif bozunma yasasının grafiksel gösterimi

Denklem (3.18)’de λ cinsinden T ’yi bulabiliriz. $N=N_0/2$ olacağından:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t} \quad (3.20)$$

olur ve her iki tarafın logaritması alınırsa:

$$-\lambda t = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 \quad (3.21)$$

ve buradan:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3.22)$$

elde edilir.

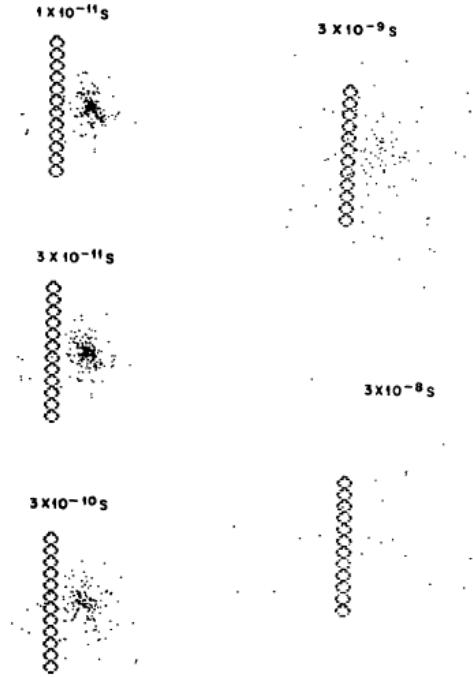
Bir radyoaktif kaynağın ortalama ömrü, radyoaktif kaynakta bulunan atomların yaşama ömrünün ortalaması alınarak tanımlanır ve $\tau=1/\lambda$ ile bulunur. (Turner 2007)

3.8. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Radyasyonun hücre üzerindeki biyolojik etkileri genellikle hem doğrudan hem de dolaylı etkisinden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Doğrudan etkiler radyasyonun başlangıçtaki etkisiyle üretilir ve dolaylı etkiler serbest radikallerin ve diğer radyasyon ürünlerinin daha sonraki kimyasal etkilerinden kaynaklanır. Doğrudan etkinin bir örneği, molekül içindeki iyonlaşmadan kaynaklanan DNA'daki kopmalardır. Dolaylı bir etki örneği, bir OH radikalının daha sonra bir DNA'ya saldırdığında ortaya çıkan kopmalardır.

Doğrudan ve dolaylı etkiler arasındaki fark, Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Sarmal konfigürasyondaki noktalar şematik olarak şekerin ve bazların suda 200 Å uzunluğundaki bir DNA düz segmentindeki yerini göstermektedir. Çoğunlukla sarmalın sağındaki nokta kümesi, tepkime maddelerinin pozisyonlarını 10^{-11} s'de ve sonra sarmalın ortasından 50 Å düz bir çizgide 5 keV'lik bir elektronun geçişinden sonra gösterilen süreleri verir.

Elektronun veya bunun ikincil ürünlerinin ilk geçişi tarafından üretilen herhangi bir geçiş ek olarak (doğrudan etkiler), su içinde üretilen reaktifler sarmala daha sonraki zamanlarda da etki edebilir (dolaylı etkiler). Bu hesaplamalar, elektronun düz bir çizgide ilerlemesi durumunda yapılmıştır. Ayrıca, reaksiyona girmemiş radikallere, hücrel bir ortamda süpürmeyi simüle etmek için birim zamanda basitçe yok olan sabit bir olasılık verilmiştir. Böylece, reaktifler burada saf su için önceki örneklerde olduğundan çok daha hızlı bir oranda kaybolur. Doza, radyasyonun türüne ve gözlenen uç noktaya bağlı olarak radyasyonun biyolojik etkileri geniş ölçüde değişebilir. Bazıları nispeten hızlı bir şekilde gerçekleşirken bazılarının belirginleşmesi yıllar alabilir.



Şekil 3.13. Radyasyonun doğrudan ve dolaylı etkisi

Çift sarmal bir nokta dizisi, 200-Å düz çift sarmallı DNA segmentindeki bazların ve şekerlerin konumlarını temsil eder. Diğer noktalar, sarmalın ortasından 50 Å düz bir çizgide bir 5-keV'lik elektronun sayfaya dikey doğrultuda geçişinden sonra suda oluşan reaktiflerin pozisyonlarını, 10^{-11} s ile 3×10^{-8} s arasında gösterir. Elektronun geçişi ile DNA'da üretilen herhangi bir doğrudan etkiye (yani, kuantum geçişleri) ek olarak, reaktifler DNA'ya yayıldığı ve onunla reaksiyona girdiğinde dolaylı olarak gerçekleşir. Reaktanlar ayrıca, bu örnekte bir hücresel ortamı kabaca simüle ederek atma yoluyla da kaybolabilir.

Muhtemelen yaklaşık 10^{-3} s, biyolojik bir sistemde yüklü parçacık izleri tarafından üretilen radikallerin hepsi reaksiyona girmiştir. Bazı biyokimyasal süreçler hemen hemen, yaklaşık 1 s'den daha az bir sürede değiştirilir. Hücre bölünmesi birkaç dakika içinde gerçekleştirilebilir. Daha yüksek organizmalarda, hücresel ölme, klinik bir sendromun hücre yenileme hızı ile ilgili olmasıyla ifade edilir hale gelir. Takip eden büyük, akut, tüm vücutta bir radyasyon dozu sonrasında, bir bireyin hematopoetik ölümü yaklaşık bir ay içinde gerçekleşebilir. Daha yüksek bir doz, erken ölüm (haftada 1-2 kilo), gastrointestinal sisteme zarar gelmesine neden olabilir. Halen daha yüksek dozlarda (100 Gy civarında) zarlarda ve beyindeki kan damarlarında hasar, serebrovasküler sendrom ve bir veya iki gün

içinde ölüme neden olur. Örneğin akciğer fibrozu gibi diğer hasar türlerinin ilerlemesi birkaç ay sürebilir. Katarakt ve kanser radyasyona maruz kaldıktan yıllar sonra ortaya çıkar. Genetik etkiler, tanım gereği, önce maruz kalan bir bireyin sonraki veya daha sonraki nesillerinde görülür.

Radyasyonun biyolojik etkileri, stokastik (rastgele/olasılıksal) ve belirleyici veya olasılıksal olmayan olmak üzere iki genel kategoriye ayrılabilir. Adından da anlaşılacağı gibi, stokastik etkiler, istatistiksel olarak ortaya çıkan etkilerdir. Büyük bir popülasyon radyasyon gibi önemli miktarda kanserojene maruz kalırsa, kanser insidansında artış beklenebilir. Artan insidansın büyüklüğünü tahmin etmemize rağmen, popülasyondaki hangi bireylerin hastalığa yakalanıp hangilerinin yakalanamayacağını söyleyemeyiz. Ayrıca, radyasyona spesifik maruz kalmadan belirli bir doğal kanser insidansı olduğu için, belirli bir vakanın başlatılıp başlatılmadığı veya maruz kalmadan oluşup oluşmadığı konusunda tam olarak emin olamayız. Ek olarak, beklenen kanser insidansı doza bağlı olarak artmasına rağmen, hastalıklı bir bireyde hastalığın şiddeti, dozun bir fonksiyonu değildir. Aksine, deterministik etkiler, verilen bir bireydeki doz ve etki arasında net bir nedensel ilişki gösteren etkilerdir. Genellikle, hiçbir etkinin gözlemlenmediği bir eşik vardır ve şiddeti doz ile artar. Deri kızarması, radyasyonun deterministik etkisine bir örnektir.

Radyasyonun stokastik etkileri, insanda ve diğer organizmalarda, sadece göreceli olarak yüksek dozlarda kanıtlanmıştır, burada gözlemlenen bir etki görülme sıklığı, normal oluşum seviyesindeki istatistiksel bir dalgalanma nedeniyle muhtemel değildir. Düşük dozlarda, bir bireye riskin ne olduğu kesin olarak söylenemez. Pratik bir hipotez olarak, genellikle ne kadar küçük olursa olsun herhangi bir miktarda radyasyonun bir miktar risk gerektirdiği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, uzmanlar arasında riskin düşük dozlarda dozun bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiği konusunda bir anlaşma yoktur. (Turner 2007)

3.9. Radyasyondan Korunma

Radyasyonun farklı alanlarda son derece faydalı olduğu bilinmesine rağmen, kullanımına ilişkin aşırı radyasyon tehlikeleri vardır. Personelin ve ekipmanın radyasyonun zararlı

etkilerinden korunması, herhangi bir radyasyon ortamında birincil öneme sahiptir. Birçok durumda, personelin radyasyona maruz kalma olasılığını ortadan kaldırmak imkânsız olsa da bu etkiyi minimuma indirmek için bazı tedbirler bulunmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde belirtilen bazı basit teknikleri kullanarak radyasyona maruz kalmayı en aza indirmeye çalışılabilir.

3.9.1. Zaman

Uzun bir süre boyunca entegre edilen düşük seviyeli doz, personele ciddi zararlar verebilir. Dolayısıyla, maruz kalma süresi mümkün olduğu kadar kısa olacak şekilde aktiviteler dikkatlice planlanarak doz minimize edilebilir. Radyasyon ortamlarında çalışan işçilerin dozu kaydetmek için bir dozimetre takmaları gerekir. Bir süre sonra dozimetre bir okuma cihazından okunur ve maruz kalma seviyesi ilgili otorite tarafından belirlenen limite karşılaştırılır. Limite yaklaşıldığı takdirde, çalışanın belirli bir süre başka radyasyon ortamına girmesine izin verilmez.

3.9.2. Mesafe

Radyasyon, ortamda önemli saçılma ve soğurma olmadıkça ters kare yasasına uyar. Bu yasa, radyasyon akışının kaynaktan uzaklaştıkça artan mesafenin karesiyle orantılı olduğunu, yani,

$$\varphi \sim \frac{1}{r^2} \quad (3.23)$$

ifade eder. Burada r , ölçüm noktasının nokta kaynağından uzaklığıdır.

Burada bahsetmeye değer bir nokta, ters kare yasasının geçerli olması için radyasyonun ortamdaki önemli saçılma ve soğurmadan etkilenmemesi gerektiğidir. Başka bir deyişle, bu yasa yalnızca vakumda bulunan tüm radyasyon türleri için geçerlidir. Bu, kanunun ortamın genellikle hava olduğu laboratuvar ortamında geçerli olmadığı anlamına gelmez,

çünkü havada yolculuk yapan fotonlar çok az saçılma ve emilim gösterir. Bu nedenle, havada hareket eden X ve γ ışınları ters kare yasasını çok iyi bir yaklaşıma kadar uyar. Öte yandan, elektronlar ve α parçacıklar gibi büyük parçacıklar, bu yasaya uymazlar. Bu parçacıklar, ortamdaki enerjilerini hızla kaybederler ve çok kısa mesafelerden geçtikten sonra yok olurlar. Örneğin, havadaki yüksek derecede enerjik α -parçacıkları bile sadece birkaç santimetre ilerleyebilir.

Şimdi, radyasyonu önemli ölçüde soğurmayan veya saçmayan bir ortamda radyasyonumuz olduğunu varsayalım. Sorun, o ortamda çalışan bir kişinin aldığı dozu nasıl en aza indirebileceğimizdir. Elbette bu, kişinin kaynaktan olan mesafesini maksimize ederek yapılabilir. Doz doğrudan radyasyon şiddetiyle ilişkili olduğundan, doz için ters kare yasasını da yazabiliriz.

$$D \sim \frac{1}{r^2} \quad (3.24)$$

Elbette, maruz kalma için de benzer bir ifade yazabiliriz, yani:

$$X \sim \frac{1}{r^2} \quad (3.25)$$

Mesafeyi maksimize etmenin bu ilkesinin, ters kare yasasını izlemeyen radyasyon için de geçerli olduğuna dikkat etmek gerekir. Bununla birlikte, bu durumda güvenli mesafe, foton ışınlarından çok daha küçüktür.

3.9.3. Zırlama

Zırlama, herhangi bir radyasyon tesisinin ayrılmaz bir parçasıdır. Çoğu durumda, radyasyonun personele maruz kalmasını azaltmanın en etkili yoludur. Bir foton ışınının şiddetini numune kalınlığı ile üssel olarak azalır, yani:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.26)$$

Burada, I ve I_0 sırasıyla soğurucu numunesinden geçen ve kaynaktan yayınlanan ilk radyasyon şiddeti, x soğurucu numune kalınlığı ve μ malzemenin lineer azaltma katsayısıdır. μ , herhangi bir spesifik enerjide değeri, malzemenin atom numarasına bağlıdır. Bu nedenle kurşun gibi yüksek atom numaralı elementler zırhlamanın en etkili olduğu malzemelerdir. Radyasyon kaynaklarıyla çalışılan laboratuvarlarda, kurşunun koruyucu malzeme olarak kullanımı çok yaygındır. Radyasyona duyarlı ortamlarda, çok kalın zırhlar oluşturmak için yüksek atom numaralı malzemeler ve betonun bazı kombinasyonları kullanılır.

Maruz kalma ve soğurulan doz doğrudan radyasyon şiddeti ilişkili olduğundan, denklem (3.26) aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$X = X_0 e^{-\mu x} \quad (3.27)$$

$$D = D_0 e^{-\mu x} \quad (3.28)$$

Maruz kalma sadece hava için tanımlandığı için, bu ifadelerin ilki hava dışındaki malzemeler için kullanılamaz. Dozimetrik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki terminoloji vardır. Bunlar yarı kalınlık değeri (HVL) ve onda-bir kalınlık değeridir (TVL). HVL, radyasyon şiddetini yarıya düşürmek için gerekli olan soğurucu kalınlığı olarak tanımlanır. Benzer şekilde, TVL, radyasyon şiddetinin %90'ını soğurması için gerekli olan soğurucu kalınlığıdır. HVL ve TVL'nin değerleri, lineer azaltma katsayısına bağlıdır. HVL değerinin matematiksel ifadesi, (3.26) denkleminde $I=I_0/2$ yazılarak bulunabilir:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu \cdot HVL} \rightarrow HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.29)$$

Benzer şekilde, TVL ifadesi, (3.26) denkleminde denklemindeki $I = I_0/10$ 'un kullanılmasıyla elde edilebilir.

$$\frac{I_0}{10} = I_0 e^{-\mu.TVL} \rightarrow TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (3.30)$$

HVL ve TVL arasındaki ilişki bu denklemlerin oranı alınarak elde edilebilir.

$$\frac{HVL}{TVL} = \frac{\ln 2}{\ln 10} \rightarrow HVL = 0,3.TVL \quad (3.31)$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kurşun gibi bir malzemedan çok yüksek enerji fotonları geçtiği zaman, yüksek enerjili elektronların üretildiğidir. Bu elektronlar enerjilerini hızlı bir şekilde kaybederler ve sonuç olarak Bremsstrahlung radyasyonuna yol açarlar. Bu radyasyon da oldukça nüfuz edicidir ve bu nedenle koruyucu malzemenin kalınlığını tahmin ederken göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür hesaplamalar oldukça karmaşıktır ve genellikle radyasyonun madde içinden geçişini simüle eden standart bilgisayar kodları ile yapılır. Güvenlik nedeniyle, üstel zayıflamanın hesaplanmasında gerekenden daha kalın kalkanlar kullanmak her zaman iyi bir uygulamadır. (Ahmed 2007).

3.10. Yarı İletken Dedektörler

Saf germanyum gibi yarı iletken bir materyale enerjinin birikmesi, elektronları değerlik bantlardan iletkenlik bantlarına uyarır. Bu durumda iletkenliği sağlayan elektronlar veya boşluklar oluşur. Yarı iletken boyunca, bu yük taşıyıcıların hareket etmesine neden olarak bir akım ve buna bağlı olarak bir sinyal voltajı oluşur. Bir yarı iletkende bir elektron-boşluk çifti oluşturmak için gereken enerji tipik olarak yaklaşık 2-3 eV civarındadır. Bu miktar bir sintilatörde iyonizasyon için gerekli olan enerjiden oldukça düşüktür. Bu nedenle, soğurulan her foton için nispeten fazla sayıda yük taşıyıcı üretilir. Sonuç olarak, iyonize olan veya uyarılan atomların sayısındaki istatistiksel dalgalanmalar, bir yarı iletken için

çok daha azdır ve çok kanallı bir analizör ile kullanıldığında, enerjilerin çok doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayan çok keskin (yüksek çözünürlüklü) tepeler elde edilir.

Yarı iletken dedektörler sintilasyon dedektörlerine göre birçok avantaja sahiptir. Yoğunluklarından dolayı fotonları tespit etmede çok etkilidirler ve mükemmel çözünürlükle hızlı sinyaller (tipik olarak birkaç nanosaniye) üretirler. Germanyum ve lityum sürüklenmiş germanyum (Ge(Li)) ler, bir dezavantaj olabilen termal gürültüyü azaltmak için sıvı azot sıcaklığında çalıştırılmalıdır. Bu dedektörler, lityumun germanyum içine istenmeyen şekilde sürüklenmesi nedeniyle sıvı azot sıcaklığında saklanmazsa hızla bozulur ve bu nedenle bu dedektörlerin, kullanımları dışında oda sıcaklığında beklerlerken bile sıvı azot sıcaklığında muhafaza edilmeleri önerilir. (Martin, 2006)

3.11. Gama Işını Dedektörleri

Bütün nükleer radyasyon dedeksiyonlarının temelinde radyasyon ile madde etkileşimi vardır. Dedeksiyon yöntemleri genel olarak yüklü veya yüksüz bir parçacığın madde içinde geçişi sırasında atomları uyarılması veya iyonize edilmesi işlemlerine dayanır. Elektromanyetik radyasyon, fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi ihtimaliyetleri yüksek olan üç işlemten biri ile serbest ve bir enerjiye sahip elektronların oluşturulmasını sağlar. Gama ışını spektrometresi için fotonun tüm enerjisini kaybettiği etkileşimler daha önemlidir. Bu elektromanyetik radyasyonun kısmi soğurulmasıyla sonuçlanan Compton etkisini ortadan kaldırır. Gama ışını spektrometresinde, Compton etkisi ile üretilen geniş enerji aralığındaki geri tepme elektronlarının yarardan çok dezavantajı vardır. Bu dezavantajdan kurtulmak için dedektör materyali olarak, fotoelektrik etkileşimin baskın olduğu ve fotoelektrik etkileşime göre daha az ölçüde önemli olan çift oluşumunun baskın olduğu yüksek atom numaralı materyaller tercih edilir. Gama radyasyonunun düşük soğurma katsayılarının bir sonucu olarak, gama radyasyonunun verimli bir şekilde algılanması için yüksek durdurma gücüne sahip dedektör malzemeleri gereklidir.

Bir gama dedektörü seçiminde farklı faktörler önemli olabilir;

1. Spektrum karmaşıklıklarını ölçmek için dedektörün spektrumları çözme gücü,

2. Bir spektrum ölçümü için gerekli kaynak şiddetini belirleyen dedeksiyon verimi,
3. Düzenleme basitliği ve veri toplama kolaylığı ve
4. Kararlılık, lineer doğrusallık, fotoelektrik etkileşimlerin Compton etkileşimlerine oranı, zamanlama doğruluğu gibi ikincil faktörler dedektör seçiminde önemlidir.

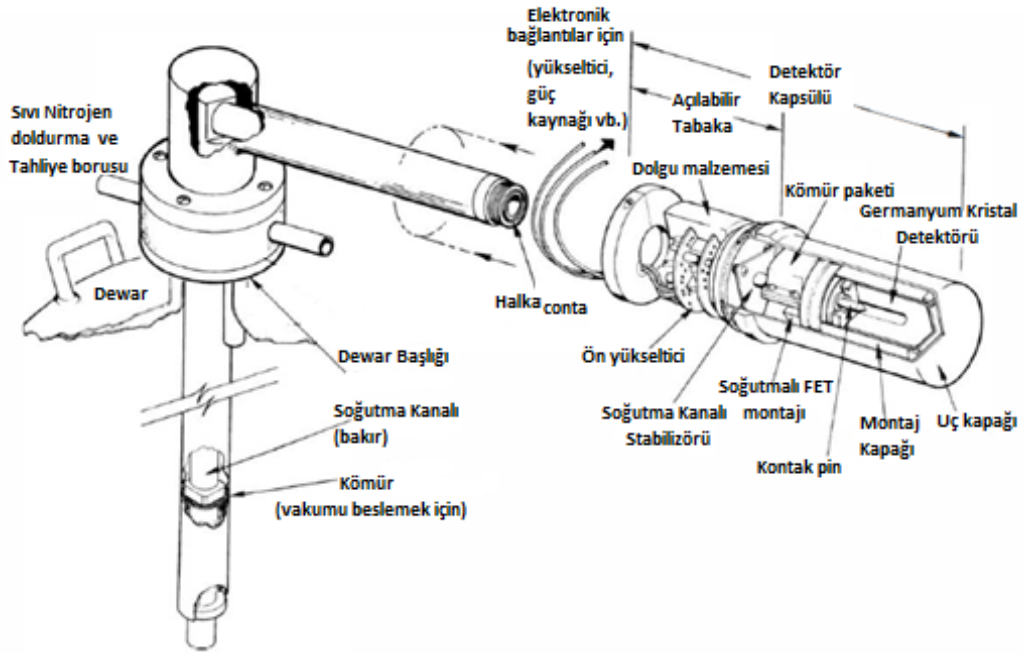
Dedektörler, hassas dedeksiyon hacminden geçen tüm radyasyonları kaydeden, radyasyon akısını kaydeden ve gama radyasyonunun şiddeti ve enerjileri hakkında bilgi veren spektrometreler olarak kullanılabilirler. Aslında gama ışını spektrometresi genel olarak sintilasyon ve yarı-iletken dedektörlere dayanmaktadır.

3.12. Germanyum Gama Işını Dedektörleri

Uygulanan belirli bir voltajda, daha büyük deplasyon derinlikleri ancak safsızlık konsantrasyonundaki daha fazla azalmayla elde edilebilir. Bu hedefe ulaşmak için atılabilecek iki genel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki safsızlık konsantrasyonunu yaklaşık 10^{10} atom/cm³'a düşürebilen arıtma teknikleri geliştirmektir. Germanyumdaki bu safsızlık seviyesinde 1000 V'tan daha düşük bir ters besleme voltajı kullanılarak 10 mm'lik bir deplasyon derinliğine ulaşılabilceği öngörülür. Bununla birlikte, böylesi düşük bir kirlilik konsantrasyonu, neredeyse hiç görülmemiş bir malzeme saflığı derecesi olan 10^{12} 'de 1 parçadan daha düşük seviyelere karşılık gelir. Bu amaca ulaşmak için silisyumda değil, germanyumda teknikler geliştirilmiştir. Bu ultra saf germanyumdan üretilen dedektörlere genellikle içsel germanyum veya yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörleri denir ve birkaç santimetrelik deplasyon derinliklerinde kullanılabilirler.

Lityum sürüklenme işlemi ile üretilen germanyum dedektörlerine Ge(Li) adı verilir. Bu dedektörler 1960'ların başında ticari olarak piyasaya sürüldüler ve yirmi yıldır büyük hacimli germanyum dedektörü olarak hizmet ettiler. Genel olarak, algılama verimliliği ve enerji çözünürlüğü gibi önemli performans özellikleri esas olarak aynı boyuttaki Ge(Li) ve HPGe dedektörleri için özdeştir. 1980'lerin başında yüksek saflıkta germanyumun yaygın olarak bulunabilmesi, lityumun sürüklenmesine bir alternatif sağladı ve üreticiler, Ge(Li)

dedektörlerinin üretimini HPGe tipi lehine bıraktılar. Bu evrimin ana nedeni, HPGe dedektörlerinin sağladığı daha büyük operasyonel kolaylıktır. Ge(Li) dedektörlerinin düşük bir sıcaklıkta sürekli olarak korunması gerekirken, HPGe dedektörlerinin kullanımlar arasında oda sıcaklığına ısınmasına izin verilebilir. Kriyostat gövdesi içinde modern bir HPGe dedektörü ve önyükseltici düzeni Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 3.14. Kriyostat gövdesi içinde modern HPGe ü ve önyükseltici düzeni

3.13. Germanyum Dedektörlerinin Konfigürasyonları

Safsızlık seviyeleri 10^{10} atom/cm³'e kadar düşük olan ultra saf germanyum üretim teknikleri ilk olarak 1970'lerin ortalarında geliştirilmiştir. Başlangıç materyali, yarı iletken endüstrisinde kullanılmak üzere tasarlanmış dökme germanyumdur. Zaten yüksek saflıkta olan bu malzeme, bölgesel arıtma tekniği kullanılarak daha da işlenir. Kirlilik seviyeleri, malzemenin lokal olarak ısıtılması ve erimiş bir bölgenin numunenin bir ucundan diğer ucuna yavaşça geçirilmesiyle kademeli olarak azaltılır.

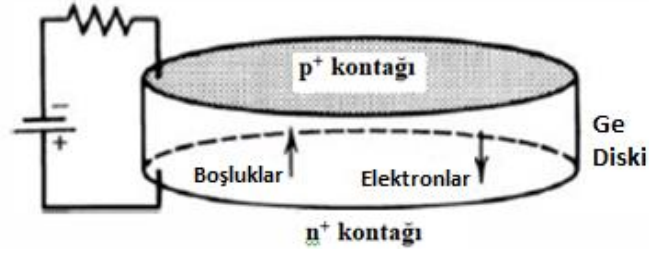
Kirlilikler erimiş germanyumda katı maddeden daha çözünür olma eğilimi gösterdiğinden, tercihen erimiş bölgeye aktarılır ve numuneden süpürülür. Bu işlemin birçok tekrarından

sonra 10^9 atom/cm³ gibi düşük safsızlık seviyelerine kadar ulaşılmıştır. Sonuçta ortaya çıkan germanyum, belki de ticari hacimde üretilen herhangi bir türden en yüksek derecede saflaştırılmış ve tamamen analiz edilmiş bir malzemedir. Daha sonra, bu saflaştırılmış besleme stokundan büyük tek germanyum kristalleri yavaşça büyütülür. Kalan düşük seviyeli safsızlıklar alıcı ise (alüminyum gibi) malzemedan yetiştirilen yarı iletken kristalin elektriksel özellikleri hafif p-tipindedir. Alternatif olarak, donör safsızlıkları kalırsa, yüksek saflıkta n tipi sonuç elde edilir.

Pratik germanyum dedektörleri her zaman net katkı maddesi konsantrasyonunun çok küçük olduğu ve iletkenliğin buna bağlı olarak düşük olduğu malzemedan imal edilir. Daha yaygın olarak kullanılan terminolojide, bu durum genellikle "yüksek dirençli malzeme" olarak tanımlanır.

3.13.1. Düzlemsel Konfigürasyon

Yüksek saflıkta p-tipi germanyumdan üretilen düzlemsel bir HPGe dedektörü için temsili bir konfigürasyon Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Düzlemsel bir konfigürasyonda, elektrik kontakları bir germanyum diskinin iki düz yüzeyi üzerinde sağlanır. n^+ kontağı, lityum buharlaştırması ve yonga plakanın bir yüzeyi üzerine difüzyon yoluyla veya bir hızlandırıcı kullanarak donör atomların doğrudan implantasyonu ile oluşturulabilir. Dedektör deplasyon bölgesi, bu n^+ p birleşiminin ters yönde eğilmesiyle oluşturulur. Kristalin karşı yüzündeki temas, çoğunluk taşıyıcısı için enjekte edici olmayan bir temas olmalıdır. Alıcı atomların iyon implantasyonu ile üretilen bir p^+ kontağı veya elektriksel eşdeğeri görevi gören bir metal yarı iletken yüzey bariyerinden oluşabilir. İyon implantasyon tekniklerinin avantajı, temas katmanlarının düşük enerjili X-ışınları gibi zayıf nüfuz eden radyasyonlar için giriş penceresi görevi görecektir. İyon implantasyon işleminin neden olduğu radyasyon hasarı germanyumda alıcı yerler ürettiğinden, n-tip temasların üretimi daha az yaygındır.



Şekil 3.15. Düzlemsel bir HPGe dedektörünün konfigürasyonu. Ge yarı iletken v tipi (p^+ kontak doğrultucu), π tipi (n^+ kontak doğrultucu) veya lityum sürüklenmiş olabilir.

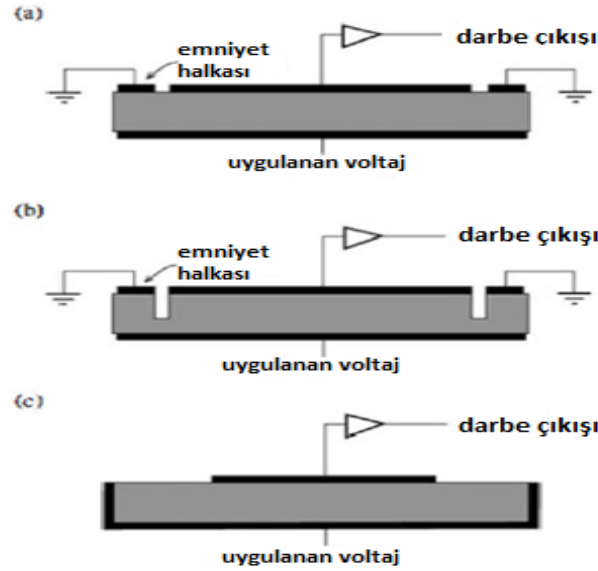
Yüksek saflıkta germanyum dedektörleri genellikle tamamen deplasyon edilmiş dedektörler olarak kullanılır. Tersine besleme, p^+ yüzeyine göre n^+ kontağına pozitif bir voltaj uygulanmasını gerektirir. Deplasyon bölgesi, merkezi bölgenin n^+ kenarında etkili bir şekilde başlar ve dedektör tamamen tükenene kadar voltaj yükseldikçe p bölgesine doğru daha derinlere uzanır. Voltajdaki daha fazla artış, daha sonra dedektördeki her yerde elektrik alanını eşit miktarda arttırmaya olanak sağlar.

Germanyum'daki 77 °K normal çalışma sıcaklığında, doymuş elektron hızlarına yaklaşık 10^5 V/m'lik minimum bir alanda ulaşılır, ancak boşluk hızını tam olarak doyurmak için üç ile beş kat daha büyük alan kuvvetleri gereklidir. Arıza ve yüzey sızıntısı ile ilgili pratik sorunlar genellikle maksimum voltajı (tipik olarak 3-5 kV) elektronların ancak boşlukların değil doymuş sürüklenme hızına ulaşacağı değerlerle sınırlar.

Germanyum dedektörleri, yukarıda tarif edildiği gibi p-tipi malzeme yerine yüksek saflıkta n-tipi malzeme ile başlayarak imal edilebilir. Bu durumda, yonga levhanın her bir yüzeyinde tekrar n^+ ve p^+ kontakları sağlanır. Ters yönde besleme hala p^+ kontağına göre n^+ kontağına pozitif bir voltaj uygulanmasını gerektirir. Bununla birlikte, iki temasın rolleri tersine çevrilir. p^+ kontağı şimdi düzeltme kontağı olarak işlev görür ve voltaj yükseldikçe deplasyon bölgesi bu kontakta uzanır. n^+ kontağı ise boşluk popülasyonunun çok düşük olduğu bir bloke edici veya enjekte etmeyen kontak olarak işlev görmektedir.

Germanyum düzlemsel dedektörleri standart silikon diyotlardan çok daha (birçok milimetre) kalındır. Sonuç olarak, elektronları ve holleri verimli bir şekilde toplamak için gereken elektrik alan kuvvetini geliştirmek için en az 1 kV veya daha büyük bir çalışma

voltajı gereklidir. Şekil 4.3'te gösterilen basit düzlemsel konfigürasyonda, tam uygulanan voltaj diskin yan yüzeylerinde görünür ve önemli bir kaçak akıma yol açabilir. Bu akımdaki dalgalanmalar bir gürültü kaynağıdır ve dedektör enerji çözünürlüğünün bozulmasına neden olabilir.



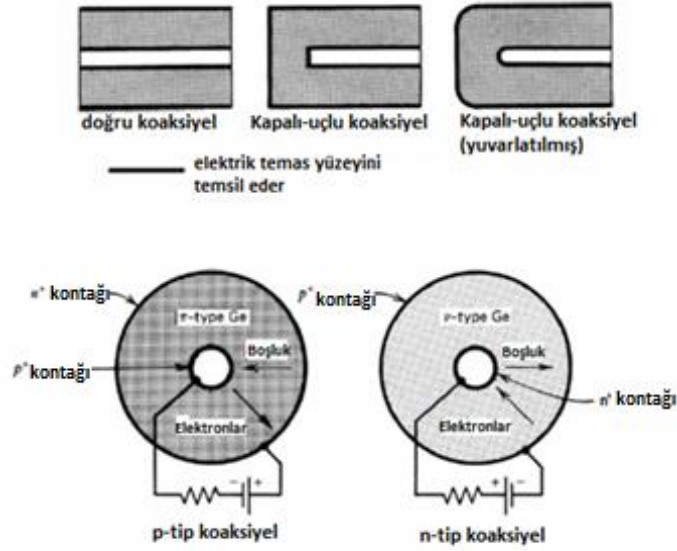
Şekil 3.16. Düzlemsel dedektörlerin konfigürasyonunda üç varyant. Elektrotlar, katı siyah çizgiler olarak abartılı kalınlıkta gösterilmiştir. **(a)** Dar bir koruma halkası elektrodu, okuma elektrodunu yarı iletken diskin silindirik yan yüzeyi boyunca iletilen kaçak akımın etkilerinden korur. **(b)** Koruyucu halkayı ve okuma elektrodunu ayıran yüzey alanını arttırmak için yarı iletken hacmine bir oluk konulmuştur. **(c)** Bir "sargı" elektrodu, diskin yan yüzeyini de kapsayacak şekilde bir düzlemsel yüzeyden ve karşı düzlemsel yüzey üzerinde imal edilen küçük çaplı bir okuma elektrotu uzatılır. Dedektör normalde, bu çizimde altta gösterilen yüzeyde gama veya X-ışınları olacak şekilde yönlendirilir.

Bu kaçak akımın etkilerini büyük ölçüde bastırmanın bir yöntemi Şekil 4.3 (a)'da gösterilmiştir. Okuma elektrodu çevresinde okuma yüzeyi üzerinde dar bir koruma halkası elektrodu kullanır ve ikisi küçük bir boşlukla ayrılır. Yan yüzeyler boyunca akan kaçak akım basitçe toprağa iletilir ve artık ölçülen sinyali doğrudan etkilemez. Ön amplifikatörün girişi de sanal bir zemin olduğundan, boşluk boyunca okumayı etkileyen herhangi bir sızıntı büyük ölçüde azalır.

3.13.2. Koaksiyel Konfigürasyon

Yukarıda özetlenen düzlemsel dedektörler için, toplam germanyum hacmi tipik olarak büyütülmüş kristalin çapı ve ondan kesilen dilimin kalınlığı onlarca cm^3 ile sınırlıdır. Genel gama ışını spektroskopisi için tercih edilen daha büyük hacimli dedektörler üretmek için,

kristal hacminin daha fazlasını tek bir deplasyona uğramış dedektöre dâhil edebilen farklı bir geometri seçilir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi bir silindirik veya koaksiyel geometrili bir dedektörü ele alalım.



Şekil 3.17. Üstte büyük hacimli koaksiyel dedektörlerin üç yaygın şekli gösterilmektedir. Her biri, silindirik bir kristalin eksenine boyunca bir kesit görünüşü temsil eder. Dış elektrot her iki kapalı uçlu durumda düz ön (sol) yüzey üzerine uzatılır. Kristalin silindirik eksenine dik kesitler altta gösterilmiştir. HPGe malzemesi, yüksek saflıkta p veya n tipi olabilir. Her tip için karşılık gelen elektrot konfigürasyonları gösterilmektedir.

Bu durumda, bir elektrot uzun bir germanyum silindirik kristalinin dış silindirik yüzeyinde imal edilir. Kristalin çekirdeğini çıkararak ve iç silindirik yüzeyin üzerine bir kontak yerleştirerek ikinci bir silindirik kontak sağlanır. Kristal eksenel yönde uzun süre yapılabileceğinden, çok daha büyük aktif hacimler üretilebilir. Koaksiyel geometrinin ek bir avantajı da küçük iç çap kullanılarak, büyük hacimli dedektörlerin düzlemsel geometri kullanılarak mümkün olandan daha düşük kapasitansla üretilebilmesidir.

Kapalı uçlu bir koaksiyel konfigürasyon, merkezi çekirdeğin sadece bir kısmının çıkarıldığı ve dış elektrodun, silindirik kristalin bir düz ucu üzerine uzatıldığı bir konfigürasyondur (Şekil 4.4). HPGe dedektörlerinin çoğu ticari imalatçısı, ön yüzeydeki kaçak akımlarla uğraşmanın komplikasyonlarını önlemek için gerçek bir koaksiyel geometri üzerinde kapalı uçlu konfigürasyonu seçer. Ayrıca, kapalı uçlu konfigürasyon, ince bir elektrik teması ile imal edildiğinde zayıf nüfuz eden radyasyonlar için bir giriş

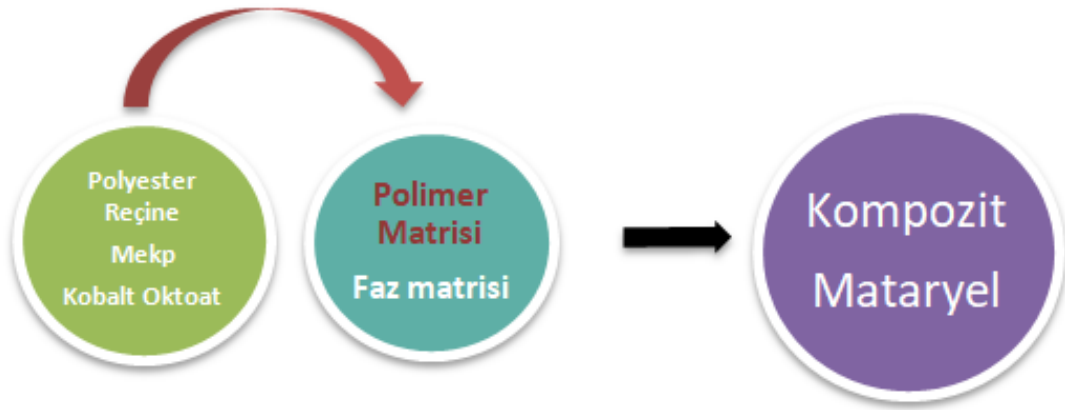
penceresi görevi görebilen düzlemsel bir ön yüzey sağlar. Kapalı uçlu konfigürasyonda, elektrik alan çizgileri artık gerçek koaksiyel durumda oldukları gibi tamamen radyal değildir ve kristalin köşelerinin yakınında, taşıyıcı hızların normalden daha düşük olabileceği düşük alan mukavemetine sahip bölgeler üretme eğilimi vardır. Merkezi deliğin ön yüzeye yakın olacak şekilde uzatılması alan çizgilerini olabildiğince radyal tutmaya yardımcı olur ve çoğu üretici düşük alan bölgelerinin ortadan kaldırılmasına yardımcı olmak için kristalin ve boşluğun ön köşelerini yuvarlaklaştırır. Koaksiyel HPGe dedektörleri, muhafazanın merkezi deliğe harici erişime izin verecek şekilde şekillendirildiği iyi konfigürasyonlarda da mevcuttur. Daha sonra, kaynağın neredeyse germanyum ile çevrili olduğu ölçümler için bu kuyu içine küçük radyoizotop kaynakları yerleştirilebilir ve tespit verimi alışılmadık derecede yüksek olabilir. (Knoll 2010)

3.14. Numunelerin Hazırlanması

Piyasada kullanılan polyester reçinelerin %75 ini maliyet bakımından ucuz olduğu için doymamış polyester reçineler oluşturur. Bu reçineler hızlı kürleşme sağladığı için de öncelikli olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada bu özellikleri sebebiyle kullanılmıştır. Polimer kompozitin elde edilebilmesi sürecinde bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Kobalt Oktoat (%6) ise sertleştiricinin bozularak daha hızlı reaksiyona girmesini sağlayan bir kimyasaldır. Kullanılan reçine türüne ve üretim tekniğine göre farklı konsantrasyonlarda kobalt tercih edilir. Genellikle ağırlıkça %1 – %2 oranında kullanılır. MEKP (Metil Etil Keton Peroksit, $C_8H_{18}O_6$) ise; polyesterin sağlıklı bir şekilde tam olarak sertleşmesini sağlayan metil, etil, keton ve peroksit karışımı bir kimyasaldır. Sertleştiriciler, hızlandırıcı veya ısıyla aktive olan ve polyester reçinenin ve kürlenmesini düzenleyen kimyasallardır. Karışım olarak MEKP polyester reçinelerinin kürleştirilmesi için kobalt hızlandırıcısı (örn. Kobalt oktoat %6, $CoC_{16}H_{30}O_4$) varlığında, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Genellikle doymamış polyester reçinenin ağırlığı itibari ile %1-%2 arasında oranlarda kullanılır.

Polimer kompozit üretimi yapılırken bağlayıcı materyal olarak birçok farklı reçine kullanılır ve bunlar arasında düşük maliyeti nedeniyle genellikle doymamış polyester reçine tercih edilir. Bu nedenle yaptığımız çalışmalarda taban malzeme olarak doymamış polyester tercih edildi. Polyester matrisin hazırlanmasında hızlandırıcı olarak Kobalt

Oktoat (%6) (CO-6) ve başlatıcı olarak metil etil keton peroksit (MEKP) kullanıldı. Üretilen polimer kompozit numunelerinin kalıptan çıkarılması için kalıp ayırıcı VAKS kullanıldı. Kompozitlerin üretim süreci Şekil 4.5'te sunulmuştur. CO-6 ve MEKP oranları sırasıyla ağırlıkça polyester reçinenin %1'i ve %2'si olarak seçilmiştir.



Şekil 3.18. Kompozit numune hazırlama süreci

Elde edilen polyester matrisine faz malzemesi olarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (Bizmut Tungstat Oksit) veya Sn (Kalay) ilave edildi. Faz malzemeleri ağırlıkça polyester reçine miktarının %5, %10, %15 ve %20'si kadar seçilmiştir. Hazırlanan akışkan karışımlar 2 cm çapında 1 cm yüksekliğinde disk şeklindeki kalıplara konulmuştur. Sertleşen numuneler kalıplardan çıkarılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir.

Bi_2WO_4 (Bizmut Tungsten Oksit) veya Sn (Kalay) ile katkılanmış polimer kompozit numunelerimizin resimleri Şekil 4.6-4.7'de verilmiştir. Her bir numuneye ait kimyasal içerik ve yoğunluk değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Polimer kompozitlerin element bileşimi ve yoğunlukları

Numune	Bileşimi (%Ağırlık)							ρ (g/cm ³)
	H	C	O	Co	Bi	W	Sn	
Bi₂(WO₄)₃ (%5)	4,4475	56,9947	34,7537	0,0271	1,6283	2,1486	-	1,346
Bi₂(WO₄)₃ (%10)	4,2550	54,5274	33,9648	0,0260	3,1156	4,1112	-	1,384
Bi₂(WO₄)₃ (%15)	4,0785	52,2649	33,2413	0,0249	4,4795	5,9109	-	1,415
Bi₂(WO₄)₃ (%20)	3,9160	50,1826	32,5756	0,0239	5,7347	7,5673	-	1,464
Sn (%5)	4,4475	56,9947	34,0057	0,0271	-	-	4,5249	1,283
Sn (%10)	4,2550	54,5274	32,5336	0,0260	-	-	8,6580	1,309
Sn (%15)	4,0785	52,2649	31,1837	0,0249	-	-	12,4481	1,324
Sn (%20)	3,9160	50,1826	29,9413	0,0239	-	-	15,9363	1,330

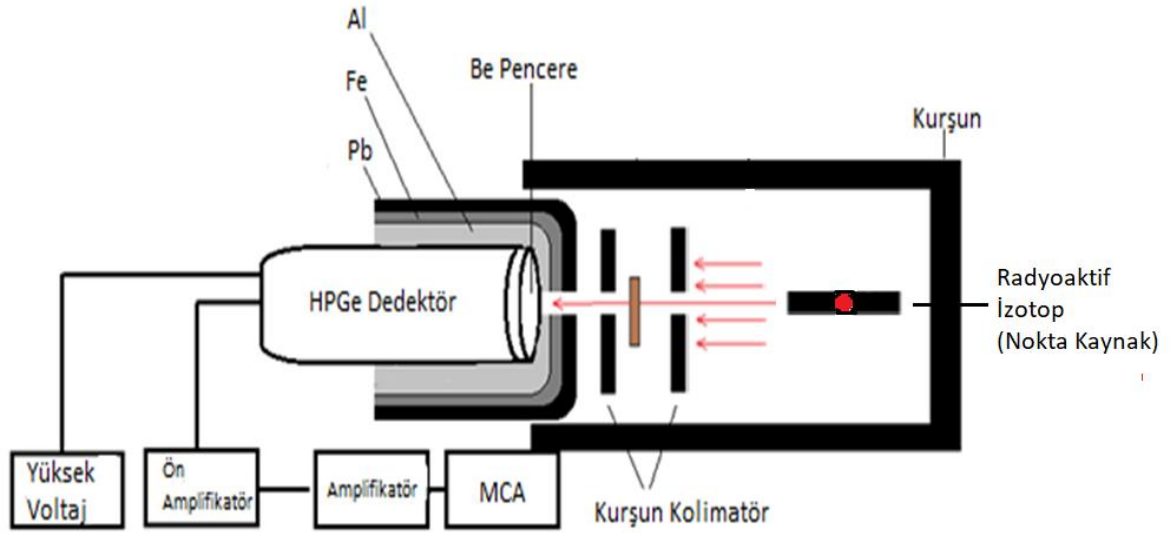
Şekil 3.19. %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Bi₂WO₄ ile katkılanmış polimer kompozitler

Şekil 3.20. %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Sn ile katkılanmış polimer kompozitler

3.15. Deney Geometrileri

Deneysel ölçümler 59,5 ile 1408,0 keV enerji aralığında 22 farklı enerjide yapılmıştır. Bahsi geçen enerji aralıkları için ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radyoizotop nokta kaynakları kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.6'dan da görüldüğü gibi yüksek çözünürlüklü bir HPGe dedektörü, radyoizotop kaynağı, dedektör elektronik sistemi (ön amplifikatör, amplifikatör, yüksek gerilim kaynağı ve çok kanallı analizör), hazırlanmış polyester kompozitleri ve kolimatörlerden oluşturulmuştur ve ölçümler esnasında dedektör, 35 litrelik bir dewar yardımı ile sıvı azot sıcaklığında (-196 °C) tutulmuştur. Bu radyo izotop kaynaklar için bilgiler Tablo 4.2'de sunulmuştur. Çalışmalar esnasında kristal çapı 70 mm, kristal genişliği 25 mm ve 5,9 keV'de 380 eV, 122 keV'de 585 eV ve 1,33 MeV'de 1,8 keV rezülasyonlara sahip HPGe dedektörü kullanılmıştır. Dedektör elektronik sistemi, gelen radyasyonun enerjisi ile orantılı sinyaller oluşturmak için kullanılmıştır. Dar ışınlı deneysel geometriyi elde edebilmek için radyoizotop kaynaklar 2 mm deliğe sahip bir kolimatör içine yerleştirilmiştir. Kolimatörler gelen radyasyonu kolime etmek, dedektörün kaynağı doğrudan görmesini önlemek ve temel sayımları en aza indirmek için kullanılmıştır. Ayrıca temel sayımı azaltmak için, dedektör kafası önünde 2 mm çapında delik olacak şekilde sırasıyla Al (1,0 mm), Fe (1,1 mm) ve Pb (1,2 mm) katmanlardan oluşan ve sandviç kolimatör olarak bilinen zırh ile kaplanmıştır.

Ölçümler, Eu-152 kaynağı için 600 s ve diğer kaynaklar için 1000 s olarak gerçekleştirilmiş sayımlar ilgili her bir pik için 10000'in üzerinde tutulmuştur. Elde edilen deneysel datalardan Microcal Origin 7.5 programı (demo) ile ilgili spektrumlar çizilmiş ve aynı program yardımı ile fotopik altındaki alanların hesabı yapılarak sayımlar elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Dar ışınli deney geometrisi

Tablo 3.2. Deneylerde kullanılan radyo izotop kaynakların bilgileri

Kaynak	Aktivitesi (kBq)	Yarı ömrü (y)	Enerji (keV) –Bozunma Olasılığı (%)
²² Na	456	2,60	511,0 (179,80%) 1274,5 (99,94%)
⁵⁴ Mn	378	0,86	834,8 (99,98%)
⁵⁷ Co	413	0,74	122,1 (85,60%) 136, (10,68%)
⁶⁰ Co	424	5,27	1173,2 (99,97%) 1332,5 (99,99%)
¹³³ Ba	460	10,51	80,1 (34,06%) 160,6 (0,65%) 276,4 (7,16%) 302,8 (8,33%) 356,0 (62,05%) 383,8 (8,94%)
¹³⁷ Cs	473	30,07	661,6 (85,10%)
¹⁵² Eu	370000	13,52	778,9 (12,9%) 867,3 (4,23%) 964,1 (14,51%) 1085,8 (10,11%) 1112,1 (13,67%) 1299,1 (1,63%) 1408,0 (20,87%)
²⁴¹ Am	460	432,20	59,5 (35,9%)

3.16. Radyasyon Zırlama Parametrelerinin Belirlenmesi

Herhangi bir malzemenin radyasyon koruma verimi aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir:

$$RPE \% = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad (3.32)$$

Herhangi bir zırlama malzemesinin lineer azaltma katsayısı (μ , cm^{-1}) iyi bilinen üstel azalma (Lambert-Beer) kuralı ile tanımlanır (Eke vd. 2017):

$$\mu = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x} \quad (3.33)$$

burada I_0 ve I sırasıyla numuneye gelen ve numuneden geçen radyasyon şiddetleridir. x ise kompozit numunesinin kalınlığıdır (cm).

Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ , cm^2/g), dikkate alınan malzemenin lineer azaltma katsayısının yoğunluğuna oranı olarak bulunabilir. Eğer malzeme birden fazla elementi içeren bir malzeme ise, bunun kütle azaltma katsayısı karışım kuralı yardımıyla belirlenebilir. Mevcut polyester kompozitler için teorik μ/ρ değerleri karışım kuralı kullanılarak elde edilmiştir (Akman vd. 2015):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sum W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3.34)$$

burada μ/ρ malzemenin toplam kütle azaltma katsayısı (cm^2/g), $(\mu/\rho)_i$ malzeme içindeki i . elementin kütle azaltma katsayısı ve W_i malzeme içindeki i . elementin ağırlıklı kesridir. Malzeme içindeki elementlerin toplam ağırlıklı kesri 1'dir, yani $\sum W_i = 1$ 'dir.

Toplam moleküler tesir kesiti ($\sigma_{t,m}$) aşağıdaki ifade kullanılarak türetilir:

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{N_A} (\mu/\rho)_{malzeme} \sum_i (n_i, A_i) \quad (3.35)$$

burada N_A , Avogadro sayısıdır, A_i , polyester kompozitteki i. elementin atom ağırlığıdır. $\sigma_{t,m}$, $\text{cm}^2/\text{molekül}$ olarak ifade edilir.

Atomik tesir kesiti, moleküler tesir kesiti yardımı ile belirlenebilen bir parametredir ve matematiksel olarak aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_{t,a} = \frac{\sigma_{t,m}}{\sum_i n_i} \quad (3.36)$$

atomik tesir kesiti cm^2/atom biriminde verilir.

Elektronik tesir kesiti ($\sigma_{t,el.}$, $\text{cm}^2/\text{elektron}$) ise atom içindeki elektron ile fotonun etkileşimiyle ilgili bir parametredir ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu/\rho)_i \quad (3.37)$$

burada f_i i. elementin malzeme içindeki bolluğu, Z_i i. elementin atom numarası ve $(\mu/\rho)_i$ ise malzeme içindeki i. elementin kütle azaltma katsayısıdır.

Atomik tesir kesiti ve elektronik tesir kesiti yardımıyla bir malzemenin ilgili enerjideki etkin atom numarası aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilir.

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (3.38)$$

Ayrıca, etkin elektron yoğunluğu (N_E , elektron/g), etkin atom numarası (Z_{eff}) ile yakından ilişkilidir ve maddenin birim kütlesi başına elektron sayısı olarak tanımlanır. Polyester kompozitler için, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (Tekin vd. 2019).

$$N_E = \frac{Z_{eff}}{A_{tot}} (N_A n_{tot}) \quad (3.39)$$

Yarı kalınlık değeri (HVL, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %50'sinin soğurulduğu numune kalınlığını tanımlar. Onda-bir kalınlık değeri ise (TVL, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %10'nun geçebileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır, yani başlangıç radyasyon şiddetinin %90'nın soğurulduğu numune kalınlığıdır. Polyester kompozit numunelerin HVL ve TVL değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır (Manjunatha vd. 2018).

$$HVL = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu \quad (3.40)$$

$$TVL = \ln 10 / \mu = 2,303 / \mu \quad (3.41)$$

Fotonların madde içindeki serbest ortalama yolu (MFP), başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'sinin soğurulabileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$MFP = 1 / \mu \quad (3.42)$$

Etkin iletkenlik (σ_{eff}), elektron yoğunluğu kullanılan Drude formülü ile belirlenebilir (Akman vd. 2019)

$$\sigma = \frac{N_E e^2 \tau}{m} \quad (3.43)$$

burada m , e ve τ sırasıyla elektronun kütlesini, yükünü ve elektronun rahatlama süresini ifade eder. N_E ise metreküp başına düşen elektron yoğunluğudur.

Radyasyon geçirme faktörü ise aşağıdaki eşitlikle elde edilir,

$$TF (\%) = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (3.44)$$

burada I_0 ve I sırasıyla numuneye gelen ve numuneden geçen radyasyon şiddetleridir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi bağlamında doymamış polyester tabanlı ve inorganik bileşikler ile katkılanmış polimer kompozitler hazırlanmıştır ve bu kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özellikleri incelenmiştir. Doymamış polyester reçine ile metil etil keton peroksit ve kobalt octoate (%6) birleştirilerek bir polimer matriks hazırlanmış ve bu polimer matrikse dolgu malzemesi olarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn malzemeleri ağırlıkça doymamış polyesterin %5, 10, 15 ve %20 oranlarında katkılanmıştır. Elde edilen polimer kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimleri (RPE), radyasyon geçirme oranı (TF), kütle azaltma katsayıları (μ/ρ), lineer azaltma katsayıları (μ), yarı kalınlık değerleri (HVL), onda-bir kalınlık değerleri (TVL), serbest ortalama yol değerleri (MFP), atomik ($\sigma_{t,a}$), moleküler ($\sigma_{t,m}$) ve elektronik ($\sigma_{t,el}$) tesir kesitleri, etkin atom numaraları (Z_{eff}), etkin elektron yoğunlukları (N_E) ve etkin iletkenlik (σ_{eff}) parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 59,5 ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radyoaktif kaynaklarından yayımlanan yirmi iki farklı enerjide (59,5, 81,0, 122,1, 136,5, 276,4, 302,9, 356,0, 383,9, 511,0, 661,6, 778,9, 834,8, 867,4, 964,1, 1085,9, 1112,1, 1173,2, 1212,9, 1274,5, 1299,1, 1332,5 ve 1408,0 keV) ve HPGe dedektör yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik değerler Tablo 4.1-4.26'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak çizilen grafikler Şekil 4.1-4.26'da verilmiştir.

4.1. Radyasyon Koruma Veriminin ve Radyasyon Geçirme Faktörünün İncelenmesine Ait Araştırma Bulguları

Radyasyon koruma verimi (RPE, %); herhangi bir malzemenin radyasyon şiddetini azaltmasının bir ölçüsüdür. Kullanılan doymamış polyester reçine miktarının %5-10-15-20 kadarı $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile katkılanarak hazırlanan kompozitlerin radyasyon koruma verimleri Denklem (3.32) ile belirlenmiştir.

Bu denklemde kaynaktan çıkan radyasyon (I_0) ve kompozit malzemeyi geçtikten sonraki radyasyon şiddetleri kullanılmıştır.

Radyasyon geçirme faktörü, denklem (3.44) yardımıyla ve bu denklemdeki I_0 ve I 'ın yani sırasıyla numuneye gelen ve numuneden geçen radyasyon şiddetlerinin birbirine bölümünün yüzdesi alınarak hesaplanmıştır. Farklı oranlarda katkılanmış $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn için radyasyon koruma verimleri ve radyasyon geçirme faktörü değerleri Tablo 4.1-4.4'te ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.1-4.4 'te verilmiştir.

Tablo 4.1. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon koruma verimi değerleri

Enerji (keV)	Koruma Verimi (%)			
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)
59,5	43,77±0,22	51,68±0,29	62,56±0,39	70,56±0,53
81,0	42,96±0,22	54,72±0,31	69,41±0,45	74,90±0,58
122,1	33,45±0,38	40,45±0,40	52,48±0,57	58,20±0,85
136,5	30,44±1,29	36,35±1,57	45,40±1,98	50,19±2,41
276,4	19,11±0,54	17,95±0,51	20,47±0,57	23,30±0,68
302,9	17,22±0,24	17,22±0,24	18,96±0,28	20,80±0,31
356,0	16,51±0,10	15,95±0,09	17,76±0,10	18,55±0,11
383,9	16,41±0,53	15,00±0,36	16,72±0,39	18,83±0,48
511,0	14,37±0,07	13,46±0,06	14,25±0,07	15,31±0,07
661,7	12,65±0,06	12,02±0,06	13,03±0,06	13,27±0,06
778,9	11,03±0,19	11,16±0,19	10,96±0,19	11,78±0,20
834,8	10,72±0,16	10,17±0,16	11,11±0,19	11,91±0,18
867,4	10,68±0,35	9,96±0,31	11,30±0,38	11,83±0,39
964,1	10,31±0,10	9,42±0,09	10,48±0,10	10,80±0,10
1085,9	9,93±0,17	9,49±0,16	9,49±0,16	10,41±0,17
1112,1	9,44±0,07	8,62±0,07	9,21±0,07	9,90±0,08
1173,2	9,15±0,06	8,57±0,06	9,12±0,06	10,15±0,07
1212,9	9,47±0,40	8,63±0,37	9,51±0,42	9,91±0,45
1274,5	9,11±0,05	8,68±0,05	8,63±0,05	9,72±0,06
1299,1	9,39±0,31	8,24±0,27	8,71±0,29	9,54±0,32
1332,5	8,77±0,05	8,45±0,05	8,63±0,05	9,41±0,05
1408,0	8,36±0,04	8,12±0,04	8,81±0,04	9,09±0,04

Tablo 4.2. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon koruma verimi değerleri

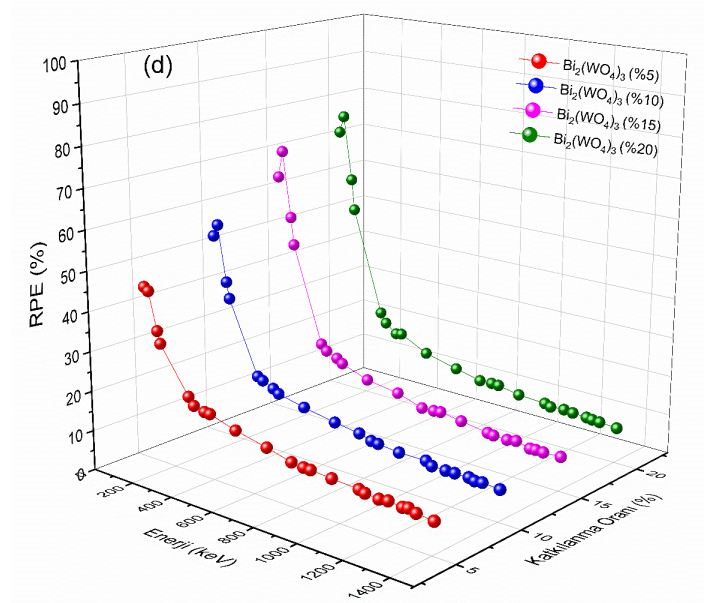
Enerji (keV)	Koruma Verimi (%)			
	Sn(%5)	Sn(%10)	Sn(%15)	Sn(%20)
59,5	45,78±0,18	61,17±0,39	77,77±0,70	82,50±0,92
81,0	31,99±0,07	40,90±0,21	53,00±0,29	59,84±0,36
122,1	21,91±0,32	24,49±0,21	33,04±0,29	33,40±0,30
136,5	19,93±0,05	22,99±0,96	29,38±1,31	30,72±1,54
276,4	14,20±0,05	14,57±0,47	17,15±0,50	16,70±0,53
302,9	13,19±0,16	14,52±0,20	16,02±0,21	15,63±0,22
356,0	12,51±0,16	12,71±0,07	15,39±0,09	14,35±0,08
383,9	11,96±0,26	12,57±0,32	14,97±0,44	14,61±0,38
511,0	11,54±0,08	10,75±0,05	13,23±0,06	12,76±0,06
661,7	10,09±0,13	9,69±0,04	11,70±0,05	11,52±0,05
778,9	9,32±0,06	9,67±0,16	10,14±0,17	10,10±0,17
834,8	9,14±0,05	9,24±0,13	10,15±0,15	10,17±0,16
867,4	8,49±0,37	9,12±0,27	10,25±0,32	9,99±0,34
964,1	8,04±0,04	8,04±0,08	9,08±0,09	9,16±0,09
1085,9	7,89±0,28	8,25±0,13	8,61±0,14	8,47±0,12
1112,1	7,53±0,04	8,16±0,06	8,91±0,07	8,78±0,07
1173,2	7,43±0,03	7,53±0,05	8,96±0,06	8,33±0,06
1212,9	7,65±0,18	7,59±0,35	8,25±0,37	8,02±0,36
1274,5	7,20±0,07	7,68±0,05	8,05±0,05	8,05±0,05
1299,1	7,48±0,32	7,55±0,26	7,92±0,25	8,03±0,27
1332,5	7,13±0,05	7,14±0,04	8,43±0,05	8,14±0,05
1408,0	7,12±0,05	7,13±0,03	8,27±0,04	7,98±0,04

Tablo 4.3. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon geçirme faktörü değerleri

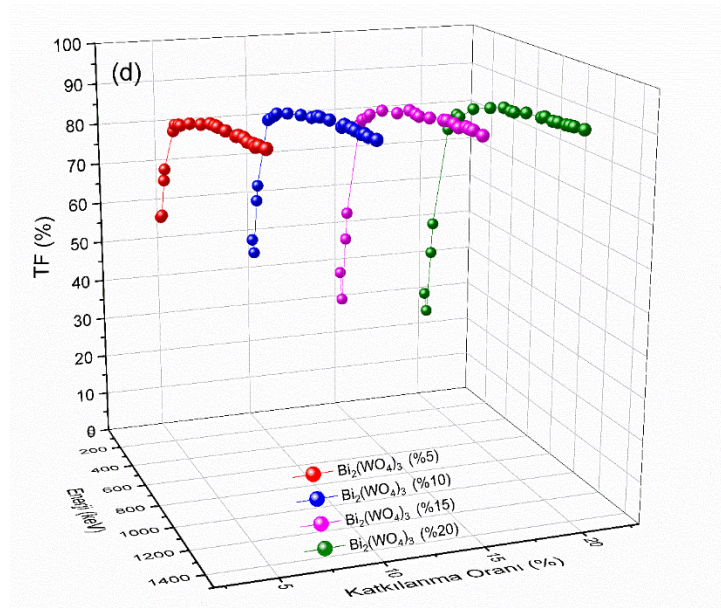
Enerji (keV)	TF (Radyasyon Geçirme Oranı) (%)			
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)
59,5	56,23±0,29	48,32±0,27	37,44±0,23	29,44±0,22
81,0	57,04±0,29	45,28±0,25	30,59±0,20	25,10±0,19
122,1	66,55±0,75	59,55±0,58	47,52±0,52	41,80±0,61
136,5	69,56±2,94	63,65±2,75	54,60±2,38	49,81±2,39
276,4	80,89±2,34	82,05±2,32	79,53±2,22	76,70±2,23
302,9	82,78±1,14	82,78±1,14	81,04±1,19	79,20±1,17
356,0	83,49±0,50	84,05±0,47	82,24±0,47	81,45±0,48
383,9	83,59±2,69	85,00±2,07	83,28±1,97	81,17±2,07
511,0	85,63±0,41	86,54±0,41	85,75±0,41	84,69±0,40
661,7	87,35±0,41	87,98±0,41	86,97±0,42	86,73±0,40
778,9	88,97±1,51	88,84±1,51	89,04±1,52	88,22±1,51
834,8	89,28±1,32	89,83±1,39	88,89±1,49	88,09±1,36
867,4	89,32±2,97	90,04±2,79	88,70±3,02	88,17±2,89
964,1	89,69±0,87	90,58±0,88	89,52±0,82	89,20±0,86
1085,9	90,07±1,56	90,51±1,53	90,51±1,53	89,59±1,45
1112,1	90,56±0,72	91,38±0,72	90,79±0,72	90,10±0,71
1173,2	90,85±0,59	91,43±0,66	90,88±0,60	89,85±0,61
1212,9	90,53±3,87	91,37±3,93	90,49±3,98	90,09±4,09
1274,5	90,89±0,52	91,32±0,54	91,37±0,53	90,28±0,54
1299,1	90,61±3,03	91,76±3,00	91,29±3,08	90,46±3,05
1332,5	91,23±0,54	91,55±0,53	91,37±0,52	90,59±0,52
1408,0	91,64±0,42	91,88±0,42	91,19±0,42	90,91±0,41

Tablo 4.4. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin radyasyon geçirme faktörü değerleri

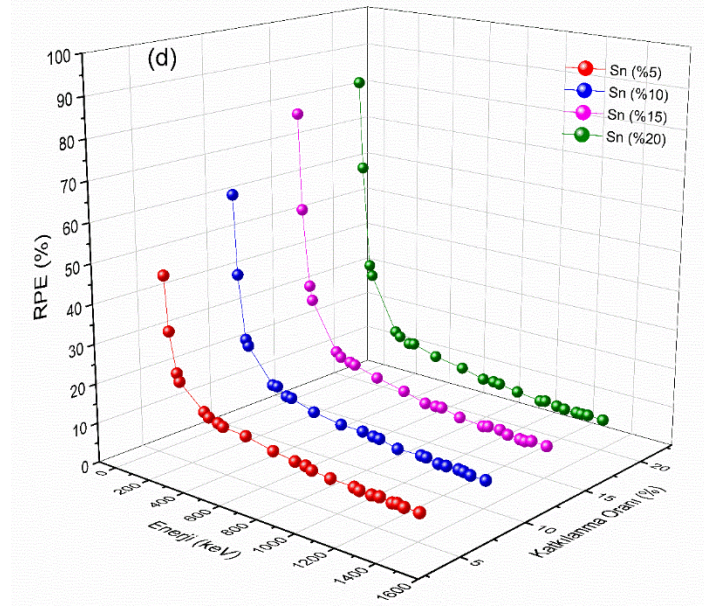
Enerji (keV)	TF (Radyasyon Geçirme Oranı) (%)			
	Sn(%5)	Sn(%10)	Sn(%15)	Sn(%20)
59,5	54,22±0,28	38,83±0,25	22,23±0,20	17,50±0,20
81,0	68,01±0,42	59,10±0,30	47,00±0,26	40,16±0,24
122,1	78,09±0,71	75,51±0,64	66,96±0,59	66,60±0,59
136,5	80,07±3,25	77,01±3,20	70,62±3,14	69,28±3,48
276,4	85,80±2,38	85,43±2,76	82,85±2,41	83,30±2,64
302,9	86,81±1,22	85,48±1,20	83,98±1,10	84,37±1,20
356,0	87,49±0,50	87,29±0,49	84,61±0,49	85,65±0,49
383,9	88,04±2,34	87,43±2,23	85,03±2,51	85,39±2,19
511,0	88,46±0,41	89,25±0,42	86,77±0,41	87,24±0,42
661,7	89,91±0,40	90,31±0,41	88,30±0,41	88,48±0,41
778,9	90,68±1,53	90,33±1,53	89,86±1,51	89,90±1,52
834,8	90,86±1,56	90,76±1,31	89,85±1,35	89,83±1,40
867,4	91,51±2,83	90,88±2,72	89,75±2,81	90,01±3,02
964,1	91,96±0,89	91,96±0,88	90,92±0,85	90,84±0,94
1085,9	92,11±1,46	91,75±1,47	91,39±1,46	91,53±1,26
1112,1	92,47±0,73	91,84±0,73	91,09±0,73	91,22±0,72
1173,2	92,57±0,61	92,47±0,62	91,04±0,59	91,67±0,61
1212,9	92,35±4,49	92,41±4,24	91,75±4,09	91,98±4,16
1274,5	92,80±0,54	92,32±0,54	91,95±0,54	91,95±0,54
1299,1	92,52±3,47	92,45±3,13	92,08±2,85	91,97±3,12
1332,5	92,87±0,54	92,86±0,54	91,57±0,54	91,86±0,53
1408,0	92,88±0,42	92,87±0,42	91,73±0,42	92,02±0,42



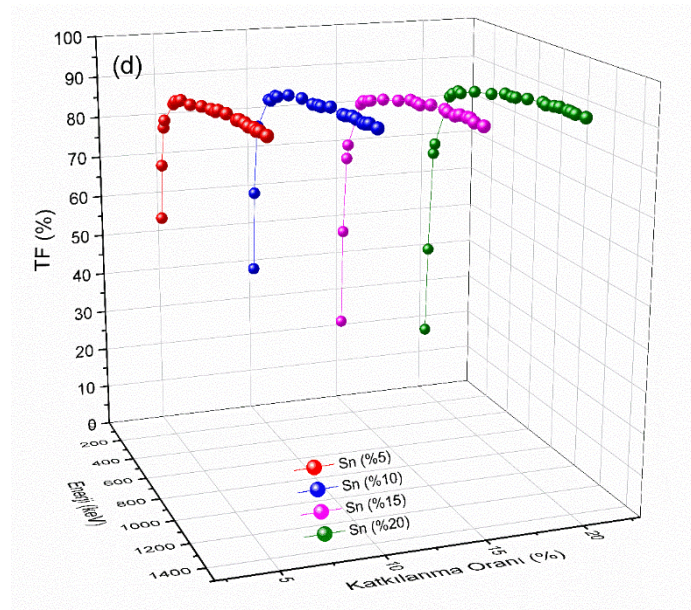
Şekil 4.1. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin RPE değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.2. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TF değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.3. Sn ile katkılanmış kompozitlerin RPE değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.4. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TF değerlerinin enerjiye göre değişimi

4.2. Kütle Azaltma Katsayısının İncelenmesine Ait Araştırma Bulguları

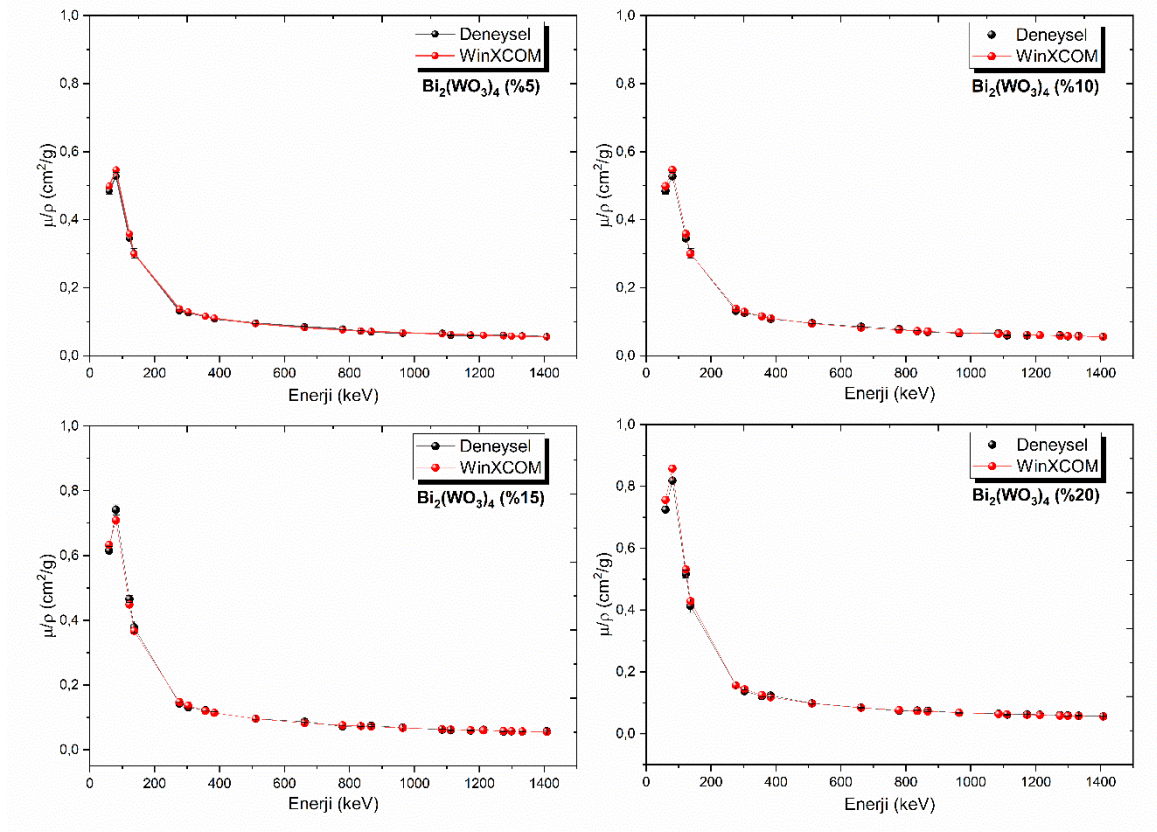
Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ , cm^2/g), kullanılan malzemenin lineer azaltma katsayısının yoğunluğuna oranı olarak ifade edilir. Kütle azaltma katsayısı maddenin fiziksel özelliğine bağlı olmadığından lineer azaltma sayısına göre daha kullanışlıdır. Bir X-ışını veya gama ışını şiddeti bilindiğinde veya belirlendiğinde radyasyona maruz kalmanın veya maruz kalınan miktarın belirlenmesinde kütle azaltma katsayısı önemli bir parametredir. Hacimce oran veya ağırlıkça oran bilindiği koşullarda kompozit malzemenin yoğunluğu hesaplanabilir. Malzeme birden fazla element içeriyorsa bunun kütle azaltma katsayısı karışım kuralı yardımıyla belirlenir. Karışım kuralı kompoziti oluşturan her bir elementin kütle azaltma katsayısının toplam kütle azaltma katsayısına katkısını belirler. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitler için teorik μ/ρ değerleri karışım kuralı kullanılarak elde edilmiştir. WinXCOM programı kullanılarak belirlenen teorik değerler ile deneysel olarak elde edilen kütle azaltma katsayıları karşılaştırılmıştır. Farklı oranlarda katkılanmış $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn için kütle azaltma katsayısı değerleri teorik değerleriyle beraber Tablo 4.5-4.6'da ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.5-4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerleri

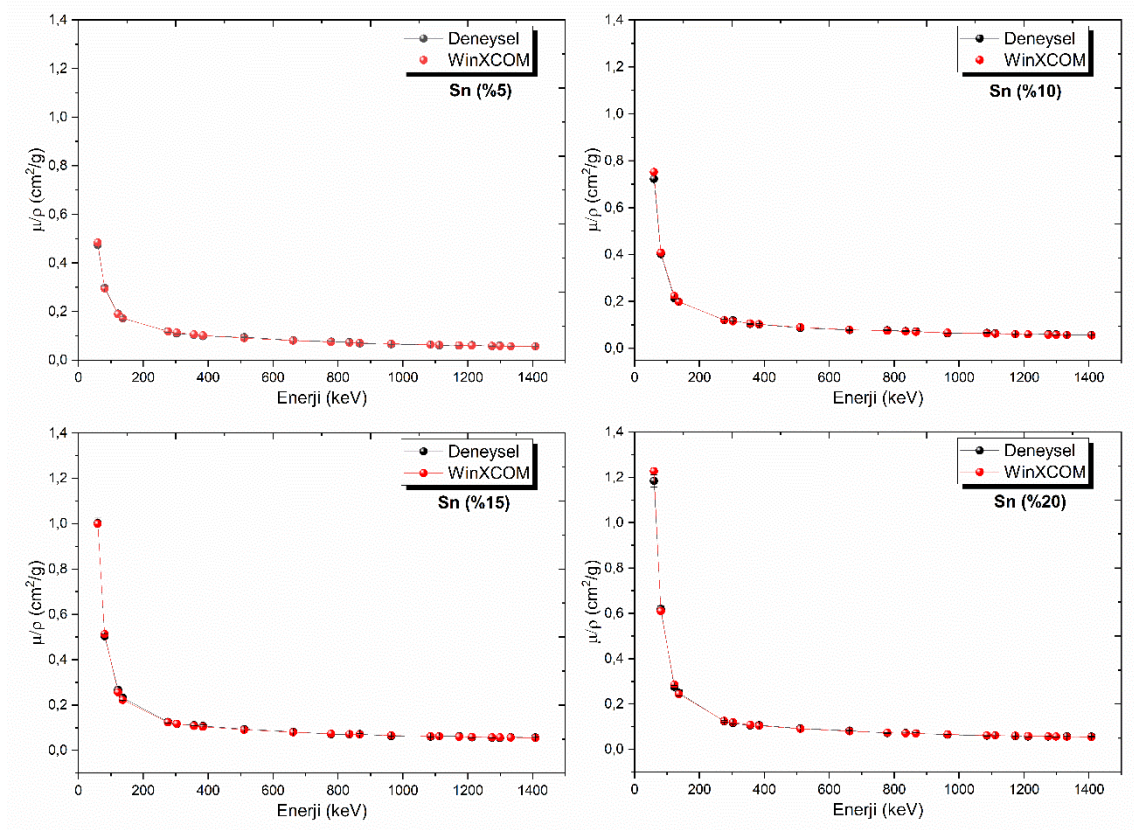
Enerji (keV)	Kütle azaltma katsayısı (cm^2/g)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM
59,5	0,3574±0,0074	0,3489	0,4843±0,0101	0,4988	0,6146±0,0129	0,6330	0,7245±0,0155	0,7565
81,0	0,3485±0,0072	0,3633	0,5277±0,0110	0,5468	0,7408±0,0156	0,7087	0,8189±0,0175	0,8577
122,1	0,2528±0,0058	0,2578	0,3452±0,0077	0,3585	0,4654±0,0106	0,4484	0,5168±0,0128	0,5313
136,5	0,2253±0,0105	0,2253	0,3008±0,0143	0,3002	0,3785±0,0182	0,3671	0,4129±0,0215	0,4287
276,4	0,1316±0,0046	0,1269	0,1317±0,0046	0,1379	0,1432±0,0049	0,1478	0,1572±0,0055	0,1570
302,9	0,1173±0,0028	0,1204	0,1258±0,0031	0,1290	0,1315±0,0033	0,1367	0,1382±0,0034	0,1438
356,0	0,1120±0,0023	0,1104	0,1157±0,0024	0,1159	0,1223±0,0025	0,1208	0,1216±0,0025	0,1253
383,9	0,1113±0,0042	0,1063	0,1082±0,0034	0,1107	0,1145±0,0035	0,1146	0,1236±0,0040	0,1183
511,0	0,0963±0,0020	0,0924	0,0963±0,0020	0,0943	0,0962±0,0020	0,0960	0,0985±0,0020	0,0976
661,7	0,0839±0,0017	0,0816	0,0853±0,0018	0,0824	0,0873±0,0018	0,0831	0,0844±0,0017	0,0838
778,9	0,0725±0,0019	0,0754	0,0788±0,0021	0,0758	0,0726±0,0019	0,0762	0,0742±0,0020	0,0765
834,8	0,0704±0,0018	0,0729	0,0714±0,0018	0,0732	0,0737±0,0019	0,0734	0,0751±0,0019	0,0737
867,4	0,0701±0,0027	0,0715	0,0699±0,0026	0,0717	0,0750±0,0030	0,0719	0,0746±0,0029	0,0721
964,1	0,0676±0,0015	0,0679	0,0659±0,0015	0,0679	0,0692±0,0015	0,0680	0,0677±0,0015	0,0681
1085,9	0,0649±0,0017	0,0639	0,0664±0,0017	0,0639	0,0623±0,0016	0,0639	0,0651±0,0017	0,0639
1112,1	0,0615±0,0013	0,0632	0,0600±0,0013	0,0631	0,0605±0,0013	0,0631	0,0618±0,0013	0,0631
1173,2	0,0596±0,0013	0,0614	0,0597±0,0013	0,0614	0,0598±0,0013	0,0613	0,0634±0,0013	0,0613
1212,9	0,0618±0,0029	0,0604	0,0601±0,0029	0,0603	0,0625±0,0030	0,0602	0,0619±0,0031	0,0602
1274,5	0,0593±0,0012	0,0588	0,0604±0,0013	0,0587	0,0564±0,0012	0,0586	0,0606±0,0013	0,0586
1299,1	0,0612±0,0024	0,0583	0,0573±0,0022	0,0582	0,0570±0,0022	0,0581	0,0594±0,0023	0,0580
1332,5	0,0570±0,0012	0,0575	0,0588±0,0012	0,0574	0,0564±0,0012	0,0573	0,0586±0,0012	0,0572
1408,0	0,0542±0,0011	0,0559	0,0564±0,0012	0,0557	0,0577±0,0012	0,0556	0,0565±0,0012	0,0555

Tablo 4.6. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerleri

Enerji (keV)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm^2/g)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM
59,5	0,4739±0,0098	0,4838	0,7226±0,0152	0,7517	1,0035±0,0220	0,9990	1,1837±0,0271	1,2267
81,0	0,2985±0,0063	0,2949	0,4018±0,0083	0,4084	0,5039±0,0104	0,5132	0,6195±0,0129	0,6096
122,1	0,1915±0,0042	0,1890	0,2146±0,0047	0,2241	0,2677±0,0059	0,2566	0,2760±0,0060	0,2864
136,5	0,1721±0,0078	0,1734	0,1996±0,0092	0,1987	0,2321±0,0113	0,2222	0,2493±0,0135	0,2437
276,4	0,1186±0,0041	0,1182	0,1203±0,0046	0,1211	0,1256±0,0044	0,1237	0,1241±0,0046	0,1261
302,9	0,1095±0,0027	0,1135	0,1198±0,0029	0,1156	0,1165±0,0028	0,1175	0,1154±0,0028	0,1193
356,0	0,1034±0,0022	0,1058	0,1039±0,0022	0,1069	0,1116±0,0023	0,1079	0,1052±0,0022	0,1089
383,9	0,0986±0,0033	0,1024	0,1027±0,0033	0,1032	0,1082±0,0039	0,1039	0,1072±0,0035	0,1046
511,0	0,0949±0,0019	0,0904	0,0869±0,0018	0,0905	0,0947±0,0019	0,0906	0,0927±0,0019	0,0906
661,7	0,0823±0,0017	0,0805	0,0779±0,0016	0,0803	0,0830±0,0017	0,0801	0,0831±0,0017	0,0799
778,9	0,0758±0,0020	0,0746	0,0777±0,0020	0,0743	0,0713±0,0019	0,0741	0,0723±0,0019	0,0738
834,8	0,0742±0,0020	0,0722	0,0740±0,0018	0,0719	0,0714±0,0018	0,0716	0,0728±0,0018	0,0713
867,4	0,0687±0,0025	0,0709	0,0730±0,0026	0,0706	0,0722±0,0027	0,0703	0,0714±0,0028	0,0700
964,1	0,0649±0,0014	0,0674	0,0640±0,0014	0,0670	0,0635±0,0014	0,0667	0,0652±0,0015	0,0664
1085,9	0,0637±0,0016	0,0635	0,0658±0,0017	0,0632	0,0601±0,0015	0,0628	0,0601±0,0015	0,0625
1112,1	0,0606±0,0013	0,0628	0,0650±0,0014	0,0624	0,0623±0,0013	0,0621	0,0624±0,0013	0,0618
1173,2	0,0598±0,0013	0,0611	0,0598±0,0013	0,0607	0,0627±0,0013	0,0604	0,0590±0,0012	0,0601
1212,9	0,0616±0,0032	0,0601	0,0603±0,0030	0,0597	0,0574±0,0028	0,0594	0,0568±0,0028	0,0591
1274,5	0,0579±0,0012	0,0585	0,0610±0,0013	0,0582	0,0560±0,0012	0,0579	0,0570±0,0012	0,0576
1299,1	0,0602±0,0026	0,0580	0,0599±0,0024	0,0576	0,0551±0,0020	0,0573	0,0568±0,0022	0,0570
1332,5	0,0572±0,0012	0,0572	0,0566±0,0012	0,0569	0,0587±0,0012	0,0566	0,0576±0,0012	0,0563
1408,0	0,0572±0,0012	0,0556	0,0565±0,0012	0,0553	0,0576±0,0012	0,0550	0,0565±0,0012	0,0547



Şekil 4.5. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.6. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayı μ/ρ (cm^2/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi

4.3. Lineer Azaltma Katsayısının İncelenmesine Ait Araştırma Bulguları

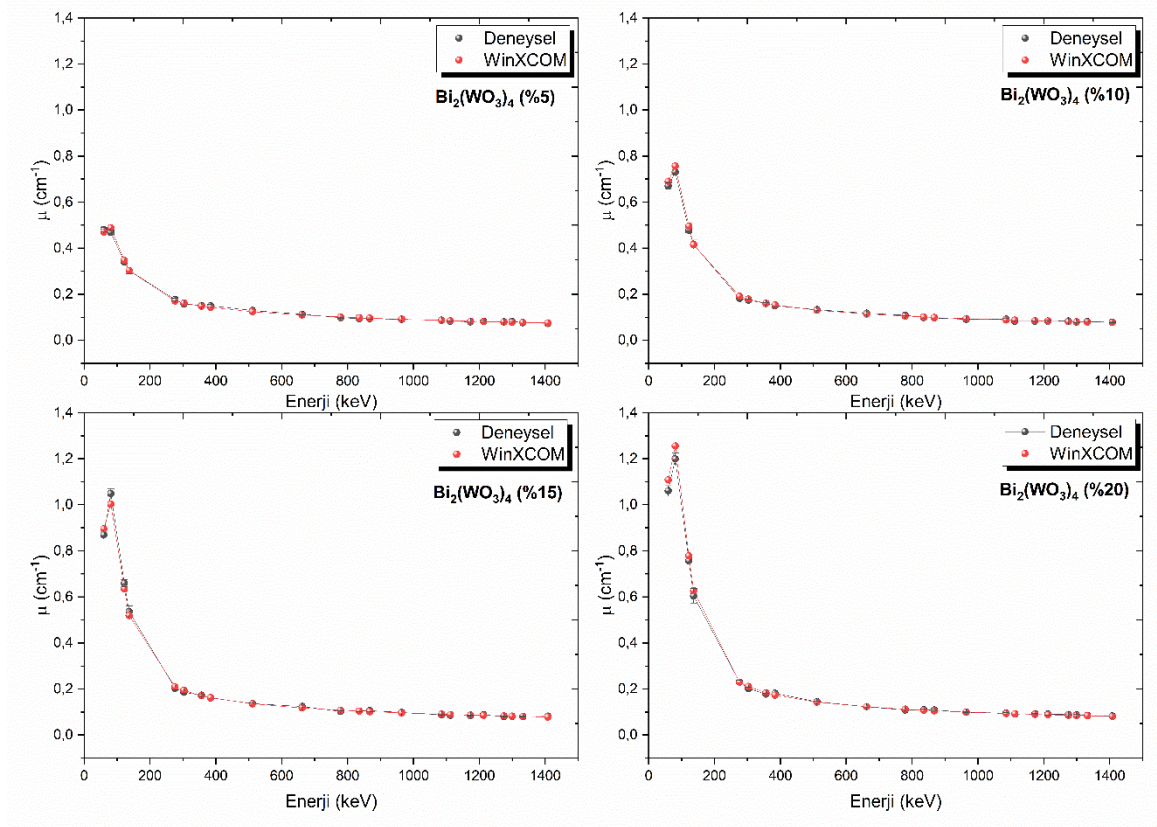
Soğurucu malzemenin yoğunluğuna bağlı olan parametrelerden biri lineer azaltma katsayısıdır. Kullanılan doymamış polyester reçine miktarının %5-10-15-20 kadarı $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile katkılanarak hazırlanan kompozitlerin lineer azaltma katsayıları (μ , cm^{-1}), deneysel olarak (Lambert-Beer) yasası ile belirlenmiştir ve denklem (3.33) kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları elde edilen teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Farklı oranlarda katkılanmış $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn için lineer azaltma katsayısı değerleri teorik değerleriyle beraber Tablo 4.7-4.8’de ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.7-4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.7. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerinin lineer azaltma katsayı (μ, cm^{-1}) değerleri

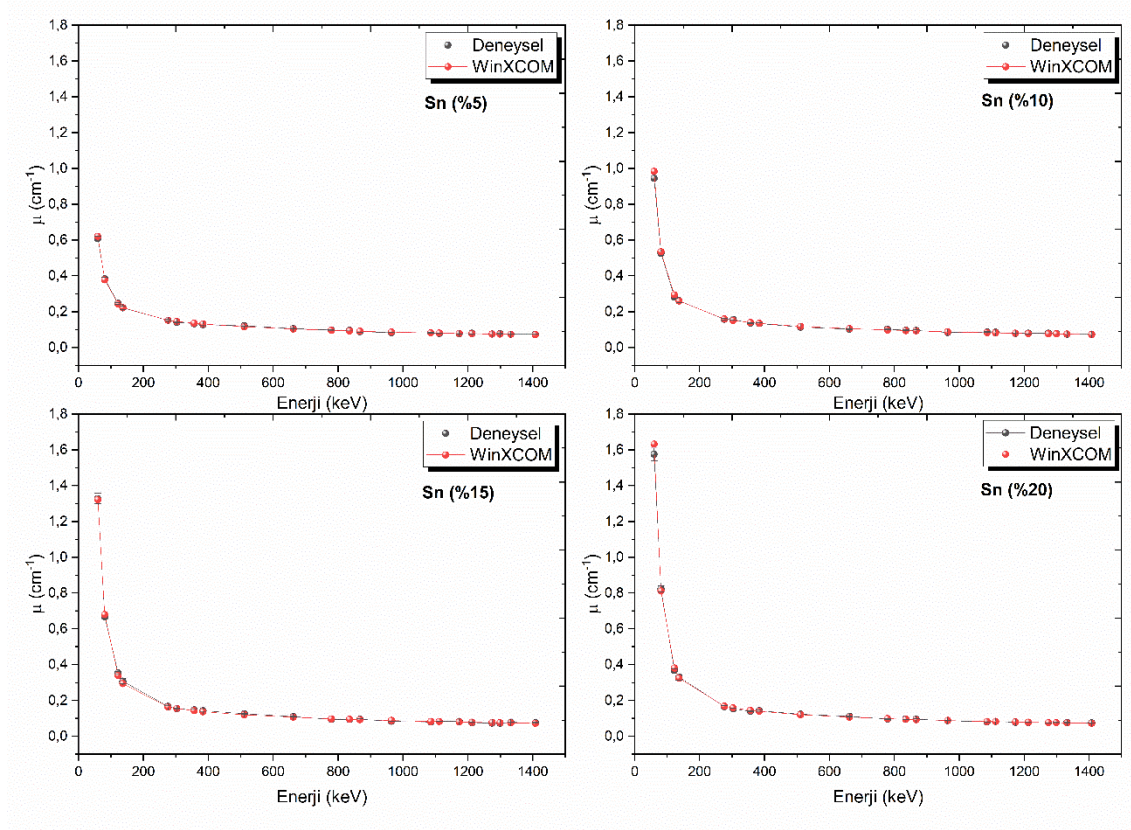
Enerji (keV)	Lineer Azaltma Katsayısı (cm^{-1})							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM
59,5	0,4810±0,0099	0,4697	0,6703±0,0139	0,6904	0,8699±0,0182	0,8959	1,0610±0,0227	1,1078
81,0	0,4690±0,0097	0,4890	0,7303±0,0152	0,7568	1,0486±0,0220	1,0031	1,1993±0,0257	1,2561
122,1	0,3402±0,0078	0,3470	0,4777±0,0106	0,4961	0,6588±0,0150	0,6347	0,7568±0,0187	0,7780
136,5	0,3032±0,0142	0,3033	0,4164±0,0198	0,4154	0,5358±0,0257	0,5196	0,6047±0,0315	0,6278
276,4	0,1772±0,0062	0,1708	0,1823±0,0063	0,1909	0,2028±0,0070	0,2093	0,2302±0,0081	0,2299
302,9	0,1578±0,0038	0,1621	0,1741±0,0042	0,1786	0,1861±0,0046	0,1935	0,2023±0,0050	0,2106
356,0	0,1508±0,0031	0,1487	0,1601±0,0033	0,1604	0,1731±0,0036	0,1710	0,1781±0,0037	0,1835
383,9	0,1498±0,0057	0,1430	0,1498±0,0047	0,1532	0,1620±0,0050	0,1623	0,1810±0,0059	0,1732
511,0	0,1296±0,0027	0,1244	0,1332±0,0027	0,1305	0,1361±0,0028	0,1359	0,1442±0,0030	0,1429
661,7	0,1129±0,0023	0,1098	0,1180±0,0024	0,1140	0,1236±0,0025	0,1176	0,1236±0,0025	0,1227
778,9	0,0976±0,0026	0,1015	0,1091±0,0029	0,1049	0,1027±0,0027	0,1078	0,1087±0,0029	0,1121
834,8	0,0948±0,0024	0,0981	0,0988±0,0025	0,1013	0,1043±0,0027	0,1039	0,1100±0,0028	0,1079
867,4	0,0943±0,0037	0,0963	0,0967±0,0036	0,0993	0,1061±0,0042	0,1018	0,1092±0,0042	0,1056
964,1	0,0909±0,0020	0,0913	0,0912±0,0020	0,0940	0,0980±0,0022	0,0963	0,0991±0,0022	0,0998
1085,9	0,0874±0,0023	0,0860	0,0919±0,0024	0,0884	0,0882±0,0023	0,0904	0,0953±0,0025	0,0935
1112,1	0,0828±0,0018	0,0850	0,0831±0,0018	0,0874	0,0856±0,0018	0,0893	0,0904±0,0019	0,0923
1173,2	0,0802±0,0017	0,0827	0,0826±0,0018	0,0849	0,0847±0,0018	0,0868	0,0929±0,0020	0,0897
1212,9	0,0831±0,0039	0,0813	0,0832±0,0039	0,0834	0,0885±0,0043	0,0852	0,0906±0,0045	0,0881
1274,5	0,0798±0,0017	0,0792	0,0837±0,0017	0,0813	0,0799±0,0017	0,0830	0,0888±0,0019	0,0858
1299,1	0,0824±0,0032	0,0784	0,0793±0,0030	0,0805	0,0807±0,0032	0,0822	0,0870±0,0034	0,0849
1332,5	0,0767±0,0016	0,0774	0,0813±0,0017	0,0794	0,0799±0,0017	0,0811	0,0858±0,0018	0,0837
1408,0	0,0729±0,0015	0,0752	0,0780±0,0016	0,0772	0,0816±0,0017	0,0788	0,0827±0,0017	0,0813

Tablo 4.8. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı (μ , cm^{-1}) değerleri

Enerji (keV)	Lineer Azaltma Katsayısı (cm^{-1})							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM
59,5	0,6081±0,0126	0,6208	0,9459±0,0199	0,9840	1,3283±0,0291	1,3224	1,5748±0,0361	1,6319
81,0	0,3830±0,0080	0,3783	0,5260±0,0109	0,5345	0,6670±0,0138	0,6793	0,8241±0,0172	0,8110
122,1	0,2457±0,0054	0,2425	0,2809±0,0061	0,2934	0,3544±0,0078	0,3396	0,3672±0,0080	0,3810
136,5	0,2209±0,0100	0,2224	0,2612±0,0120	0,2601	0,3072±0,0150	0,2941	0,3316±0,0179	0,3243
276,4	0,1522±0,0052	0,1517	0,1574±0,0060	0,1585	0,1662±0,0059	0,1638	0,1651±0,0062	0,1678
302,9	0,1405±0,0034	0,1457	0,1569±0,0038	0,1513	0,1543±0,0037	0,1556	0,1535±0,0038	0,1587
356,0	0,1327±0,0028	0,1358	0,1360±0,0028	0,1400	0,1477±0,0031	0,1429	0,1399±0,0029	0,1449
383,9	0,1266±0,0042	0,1314	0,1344±0,0044	0,1351	0,1433±0,0051	0,1376	0,1427±0,0046	0,1392
511,0	0,1218±0,0025	0,1160	0,1137±0,0023	0,1185	0,1254±0,0026	0,1199	0,1233±0,0025	0,1206
661,7	0,1056±0,0022	0,1033	0,1019±0,0021	0,1051	0,1099±0,0023	0,1060	0,1106±0,0023	0,1063
778,9	0,0972±0,0025	0,0958	0,1017±0,0027	0,0973	0,0944±0,0025	0,0981	0,0962±0,0025	0,0982
834,8	0,0952±0,0025	0,0927	0,0969±0,0024	0,0941	0,0946±0,0024	0,0948	0,0968±0,0025	0,0949
867,4	0,0882±0,0033	0,0910	0,0956±0,0034	0,0924	0,0956±0,0035	0,0930	0,0950±0,0037	0,0931
964,1	0,0833±0,0018	0,0864	0,0838±0,0019	0,0877	0,0841±0,0019	0,0883	0,0868±0,0020	0,0883
1085,9	0,0817±0,0021	0,0815	0,0861±0,0022	0,0827	0,0795±0,0020	0,0832	0,0800±0,0019	0,0832
1112,1	0,0777±0,0017	0,0806	0,0851±0,0018	0,0817	0,0824±0,0018	0,0822	0,0831±0,0018	0,0822
1173,2	0,0767±0,0016	0,0784	0,0783±0,0017	0,0795	0,0830±0,0017	0,0800	0,0785±0,0017	0,0800
1212,9	0,0791±0,0042	0,0771	0,0789±0,0040	0,0782	0,0760±0,0037	0,0786	0,0755±0,0037	0,0786
1274,5	0,0743±0,0015	0,0751	0,0799±0,0017	0,0762	0,0741±0,0015	0,0766	0,0758±0,0016	0,0766
1299,1	0,0773±0,0033	0,0744	0,0785±0,0031	0,0754	0,0729±0,0027	0,0759	0,0756±0,0030	0,0759
1332,5	0,0735±0,0015	0,0734	0,0741±0,0015	0,0744	0,0778±0,0016	0,0749	0,0767±0,0016	0,0748
1408,0	0,0733±0,0015	0,0714	0,0740±0,0015	0,0724	0,0763±0,0016	0,0728	0,0751±0,0015	0,0728



Şekil 4.7. $\text{Bi}_2(\text{WO}_3)_4$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı (μ , cm^{-1}) değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.8. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin lineer azaltma katsayı μ/ρ (cm²/g) değerlerinin enerjiye göre değişimi

4.4. Yarı Kalınlık (HVL), Onda Bir Kalınlık (TVL) ve Serbest Ortalama Yol (MFP) Parametrelerine Ait Araştırma Bulguları

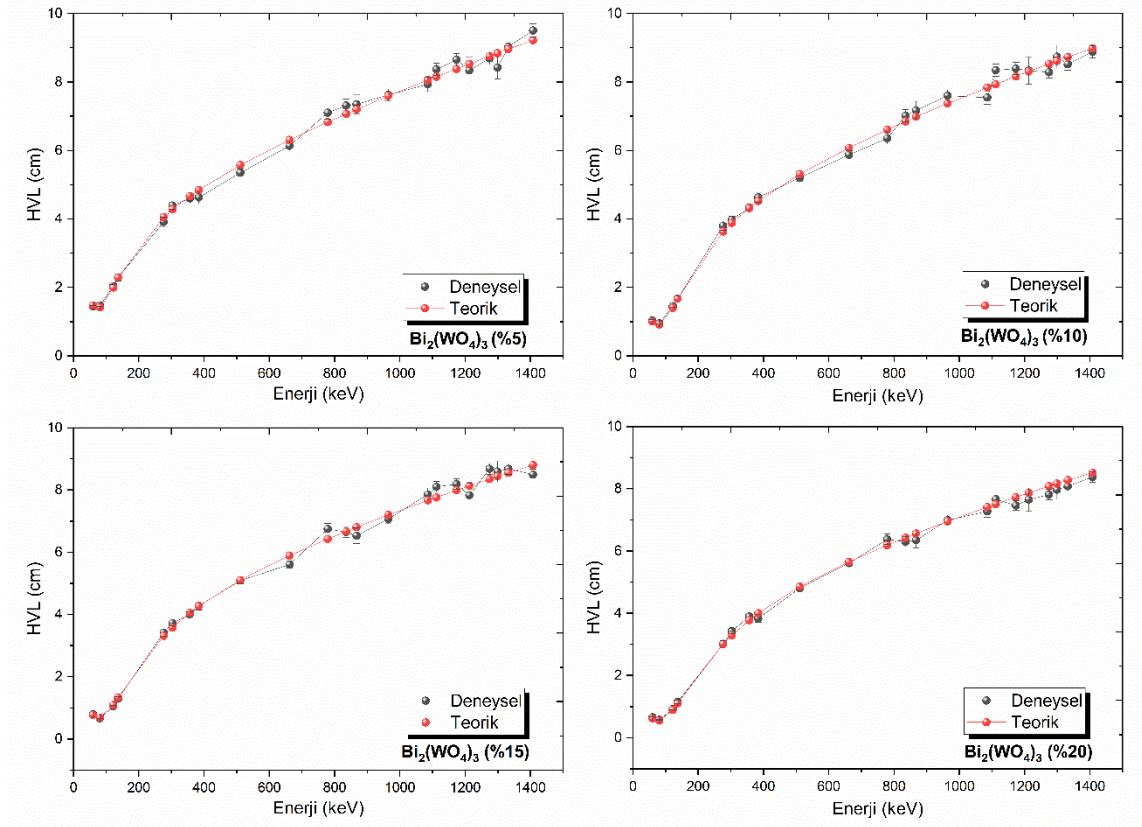
Yarı kalınlık değeri (HVL, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %50'sinin soğurulduğu numune kalınlığını tanımlar. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerin HVL değerleri $0,693/\mu$ ifadesi yardımı ile bulunmuştur. Onda-bir kalınlık değeri (TVL, cm), başlangıç radyasyon şiddetinin %10'nun geçebileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır yani başlangıç radyasyon şiddetinin %90'nın soğurulduğu numune kalınlığıdır. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozit numunelerin TVL değerleri $2,303/\mu$ ifadesi yardımıyla ile bulunmuştur. Fotonların madde içindeki serbest ortalama yolu, başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'sinin geçirebileceği numune kalınlığı olarak tanımlanır. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozit numuneler için MFP değerleri $1/\mu$ ifadesi yardımı ile bulunmuştur. HVL, TVL ve MFP değerlerinin deneysel ve teorik değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı oranlarda katkılanmış $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn için HVL, TVL ve MFP parametrelerinin teorik ve deneysel değerleriyle beraber Tablo 4.9-4.14'te listelenmiştir ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.9-4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.9. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL (cm) değerleri

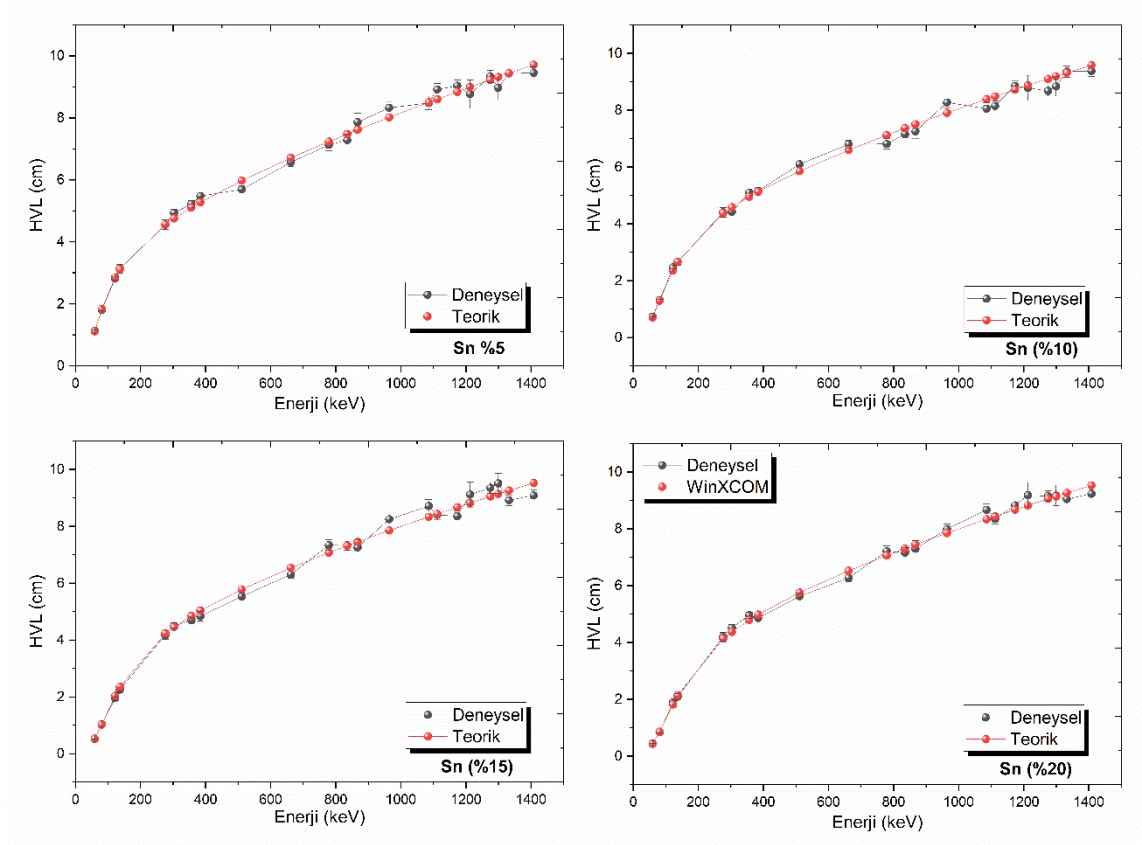
Enerji (keV)	HVL (cm)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	1,441±0,030	1,476	1,034±0,021	1,004	0,797±0,017	0,774	0,653±0,014	0,626
81,0	1,478±0,030	1,417	0,949±0,020	0,916	0,661±0,014	0,691	0,578±0,012	0,552
122,1	2,037±0,047	1,997	1,451±0,032	1,397	1,052±0,024	1,092	0,916±0,023	0,891
136,5	2,286±0,107	2,285	1,665±0,079	1,668	1,294±0,062	1,334	1,146±0,060	1,104
276,4	3,912±0,136	4,059	3,802±0,132	3,631	3,419±0,117	3,312	3,011±0,106	3,015
302,9	4,392±0,107	4,277	3,980±0,097	3,882	3,725±0,093	3,582	3,426±0,085	3,292
356,0	4,597±0,096	4,663	4,328±0,090	4,321	4,004±0,083	4,053	3,893±0,081	3,777
383,9	4,629±0,176	4,846	4,628±0,146	4,525	4,279±0,132	4,271	3,830±0,124	4,001
511,0	5,349±0,110	5,574	5,203±0,107	5,312	5,092±0,105	5,102	4,807±0,099	4,852
661,7	6,137±0,126	6,311	5,875±0,121	6,078	5,607±0,115	5,892	5,610±0,115	5,650
778,9	7,101±0,186	6,829	6,355±0,167	6,606	6,747±0,177	6,428	6,376±0,168	6,186
834,8	7,315±0,182	7,066	7,013±0,177	6,845	6,646±0,173	6,669	6,299±0,159	6,426
867,4	7,348±0,285	7,201	7,166±0,265	6,981	6,531±0,258	6,806	6,346±0,244	6,561
964,1	7,623±0,169	7,590	7,601±0,169	7,371	7,072±0,156	7,198	6,992±0,155	6,949
1085,9	7,933±0,210	8,056	7,542±0,197	7,837	7,856±0,206	7,665	7,271±0,187	7,410
1112,1	8,369±0,180	8,155	8,346±0,179	7,935	8,099±0,174	7,762	7,664±0,165	7,506
1173,2	8,647±0,182	8,383	8,395±0,178	8,161	8,186±0,173	7,988	7,461±0,158	7,727
1212,9	8,338±0,393	8,530	8,335±0,395	8,307	7,832±0,379	8,132	7,651±0,380	7,869
1274,5	8,690±0,181	8,755	8,285±0,173	8,528	8,678±0,181	8,351	7,810±0,163	8,083
1299,1	8,416±0,328	8,840	8,742±0,335	8,613	8,593±0,337	8,434	7,968±0,313	8,164
1332,5	9,035±0,188	8,959	8,521±0,177	8,730	8,679±0,180	8,551	8,081±0,168	8,278
1408,0	9,506±0,195	9,218	8,882±0,182	8,984	8,493±0,174	8,801	8,378±0,172	8,521

Tablo 4.10. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL (cm) değerleri

Enerji (keV)	HVL (cm)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	1,140±0,024	1,116	0,733±0,015	0,704	0,522±0,011	0,524	0,440±0,010	0,425
81,0	1,810±0,038	1,832	1,318±0,027	1,297	1,039±0,022	1,020	0,841±0,018	0,855
122,1	2,821±0,062	2,858	2,468±0,054	2,363	1,956±0,043	2,041	1,888±0,041	1,819
136,5	3,138±0,142	3,116	2,654±0,122	2,664	2,256±0,110	2,357	2,090±0,113	2,138
276,4	4,554±0,156	4,570	4,403±0,167	4,374	4,170±0,147	4,233	4,198±0,157	4,130
302,9	4,932±0,120	4,759	4,419±0,108	4,581	4,494±0,108	4,456	4,516±0,111	4,368
356,0	5,222±0,109	5,105	5,097±0,106	4,953	4,694±0,098	4,851	4,954±0,103	4,785
383,9	5,477±0,182	5,274	5,158±0,167	5,131	4,838±0,173	5,038	4,859±0,158	4,981
511,0	5,691±0,117	5,973	6,095±0,125	5,851	5,528±0,114	5,782	5,622±0,116	5,749
661,7	6,562±0,134	6,710	6,800±0,140	6,594	6,307±0,129	6,537	6,267±0,129	6,519
778,9	7,128±0,186	7,237	6,815±0,179	7,122	7,340±0,192	7,069	7,206±0,189	7,058
834,8	7,281±0,192	7,479	7,152±0,176	7,364	7,331±0,183	7,312	7,157±0,181	7,303
867,4	7,859±0,290	7,618	7,250±0,261	7,503	7,253±0,269	7,451	7,294±0,285	7,443
964,1	8,326±0,185	8,019	8,269±0,183	7,901	8,247±0,182	7,850	7,989±0,180	7,846
1085,9	8,484±0,217	8,501	8,052±0,206	8,381	8,717±0,223	8,332	8,665±0,210	8,331
1112,1	8,916±0,192	8,603	8,148±0,175	8,482	8,408±0,181	8,433	8,345±0,180	8,432
1173,2	9,034±0,190	8,840	8,852±0,187	8,717	8,356±0,176	8,667	8,824±0,186	8,668
1212,9	8,766±0,461	8,994	8,783±0,440	8,869	9,116±0,446	8,819	9,178±0,453	8,820
1274,5	9,335±0,194	9,227	8,679±0,181	9,100	9,349±0,195	9,049	9,146±0,191	9,050
1299,1	8,970±0,382	9,316	8,835±0,347	9,188	9,508±0,351	9,136	9,168±0,361	9,138
1332,5	9,436±0,196	9,441	9,356±0,195	9,311	8,913±0,186	9,259	9,043±0,188	9,261
1408,0	9,451±0,194	9,712	9,372±0,192	9,578	9,086±0,186	9,524	9,229±0,189	9,526



Şekil 4.9. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL değerlerinin enerjiye göre değişimi



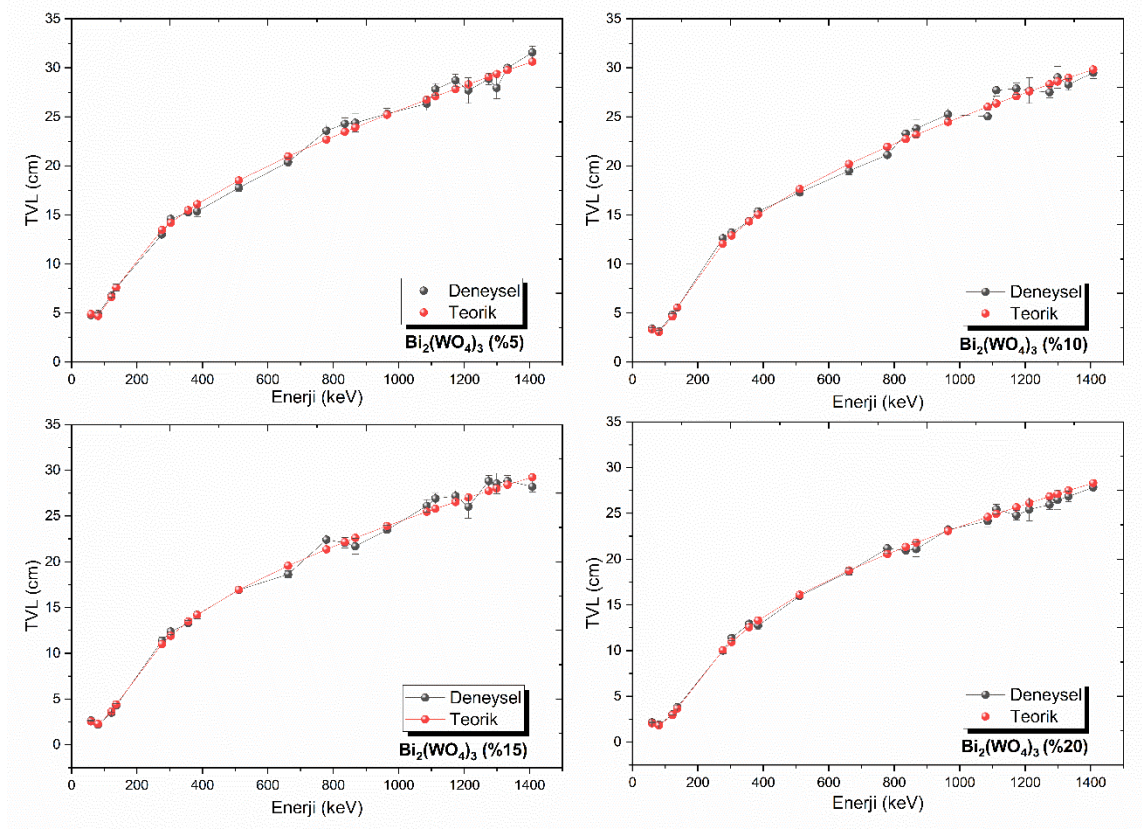
Şekil 4.10. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin HVL değerlerinin enerjiye göre değişimi

Tablo 4.11. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerleri

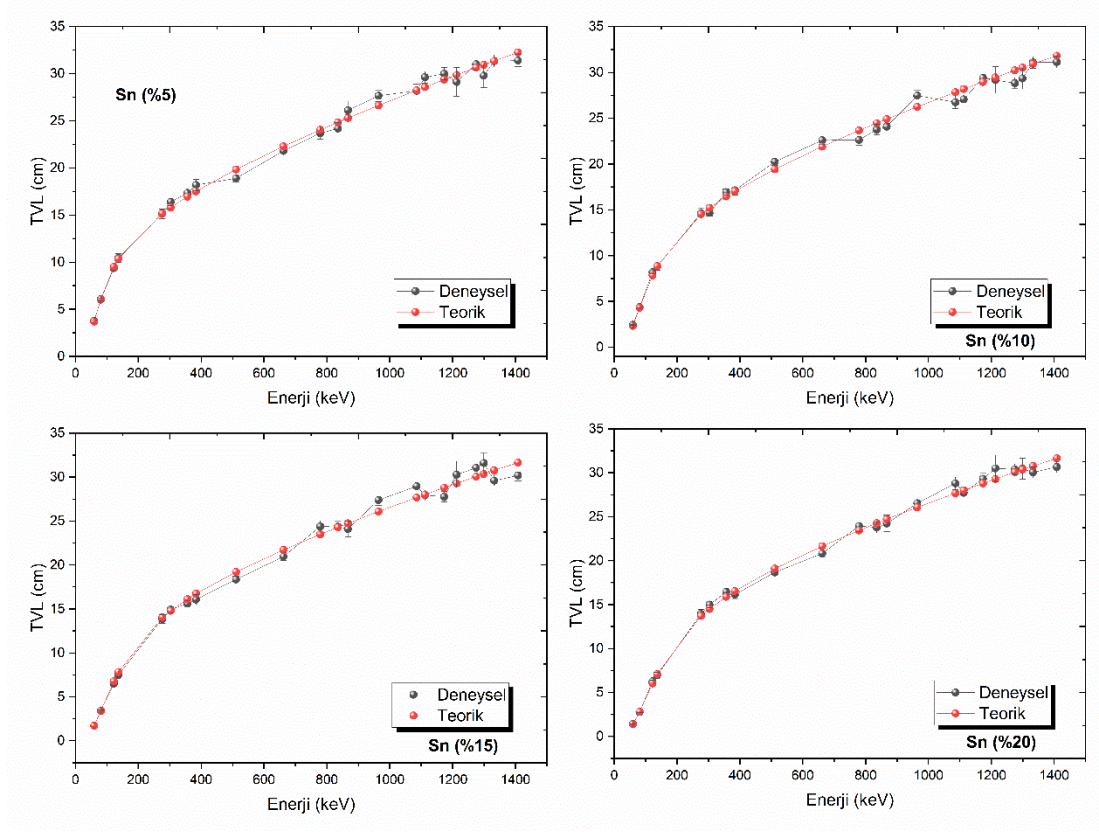
Enerji (keV)	TVL (cm)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	4,787±0,099	4,903	3,435±0,071	3,335	2,647±0,055	2,570	2,170±0,046	2,079
81,0	4,909±0,101	4,709	3,153±0,066	3,043	2,196±0,046	2,295	1,920±0,041	1,833
122,1	6,767±0,155	6,635	4,820±0,107	4,641	3,495±0,080	3,628	3,042±0,075	2,960
136,5	7,594±0,356	7,592	5,530±0,263	5,543	4,298±0,206	4,432	3,808±0,198	3,668
276,4	12,996±0,452	13,483	12,629±0,438	12,061	11,356±0,390	11,003	10,004±0,353	10,017
302,9	14,589±0,354	14,206	13,222±0,321	12,896	12,374±0,307	11,900	11,381±0,283	10,936
356,0	15,272±0,319	15,490	14,379±0,299	14,353	13,303±0,277	13,465	12,931±0,270	12,546
383,9	15,376±0,583	16,098	15,374±0,484	15,030	14,213±0,440	14,189	12,723±0,413	13,292
511,0	17,769±0,365	18,516	17,283±0,355	17,645	16,916±0,348	16,947	15,968±0,328	16,117
661,7	20,387±0,419	20,965	19,515±0,401	20,191	18,625±0,383	19,572	18,637±0,382	18,768
778,9	23,588±0,619	22,687	21,111±0,554	21,945	22,412±0,589	21,355	21,180±0,557	20,549
834,8	24,298±0,605	23,473	23,297±0,589	22,739	22,077±0,576	22,155	20,926±0,528	21,345
867,4	24,409±0,946	23,922	23,806±0,879	23,191	21,696±0,857	22,610	21,080±0,810	21,797
964,1	25,323±0,563	25,212	25,251±0,562	24,485	23,494±0,517	23,910	23,226±0,515	23,083
1085,9	26,351±0,696	26,763	25,055±0,655	26,035	26,096±0,684	25,462	24,153±0,622	24,615
1112,1	27,801±0,598	27,089	27,724±0,596	26,359	26,906±0,579	25,786	25,458±0,547	24,934
1173,2	28,726±0,604	27,847	27,886±0,593	27,111	27,192±0,573	26,534	24,785±0,523	25,669
1212,9	27,699±1,307	28,337	27,689±1,313	27,596	26,018±1,258	27,015	25,418±1,262	26,140
1274,5	28,868±0,601	29,082	27,523±0,574	28,331	28,827±0,600	27,743	25,944±0,541	26,852
1299,1	27,958±1,089	29,365	29,040±1,112	28,610	28,546±1,119	28,019	26,468±1,038	27,121
1332,5	30,013±0,626	29,763	28,308±0,589	29,001	28,830±0,599	28,405	26,845±0,559	27,498
1408,0	31,579±0,648	30,622	29,504±0,605	29,844	28,213±0,579	29,236	27,832±0,571	28,307

Tablo 4.12. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerleri

Enerji (keV)	TVL (cm)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	3,787±0,078	3,709	2,434±0,051	2,340	1,733±0,038	1,741	1,462±0,033	1,411
81,0	6,012±0,126	6,086	4,378±0,090	4,308	3,452±0,072	3,390	2,794±0,058	2,839
122,1	9,370±0,206	9,494	8,198±0,178	7,848	6,498±0,142	6,780	6,271±0,137	6,044
136,5	10,424±0,472	10,351	8,815±0,407	8,851	7,495±0,365	7,829	6,944±0,375	7,101
276,4	15,128±0,517	15,181	14,627±0,556	14,529	13,853±0,489	14,060	13,946±0,522	13,721
302,9	16,385±0,400	15,808	14,678±0,359	15,217	14,928±0,357	14,803	15,000±0,368	14,511
356,0	17,348±0,361	16,959	16,933±0,352	16,452	15,592±0,324	16,115	16,458±0,342	15,896
383,9	18,194±0,605	17,522	17,136±0,555	17,044	16,071±0,574	16,736	16,141±0,525	16,546
511,0	18,906±0,388	19,843	20,248±0,416	19,436	18,365±0,377	19,206	18,677±0,384	19,098
661,7	21,797±0,447	22,289	22,589±0,464	21,906	20,952±0,430	21,715	20,820±0,427	21,656
778,9	23,680±0,619	24,041	22,639±0,594	23,660	24,384±0,637	23,483	23,939±0,628	23,446
834,8	24,188±0,637	24,846	23,757±0,586	24,463	24,352±0,609	24,290	23,776±0,603	24,260
867,4	26,109±0,962	25,308	24,085±0,866	24,923	24,095±0,895	24,751	24,230±0,948	24,725
964,1	27,658±0,614	26,637	27,468±0,609	26,246	27,395±0,605	26,079	26,540±0,598	26,064
1085,9	28,184±0,720	28,241	26,748±0,685	27,841	28,956±0,742	27,677	28,784±0,699	27,674
1112,1	29,617±0,637	28,579	27,066±0,582	28,177	27,932±0,601	28,013	27,723±0,596	28,012
1173,2	30,011±0,632	29,367	29,405±0,621	28,957	27,758±0,584	28,792	29,314±0,618	28,794
1212,9	29,121±1,530	29,876	29,178±1,460	29,461	30,284±1,480	29,295	30,489±1,506	29,299
1274,5	31,010±0,646	30,653	28,831±0,601	30,229	31,057±0,647	30,059	30,384±0,633	30,065
1299,1	29,797±1,268	30,948	29,349±1,154	30,521	31,584±1,165	30,350	30,456±1,200	30,356
1332,5	31,347±0,653	31,363	31,080±0,648	30,930	29,610±0,617	30,758	30,039±0,625	30,764
1408,0	31,396±0,644	32,262	31,132±0,639	31,817	30,183±0,619	31,639	30,659±0,629	31,645



Şekil 4.11. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi



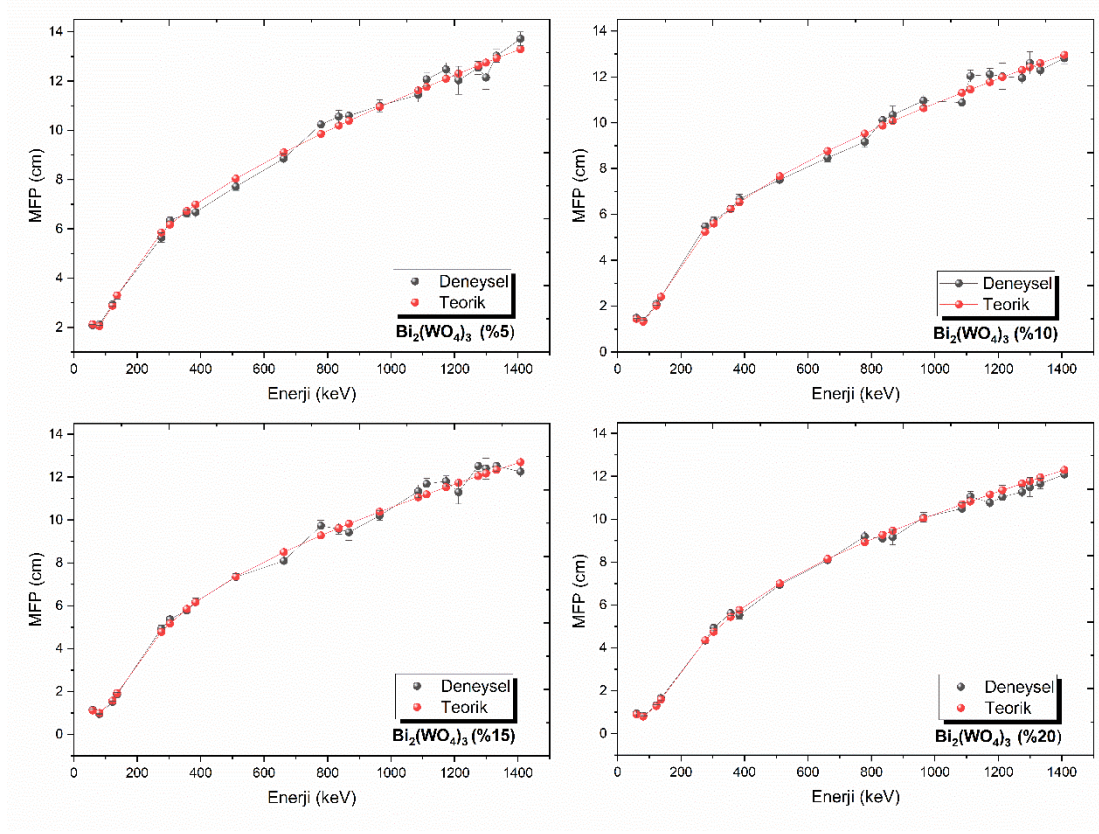
Şekil 4.12. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin TVL değerlerinin enerjiye göre değişimi

Tablo 4.13. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerleri

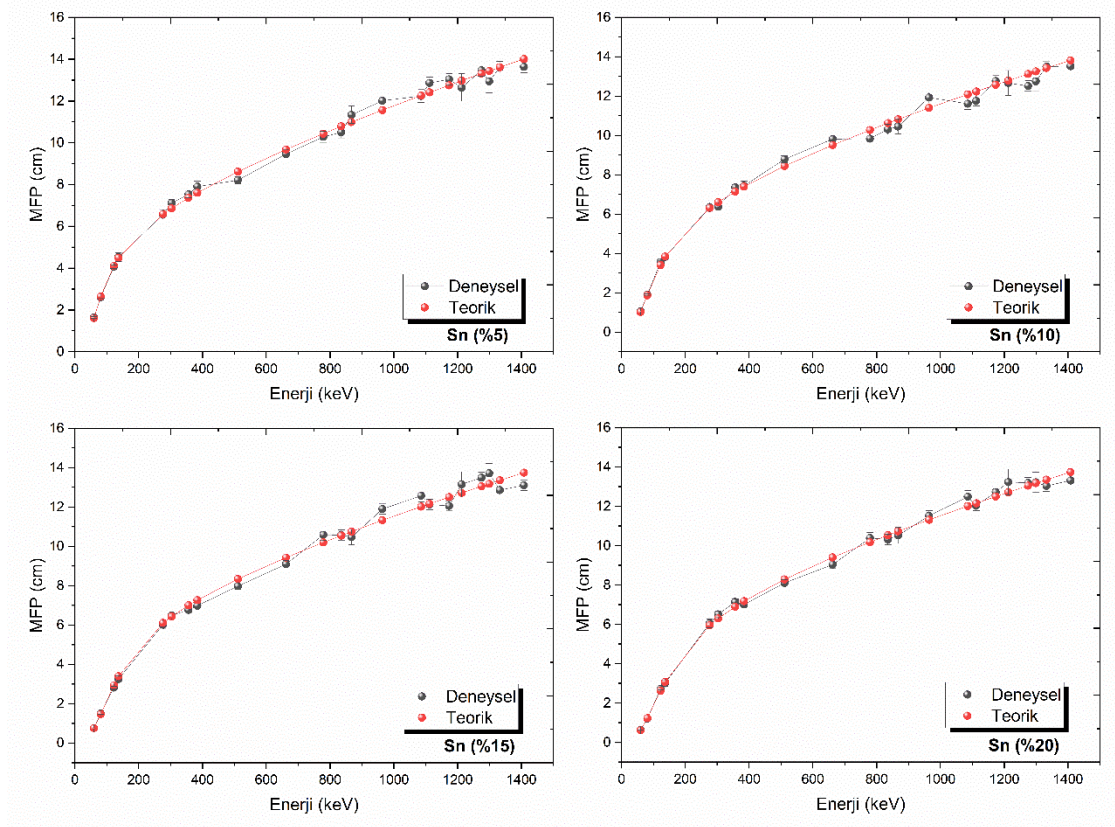
Enerji (keV)	MFP (cm)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	2,079±0,043	2,129	1,492±0,031	1,448	1,150±0,024	1,116	0,943±0,020	0,903
81,0	2,132±0,044	2,045	1,369±0,028	1,321	0,954±0,020	0,997	0,834±0,018	0,796
122,1	2,939±0,067	2,882	2,093±0,047	2,016	1,518±0,035	1,575	1,321±0,033	1,285
136,5	3,298±0,154	3,297	2,402±0,114	2,407	1,866±0,090	1,925	1,654±0,086	1,593
276,4	5,644±0,196	5,856	5,485±0,190	5,238	4,932±0,169	4,779	4,345±0,153	4,350
302,9	6,336±0,154	6,170	5,742±0,139	5,601	5,374±0,133	5,168	4,943±0,123	4,749
356,0	6,633±0,138	6,727	6,245±0,130	6,233	5,777±0,120	5,848	5,616±0,117	5,449
383,9	6,678±0,253	6,991	6,677±0,210	6,528	6,173±0,191	6,162	5,525±0,179	5,773
511,0	7,717±0,159	8,041	7,506±0,154	7,663	7,347±0,151	7,360	6,935±0,143	7,000
661,7	8,854±0,182	9,105	8,475±0,174	8,769	8,089±0,166	8,500	8,094±0,166	8,151
778,9	10,244±0,269	9,853	9,168±0,241	9,531	9,733±0,256	9,274	9,198±0,242	8,925
834,8	10,553±0,263	10,194	10,118±0,256	9,875	9,588±0,250	9,622	9,088±0,229	9,270
867,4	10,601±0,411	10,389	10,339±0,382	10,072	9,422±0,372	9,820	9,155±0,352	9,466
964,1	10,998±0,244	10,950	10,966±0,244	10,634	10,203±0,224	10,384	10,087±0,224	10,025
1085,9	11,444±0,302	11,623	10,881±0,285	11,307	11,333±0,297	11,058	10,489±0,270	10,690
1112,1	12,074±0,260	11,765	12,041±0,259	11,448	11,685±0,251	11,199	11,056±0,238	10,829
1173,2	12,476±0,262	12,094	12,111±0,257	11,774	11,809±0,249	11,524	10,764±0,227	11,148
1212,9	12,030±0,568	12,307	12,025±0,570	11,985	11,300±0,546	11,732	11,039±0,548	11,352
1274,5	12,537±0,261	12,630	11,953±0,249	12,304	12,520±0,261	12,049	11,268±0,235	11,662
1299,1	12,142±0,473	12,753	12,612±0,483	12,425	12,397±0,486	12,168	11,495±0,451	11,779
1332,5	13,034±0,272	12,926	12,294±0,256	12,595	12,521±0,260	12,336	11,659±0,243	11,942
1408,0	13,715±0,281	13,299	12,813±0,263	12,961	12,253±0,251	12,697	12,087±0,248	0,903

Tablo 4.14. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerleri

Enerji (keV)	MFP (cm)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	1,645±0,034	1,611	1,057±0,022	1,016	0,753±0,016	0,756	0,635±0,015	0,613
81,0	2,611±0,055	2,643	1,901±0,039	1,871	1,499±0,031	1,472	1,213±0,025	1,233
122,1	4,069±0,089	4,123	3,560±0,077	3,408	2,822±0,062	2,945	2,723±0,060	2,625
136,5	4,527±0,205	4,495	3,828±0,177	3,844	3,255±0,159	3,400	3,016±0,163	3,084
276,4	6,570±0,225	6,593	6,352±0,241	6,310	6,016±0,212	6,106	6,057±0,227	5,959
302,9	7,116±0,174	6,865	6,375±0,156	6,609	6,483±0,155	6,429	6,515±0,160	6,302
356,0	7,534±0,157	7,365	7,354±0,153	7,145	6,772±0,141	6,999	7,147±0,149	6,903
383,9	7,902±0,263	7,609	7,442±0,241	7,402	6,979±0,249	7,268	7,010±0,228	7,186
511,0	8,211±0,169	8,618	8,794±0,181	8,441	7,976±0,164	8,341	8,112±0,167	8,294
661,7	9,466±0,194	9,680	9,810±0,201	9,514	9,099±0,187	9,431	9,042±0,186	9,405
778,9	10,284±0,269	10,441	9,832±0,258	10,275	10,590±0,276	10,199	10,397±0,273	10,182
834,8	10,505±0,277	10,791	10,317±0,254	10,624	10,576±0,264	10,549	10,326±0,262	10,536
867,4	11,339±0,418	10,991	10,460±0,376	10,824	10,464±0,388	10,749	10,523±0,412	10,738
964,1	12,012±0,267	11,568	11,929±0,264	11,399	11,897±0,263	11,326	11,526±0,260	11,319
1085,9	12,240±0,313	12,265	11,617±0,298	12,091	12,575±0,322	12,020	12,501±0,304	12,019
1112,1	12,862±0,277	12,412	11,754±0,253	12,237	12,131±0,261	12,166	12,040±0,259	12,165
1173,2	13,034±0,275	12,754	12,770±0,270	12,576	12,055±0,254	12,504	12,731±0,268	12,505
1212,9	12,647±0,665	12,975	12,672±0,634	12,795	13,152±0,643	12,723	13,241±0,654	12,724
1274,5	13,468±0,280	13,312	12,521±0,261	13,128	13,488±0,281	13,055	13,196±0,275	13,057
1299,1	12,941±0,551	13,441	12,746±0,501	13,255	13,717±0,506	13,181	13,227±0,521	13,183
1332,5	13,614±0,283	13,621	13,498±0,281	13,433	12,859±0,268	13,358	13,046±0,272	13,361
1408,0	13,635±0,280	14,011	13,521±0,277	13,818	13,108±0,269	13,741	13,315±0,273	13,743



Şekil 4.13. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.14. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin MFP değerlerinin enerjiye göre değişimi

4.5. Moleküler, Atomik ve Elektronik Tesir Kesitlerinin İncelenmesine Ait Araştırma Bulguları

Foton etkileşim tesir kesiti atom numarasının ve foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bir malzemede, malzemeyi oluşturan moleküllerin gelen foton ile etkileşme ihtimaliyeti moleküler tesir kesitini verirken gelen fotonun malzemeyi oluşturan atomlar ile etkileşme ihtimaliyeti atomik tesir kesiti ile belirlenir. Moleküler tesir kesitinin malzemeyi oluşturan toplam element sayısına bölümünden atomik tesir kesitinin değerleri elde edilebilir. Malzemeyi oluşturan elementlerin elektronlarının foton ile etkileşmesi ile de elektronik tesir kesiti belirlenir. Malzemeyi oluşturan elementler arasında deneysel olarak kütle azaltma katsayısının belirlenemeyeceği hidrojen, oksijen, karbon gibi hafif elementlerin bulunması durumunda bu parametre sadece teorik olarak hesaplanır.

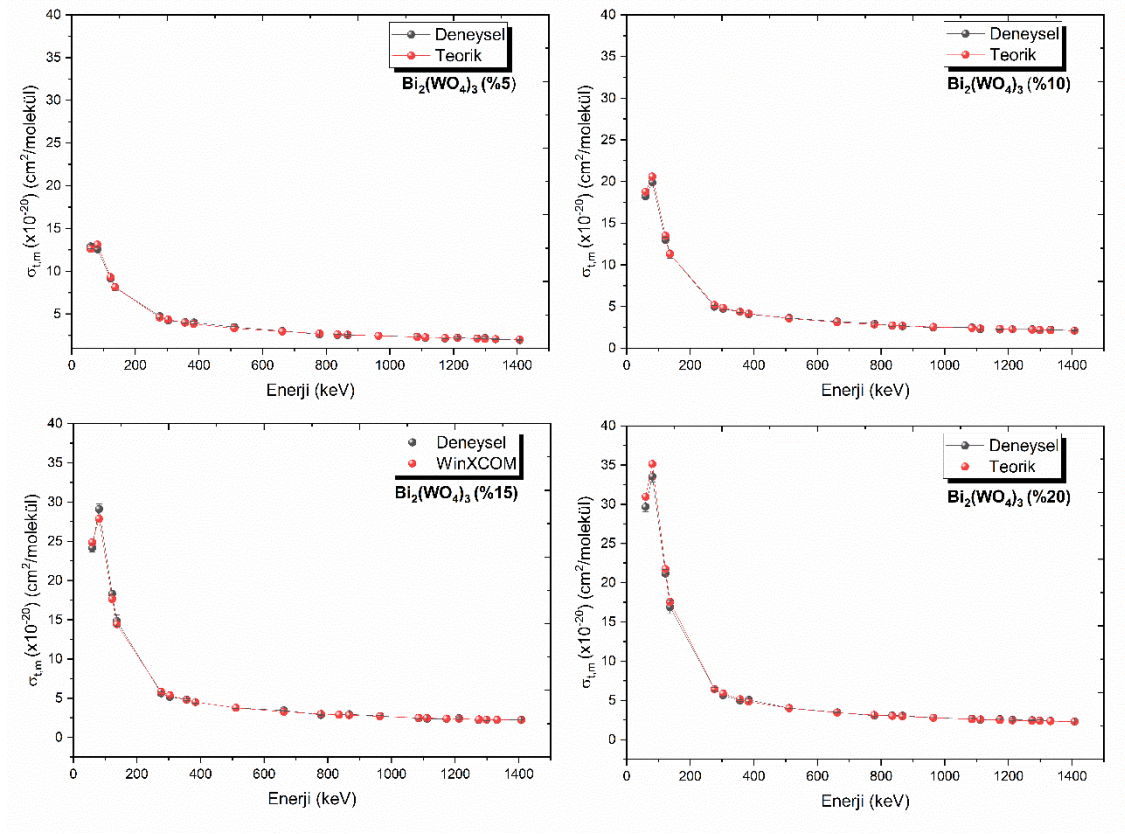
$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozit numunelerin elde edilen kütle azaltma katsayı değerleri kullanılarak belirlenen yirmi iki farklı foton enerjisinde atomik ve moleküler tesir kesitleri elde edilmiştir. Belirlenen deneysel moleküler ve atomik tesir kesiti değerleri hesaplanan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Elektronik tesir kesiti ise sadece teorik olarak hesaplanmıştır. Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla denklem (3.35), (3.36) ve (3.37) ile belirlenmiştir. Farklı oranlarda katkılanmış $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn için moleküler, atomik ve elektronik tesir kesiti değerleri Tablo 4.15-4.20’de ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.15-4.20’de verilmiştir.

Tablo 4.15. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerleri

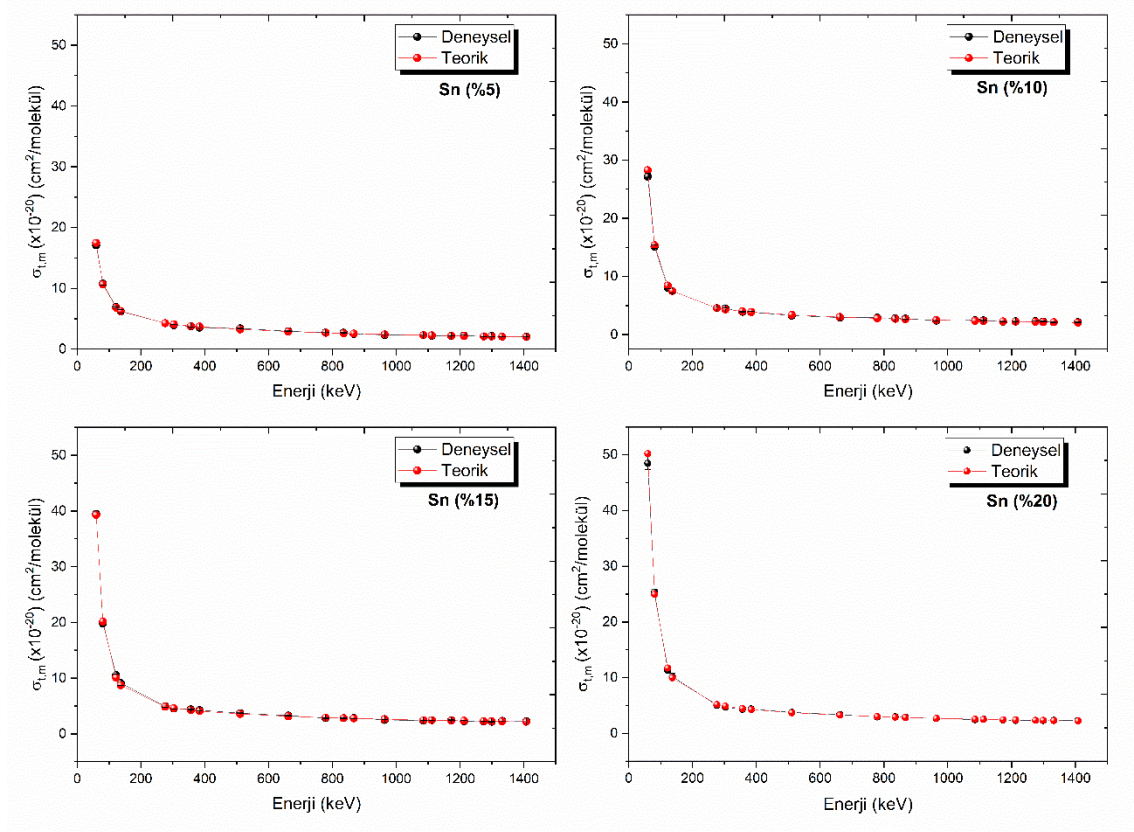
Enerji (keV)	Moleküler Tesir Kesiti ($\times 10^{-20}$) ($\text{cm}^2/\text{molekül}$)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	12,901 $\pm$ 0,266	12,597	18,236 $\pm$ 0,379	18,784	24,156 $\pm$ 0,506	24,879	29,664 $\pm$ 0,634	30,972
81,0	12,580 $\pm$ 0,259	13,115	19,870 $\pm$ 0,413	20,590	29,119 $\pm$ 0,612	27,856	33,531 $\pm$ 0,718	35,119
122,1	9,126 $\pm$ 0,209	9,307	12,997 $\pm$ 0,290	13,498	18,293 $\pm$ 0,417	17,626	21,160 $\pm$ 0,523	21,752
136,5	8,133 $\pm$ 0,381	8,135	11,328 $\pm$ 0,540	11,303	14,878 $\pm$ 0,715	14,429	16,905 $\pm$ 0,880	17,552
276,4	4,752 $\pm$ 0,165	4,580	4,960 $\pm$ 0,172	5,194	5,630 $\pm$ 0,193	5,811	6,435 $\pm$ 0,227	6,427
302,9	4,233 $\pm$ 0,103	4,347	4,738 $\pm$ 0,115	4,858	5,168 $\pm$ 0,128	5,373	5,657 $\pm$ 0,141	5,887
356,0	4,044 $\pm$ 0,084	3,987	4,357 $\pm$ 0,091	4,365	4,807 $\pm$ 0,100	4,749	4,978 $\pm$ 0,104	5,131
383,9	4,016 $\pm$ 0,152	3,836	4,075 $\pm$ 0,128	4,168	4,499 $\pm$ 0,139	4,506	5,060 $\pm$ 0,164	4,843
511,0	3,476 $\pm$ 0,071	3,335	3,625 $\pm$ 0,075	3,551	3,780 $\pm$ 0,078	3,773	4,032 $\pm$ 0,083	3,994
661,7	3,029 $\pm$ 0,062	2,946	3,210 $\pm$ 0,066	3,103	3,433 $\pm$ 0,071	3,267	3,454 $\pm$ 0,071	3,430
778,9	2,618 $\pm$ 0,069	2,722	2,968 $\pm$ 0,078	2,855	2,853 $\pm$ 0,075	2,994	3,040 $\pm$ 0,080	3,133
834,8	2,542 $\pm$ 0,063	2,631	2,689 $\pm$ 0,068	2,755	2,896 $\pm$ 0,076	2,886	3,076 $\pm$ 0,078	3,016
867,4	2,530 $\pm$ 0,098	2,582	2,632 $\pm$ 0,097	2,701	2,947 $\pm$ 0,116	2,828	3,054 $\pm$ 0,117	2,954
964,1	2,439 $\pm$ 0,054	2,450	2,481 $\pm$ 0,055	2,559	2,722 $\pm$ 0,060	2,674	2,772 $\pm$ 0,061	2,789
1085,9	2,344 $\pm$ 0,062	2,308	2,500 $\pm$ 0,065	2,406	2,450 $\pm$ 0,064	2,511	2,665 $\pm$ 0,069	2,615
1112,1	2,221 $\pm$ 0,048	2,280	2,260 $\pm$ 0,049	2,377	2,376 $\pm$ 0,051	2,480	2,529 $\pm$ 0,054	2,582
1173,2	2,150 $\pm$ 0,045	2,218	2,247 $\pm$ 0,048	2,311	2,351 $\pm$ 0,050	2,410	2,597 $\pm$ 0,055	2,508
1212,9	2,230 $\pm$ 0,105	2,179	2,263 $\pm$ 0,107	2,270	2,458 $\pm$ 0,119	2,367	2,533 $\pm$ 0,126	2,463
1274,5	2,139 $\pm$ 0,045	2,124	2,276 $\pm$ 0,047	2,211	2,218 $\pm$ 0,046	2,305	2,481 $\pm$ 0,052	2,398
1299,1	2,209 $\pm$ 0,086	2,103	2,157 $\pm$ 0,083	2,190	2,240 $\pm$ 0,088	2,282	2,432 $\pm$ 0,095	2,374
1332,5	2,058 $\pm$ 0,043	2,075	2,213 $\pm$ 0,046	2,160	2,218 $\pm$ 0,046	2,251	2,398 $\pm$ 0,050	2,341
1408,0	1,956 $\pm$ 0,040	2,017	2,123 $\pm$ 0,044	2,099	2,266 $\pm$ 0,047	2,187	2,313 $\pm$ 0,047	2,274

Tablo 4.16. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerleri

Enerji (keV)	Moleküler Tesir Kesiti ($\times 10^{-20}$) ($\text{cm}^2/\text{molekül}$)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	17,114 $\pm$ 0,354	17,472	27,193 $\pm$ 0,571	28,288	39,435 $\pm$ 0,864	39,260	48,471 $\pm$ 1,110	50,229
81,0	10,780 $\pm$ 0,226	10,648	15,121 $\pm$ 0,312	15,367	19,801 $\pm$ 0,410	20,166	25,367 $\pm$ 0,530	24,961
122,1	6,916 $\pm$ 0,152	6,826	8,075 $\pm$ 0,175	8,435	10,520 $\pm$ 0,230	10,082	11,302 $\pm$ 0,247	11,727
136,5	6,217 $\pm$ 0,281	6,261	7,510 $\pm$ 0,346	7,479	9,121 $\pm$ 0,444	8,731	10,207 $\pm$ 0,552	9,981
276,4	4,284 $\pm$ 0,147	4,269	4,526 $\pm$ 0,172	4,556	4,935 $\pm$ 0,174	4,862	5,082 $\pm$ 0,190	5,165
302,9	3,955 $\pm$ 0,097	4,100	4,510 $\pm$ 0,110	4,350	4,579 $\pm$ 0,110	4,618	4,725 $\pm$ 0,116	4,884
356,0	3,735 $\pm$ 0,078	3,821	3,909 $\pm$ 0,081	4,024	4,384 $\pm$ 0,091	4,242	4,306 $\pm$ 0,090	4,459
383,9	3,562 $\pm$ 0,118	3,699	3,863 $\pm$ 0,125	3,884	4,254 $\pm$ 0,152	4,085	4,391 $\pm$ 0,143	4,284
511,0	3,428 $\pm$ 0,070	3,266	3,269 $\pm$ 0,067	3,406	3,722 $\pm$ 0,076	3,559	3,795 $\pm$ 0,078	3,711
661,7	2,973 $\pm$ 0,061	2,907	2,930 $\pm$ 0,060	3,022	3,263 $\pm$ 0,067	3,148	3,404 $\pm$ 0,070	3,273
778,9	2,737 $\pm$ 0,072	2,696	2,924 $\pm$ 0,077	2,798	2,803 $\pm$ 0,073	2,911	2,961 $\pm$ 0,078	3,023
834,8	2,679 $\pm$ 0,071	2,608	2,786 $\pm$ 0,069	2,706	2,807 $\pm$ 0,070	2,814	2,981 $\pm$ 0,076	2,921
867,4	2,482 $\pm$ 0,091	2,561	2,748 $\pm$ 0,099	2,656	2,837 $\pm$ 0,105	2,762	2,925 $\pm$ 0,114	2,866
964,1	2,343 $\pm$ 0,052	2,433	2,410 $\pm$ 0,053	2,522	2,495 $\pm$ 0,055	2,621	2,670 $\pm$ 0,060	2,719
1085,9	2,299 $\pm$ 0,059	2,295	2,475 $\pm$ 0,063	2,378	2,361 $\pm$ 0,061	2,470	2,462 $\pm$ 0,060	2,561
1112,1	2,188 $\pm$ 0,047	2,267	2,446 $\pm$ 0,053	2,349	2,447 $\pm$ 0,053	2,440	2,557 $\pm$ 0,055	2,530
1173,2	2,159 $\pm$ 0,045	2,207	2,251 $\pm$ 0,048	2,286	2,463 $\pm$ 0,052	2,374	2,418 $\pm$ 0,051	2,461
1212,9	2,225 $\pm$ 0,117	2,169	2,269 $\pm$ 0,114	2,247	2,257 $\pm$ 0,110	2,333	2,325 $\pm$ 0,115	2,419
1274,5	2,090 $\pm$ 0,044	2,114	2,296 $\pm$ 0,048	2,190	2,201 $\pm$ 0,046	2,274	2,333 $\pm$ 0,049	2,357
1299,1	2,175 $\pm$ 0,093	2,094	2,256 $\pm$ 0,089	2,169	2,164 $\pm$ 0,080	2,252	2,327 $\pm$ 0,092	2,335
1332,5	2,067 $\pm$ 0,043	2,066	2,130 $\pm$ 0,044	2,140	2,309 $\pm$ 0,048	2,222	2,359 $\pm$ 0,049	2,304
1408,0	2,064 $\pm$ 0,042	2,009	2,126 $\pm$ 0,044	2,081	2,265 $\pm$ 0,046	2,161	2,312 $\pm$ 0,047	2,240



Şekil 4.15. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi



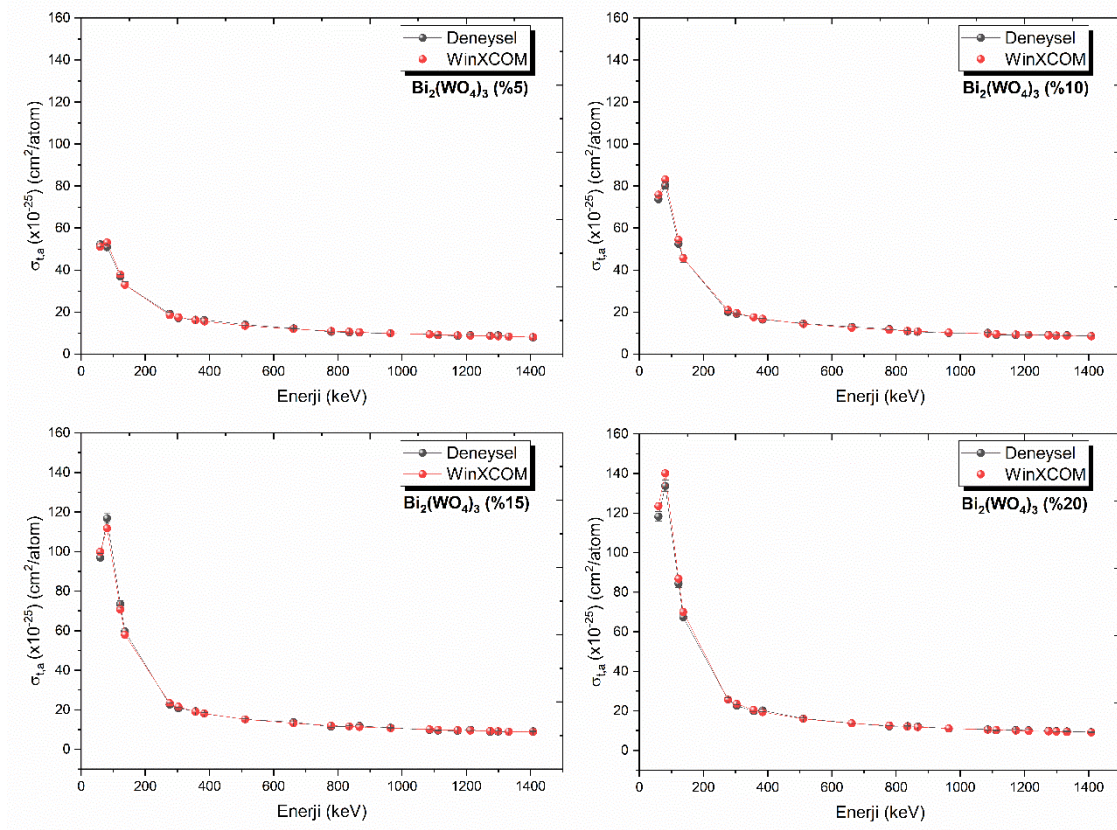
Şekil 4.16. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin moleküler tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi

Tablo 4.17. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerleri

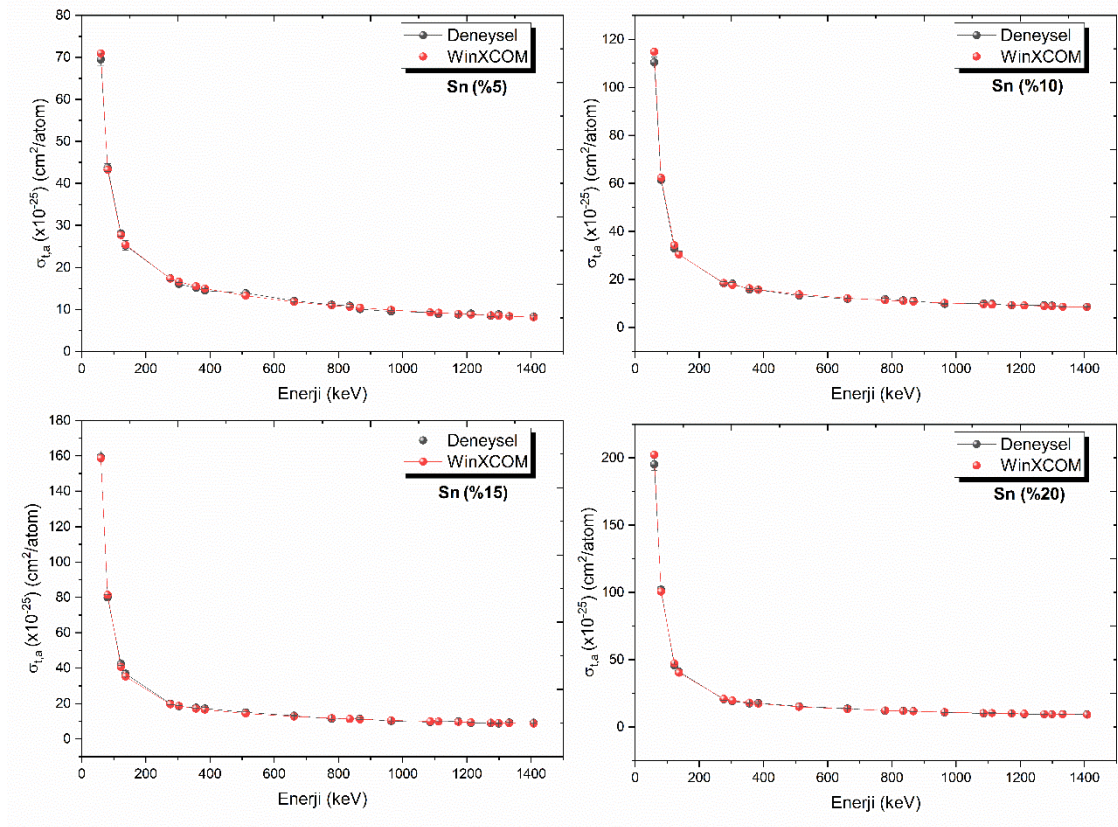
Enerji (keV)	Atomik Tesir Kesiti ($\times 10^{-25}$) (cm^2/atom)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	52,270 $\pm$ 1,079	51,036	73,662 $\pm$ 1,529	75,873	96,932 $\pm$ 2,029	99,833	118,306 $\pm$ 2,529	123,524
81,0	50,967 $\pm$ 1,051	53,138	80,259 $\pm$ 1,667	83,169	116,846 $\pm$ 2,456	111,776	133,728 $\pm$ 2,865	140,060
122,1	36,974 $\pm$ 0,849	37,709	52,499 $\pm$ 1,170	54,521	73,405 $\pm$ 1,672	70,728	84,390 $\pm$ 2,087	86,752
136,5	32,950 $\pm$ 1,543	32,958	45,757 $\pm$ 2,180	45,656	59,700 $\pm$ 2,868	57,898	67,422 $\pm$ 3,510	70,002
276,4	19,253 $\pm$ 0,670	18,558	20,037 $\pm$ 0,694	20,982	22,593 $\pm$ 0,776	23,319	25,666 $\pm$ 0,905	25,631
302,9	17,151 $\pm$ 0,416	17,613	19,139 $\pm$ 0,465	19,623	20,736 $\pm$ 0,515	21,561	22,560 $\pm$ 0,562	23,478
356,0	16,384 $\pm$ 0,342	16,154	17,599 $\pm$ 0,366	17,631	19,288 $\pm$ 0,401	19,055	19,854 $\pm$ 0,414	20,465
383,9	16,273 $\pm$ 0,617	15,543	16,460 $\pm$ 0,518	16,836	18,052 $\pm$ 0,559	18,082	20,180 $\pm$ 0,654	19,315
511,0	14,081 $\pm$ 0,290	13,513	14,642 $\pm$ 0,301	14,341	15,167 $\pm$ 0,312	15,140	16,079 $\pm$ 0,331	15,930
661,7	12,273 $\pm$ 0,252	11,935	12,967 $\pm$ 0,266	12,533	13,776 $\pm$ 0,283	13,109	13,776 $\pm$ 0,283	13,680
778,9	10,608 $\pm$ 0,278	11,029	11,987 $\pm$ 0,315	11,531	11,448 $\pm$ 0,301	12,015	12,122 $\pm$ 0,319	12,494
834,8	10,298 $\pm$ 0,256	10,660	10,862 $\pm$ 0,275	11,129	11,622 $\pm$ 0,303	11,581	12,269 $\pm$ 0,310	12,028
867,4	10,251 $\pm$ 0,397	10,460	10,630 $\pm$ 0,392	10,912	11,826 $\pm$ 0,467	11,348	12,179 $\pm$ 0,468	11,779
964,1	9,881 $\pm$ 0,219	9,924	10,021 $\pm$ 0,223	10,335	10,921 $\pm$ 0,240	10,731	11,055 $\pm$ 0,245	11,123
1085,9	9,495 $\pm$ 0,251	9,349	10,100 $\pm$ 0,264	9,720	9,832 $\pm$ 0,258	10,077	10,630 $\pm$ 0,274	10,431
1112,1	9,000 $\pm$ 0,194	9,237	9,127 $\pm$ 0,196	9,600	9,536 $\pm$ 0,205	9,950	10,085 $\pm$ 0,217	10,297
1173,2	8,710 $\pm$ 0,183	8,985	9,074 $\pm$ 0,193	9,334	9,436 $\pm$ 0,199	9,670	10,359 $\pm$ 0,219	10,002
1212,9	9,033 $\pm$ 0,426	8,830	9,139 $\pm$ 0,434	9,170	9,861 $\pm$ 0,477	9,498	10,101 $\pm$ 0,501	9,822
1274,5	8,668 $\pm$ 0,180	8,604	9,194 $\pm$ 0,192	8,932	8,900 $\pm$ 0,185	9,248	9,896 $\pm$ 0,206	9,562
1299,1	8,950 $\pm$ 0,348	8,521	8,714 $\pm$ 0,334	8,845	8,988 $\pm$ 0,352	9,157	9,700 $\pm$ 0,380	9,467
1332,5	8,337 $\pm$ 0,174	8,407	8,939 $\pm$ 0,186	8,726	8,900 $\pm$ 0,185	9,033	9,564 $\pm$ 0,199	9,337
1408,0	7,923 $\pm$ 0,163	8,171	8,577 $\pm$ 0,176	8,479	9,094 $\pm$ 0,187	8,776	9,225 $\pm$ 0,189	9,070

Tablo 4.18. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerleri

Enerji (keV)	Atomik Tesir Kesiti ($\times 10^{-25}$) (cm^2/atom)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
59,5	69,510 $\pm$ 1,437	70,966	110,388 $\pm$ 2,319	114,834	159,410 $\pm$ 3,493	158,703	195,211 $\pm$ 4,470	202,290
81,0	43,783 $\pm$ 0,917	43,248	61,384 $\pm$ 1,267	62,382	80,044 $\pm$ 1,659	81,517	102,161 $\pm$ 2,135	100,529
122,1	28,091 $\pm$ 0,616	27,724	32,780 $\pm$ 0,711	34,240	42,526 $\pm$ 0,930	40,755	45,518 $\pm$ 0,996	47,229
136,5	25,249 $\pm$ 1,143	25,428	30,485 $\pm$ 1,406	30,361	36,871 $\pm$ 1,796	35,294	41,106 $\pm$ 2,221	40,196
276,4	17,399 $\pm$ 0,595	17,338	18,372 $\pm$ 0,698	18,496	19,947 $\pm$ 0,704	19,653	20,467 $\pm$ 0,766	20,803
302,9	16,064 $\pm$ 0,392	16,651	18,308 $\pm$ 0,447	17,659	18,511 $\pm$ 0,443	18,668	19,028 $\pm$ 0,467	19,670
356,0	15,172 $\pm$ 0,316	15,520	15,870 $\pm$ 0,330	16,334	17,722 $\pm$ 0,369	17,148	17,344 $\pm$ 0,361	17,957
383,9	14,466 $\pm$ 0,481	15,022	15,682 $\pm$ 0,508	15,766	17,195 $\pm$ 0,614	16,511	17,684 $\pm$ 0,576	17,251
511,0	13,922 $\pm$ 0,286	13,265	13,271 $\pm$ 0,273	13,826	15,047 $\pm$ 0,309	14,387	15,282 $\pm$ 0,314	14,946
661,7	12,075 $\pm$ 0,248	11,809	11,896 $\pm$ 0,244	12,267	13,189 $\pm$ 0,271	12,725	13,710 $\pm$ 0,281	13,181
778,9	11,115 $\pm$ 0,291	10,948	11,870 $\pm$ 0,311	11,358	11,332 $\pm$ 0,296	11,767	11,923 $\pm$ 0,313	12,174
834,8	10,882 $\pm$ 0,287	10,593	11,311 $\pm$ 0,279	10,985	11,347 $\pm$ 0,284	11,376	12,005 $\pm$ 0,304	11,766
867,4	10,081 $\pm$ 0,372	10,400	11,157 $\pm$ 0,401	10,782	11,468 $\pm$ 0,426	11,164	11,780 $\pm$ 0,461	11,544
964,1	9,517 $\pm$ 0,211	9,881	9,783 $\pm$ 0,217	10,239	10,087 $\pm$ 0,223	10,596	10,755 $\pm$ 0,242	10,951
1085,9	9,339 $\pm$ 0,239	9,320	10,046 $\pm$ 0,257	9,652	9,543 $\pm$ 0,245	9,984	9,916 $\pm$ 0,241	10,314
1112,1	8,887 $\pm$ 0,191	9,210	9,929 $\pm$ 0,214	9,537	9,893 $\pm$ 0,213	9,864	10,296 $\pm$ 0,222	10,190
1173,2	8,770 $\pm$ 0,185	8,963	9,139 $\pm$ 0,193	9,280	9,955 $\pm$ 0,209	9,597	9,737 $\pm$ 0,205	9,913
1212,9	9,038 $\pm$ 0,475	8,810	9,210 $\pm$ 0,461	9,121	9,125 $\pm$ 0,446	9,433	9,362 $\pm$ 0,463	9,742
1274,5	8,488 $\pm$ 0,177	8,587	9,321 $\pm$ 0,194	8,890	8,897 $\pm$ 0,185	9,193	9,394 $\pm$ 0,196	9,494
1299,1	8,833 $\pm$ 0,376	8,505	9,156 $\pm$ 0,360	8,805	8,749 $\pm$ 0,323	9,105	9,372 $\pm$ 0,369	9,403
1332,5	8,397 $\pm$ 0,175	8,392	8,646 $\pm$ 0,180	8,688	9,332 $\pm$ 0,195	8,984	9,502 $\pm$ 0,198	9,278
1408,0	8,383 $\pm$ 0,172	8,158	8,632 $\pm$ 0,177	8,446	9,155 $\pm$ 0,188	8,734	9,310 $\pm$ 0,191	9,020



Şekil 4.17. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi



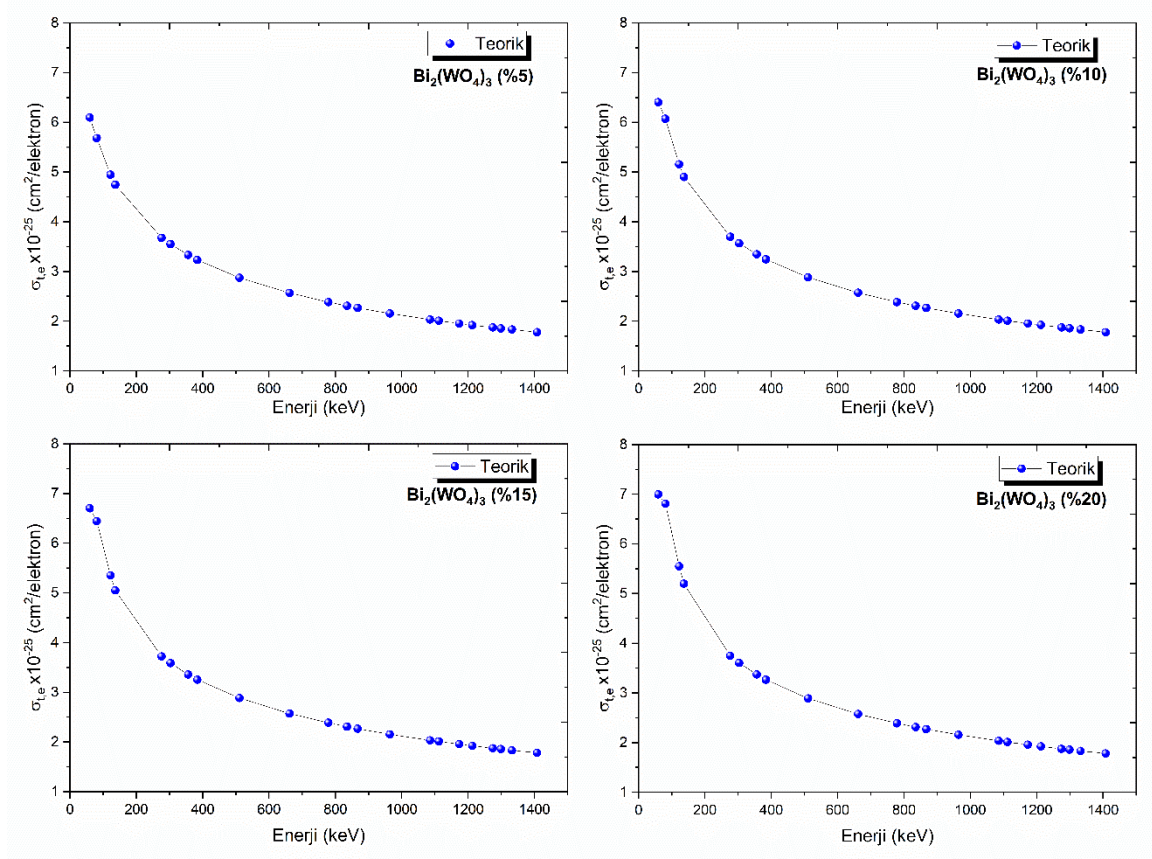
Şekil 4.18. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin atomik tesir kesiti değerlerinin enerjiye göre değişimi

Tablo 4.19. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti teorik değerleri

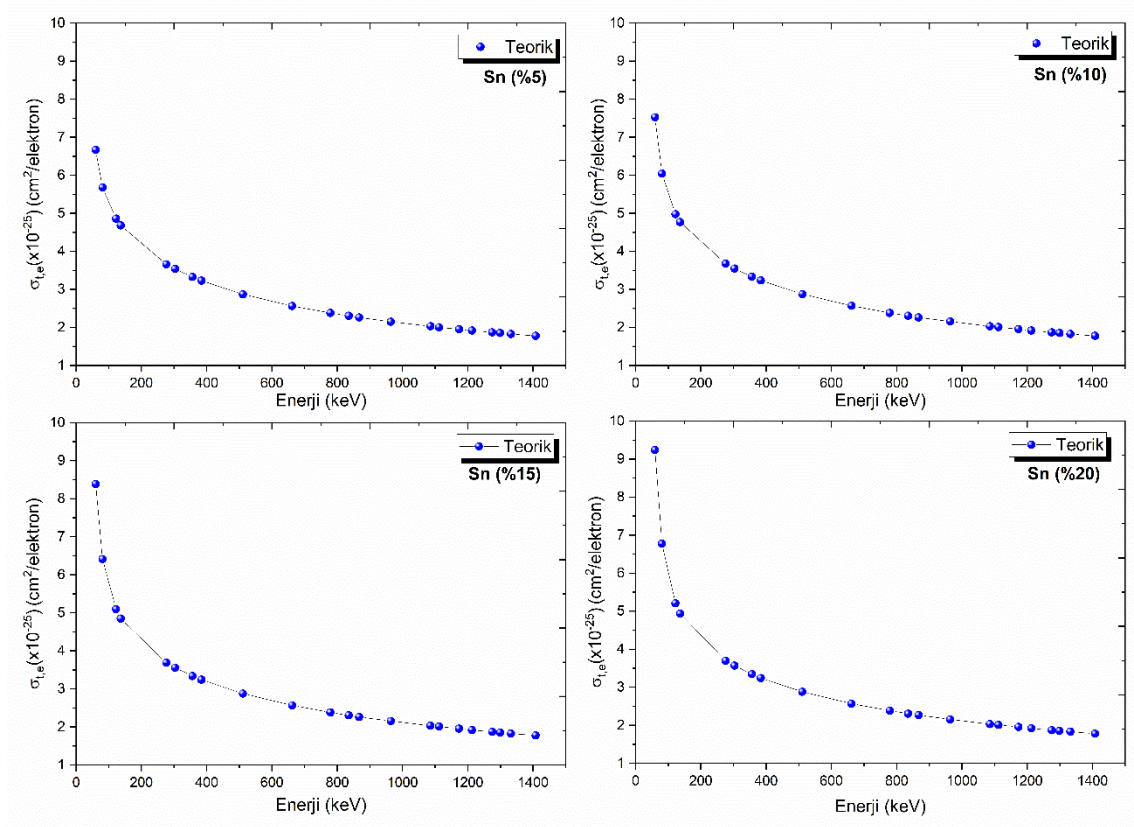
Enerji (keV)	Elektronik Tesir Kesiti ($\times 10^{-25}$) ($\text{cm}^2/\text{elektron}$)			
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%5)$	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%10)$	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%15)$	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%20)$
59,5	6,098	6,407	6,704	6,998
81,0	5,685	6,074	6,443	6,809
122,1	4,949	5,155	5,355	5,551
136,5	4,748	4,902	5,051	5,198
276,4	3,675	3,699	3,723	3,746
302,9	3,549	3,568	3,587	3,606
356,0	3,333	3,346	3,358	3,371
383,9	3,235	3,245	3,256	3,266
511,0	2,875	2,880	2,885	2,891
661,7	2,568	2,571	2,574	2,576
778,9	2,383	2,386	2,388	2,390
834,8	2,307	2,309	2,311	2,312
867,4	2,265	2,267	2,269	2,270
964,1	2,153	2,155	2,156	2,157
1085,9	2,032	2,033	2,034	2,035
1112,1	2,008	2,009	2,010	2,011
1173,2	1,955	1,955	1,956	1,957
1212,9	1,921	1,922	1,923	1,924
1274,5	1,873	1,873	1,874	1,875
1299,1	1,855	1,855	1,856	1,857
1332,5	1,830	1,831	1,832	1,832
1408,0	1,779	1,780	1,780	1,781

Tablo 4.20. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesiti teorik değerleri

Enerji (keV)	Elektronik Tesir Kesiti ($\times 10^{-25}$) (cm ² /elektron)			
	Sn(%5)	Sn(%10)	Sn(%15)	Sn(%20)
59,5	6,665	7,525	8,385	9,239
81,0	5,678	6,045	6,411	6,776
122,1	4,862	4,978	5,094	5,209
136,5	4,682	4,766	4,851	4,935
276,4	3,663	3,675	3,687	3,699
302,9	3,540	3,549	3,559	3,568
356,0	3,327	3,333	3,339	3,345
383,9	3,229	3,234	3,239	3,244
511,0	2,872	2,874	2,877	2,880
661,7	2,566	2,567	2,569	2,570
778,9	2,382	2,383	2,384	2,385
834,8	2,306	2,307	2,308	2,309
867,4	2,265	2,265	2,266	2,267
964,1	2,153	2,153	2,154	2,155
1085,9	2,032	2,032	2,033	2,033
1112,1	2,008	2,008	2,009	2,009
1173,2	1,954	1,954	1,955	1,955
1212,9	1,921	1,921	1,922	1,922
1274,5	1,872	1,873	1,873	1,873
1299,1	1,854	1,855	1,855	1,855
1332,5	1,830	1,830	1,830	1,831
1408,0	1,779	1,779	1,779	1,780



Şekil 4.19. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesitinin değerlerinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.20. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin elektronik tesir kesitinin değerlerinin enerjiye göre değişimi

4.6. Etkin Atom Numarası, Etkin Elektron Yoğunluğu ve Etkin İletkenlik Değerlerinin İncelenmesine Ait Araştırma Bulguları

Birden fazla element içeren malzemelerde atom numarası ifadesi yerine etkin atom numarası terimi kullanılır. Kütle azaltma katsayıları kullanılarak ulaşılan atomik ve moleküler tesir kesitleri yardımıyla etkin atom numaraları denklem (3.38) kullanılarak $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerinin etkin atom numaraları hesaplanmıştır. Etkin atom numarası belirlenirken daha önce kütle azaltma katsayısı kullanılarak elde edilen atomik ve elektronik tesir kesitleri kullanılmıştır. Elde edilen deneysel Z_{eff} değerleri belirlenen teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerinin etkin elektron yoğunlukları yirmi iki farklı foton enerjisinde belirlenmiştir. Etkin elektron yoğunluğu birim kütle başına düşen elektron sayısı olarak ifade edilmektedir ve etkin atom numarasından faydalanılarak Denklem (3.39) kullanılarak hesaplanmıştır. İlgili kompozitlerin deneysel etkin elektron yoğunlukları değerleri ile teorik değerleri karşılaştırılmıştır.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerinin etkin iletkenlik değerleri Denklem (3.43) ile belirlenmiştir. Etkin iletkenlik değerleri elde edilen etkin elektron yoğunlukları yardımıyla belirlenmiştir.

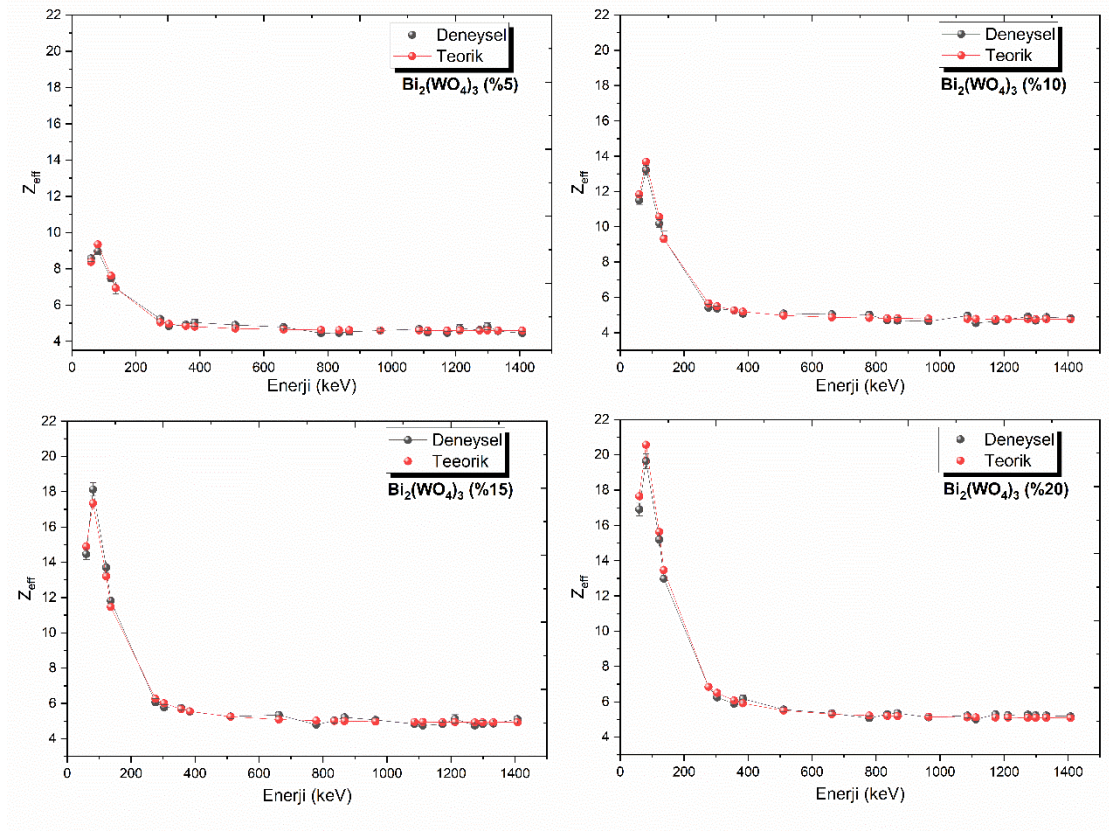
$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerinin etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlik değerleri Tablo 4.21-4.26'da ve elde edilen sonuçlarla çizilen grafikler Şekil 4.21-4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.21. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarası değerleri

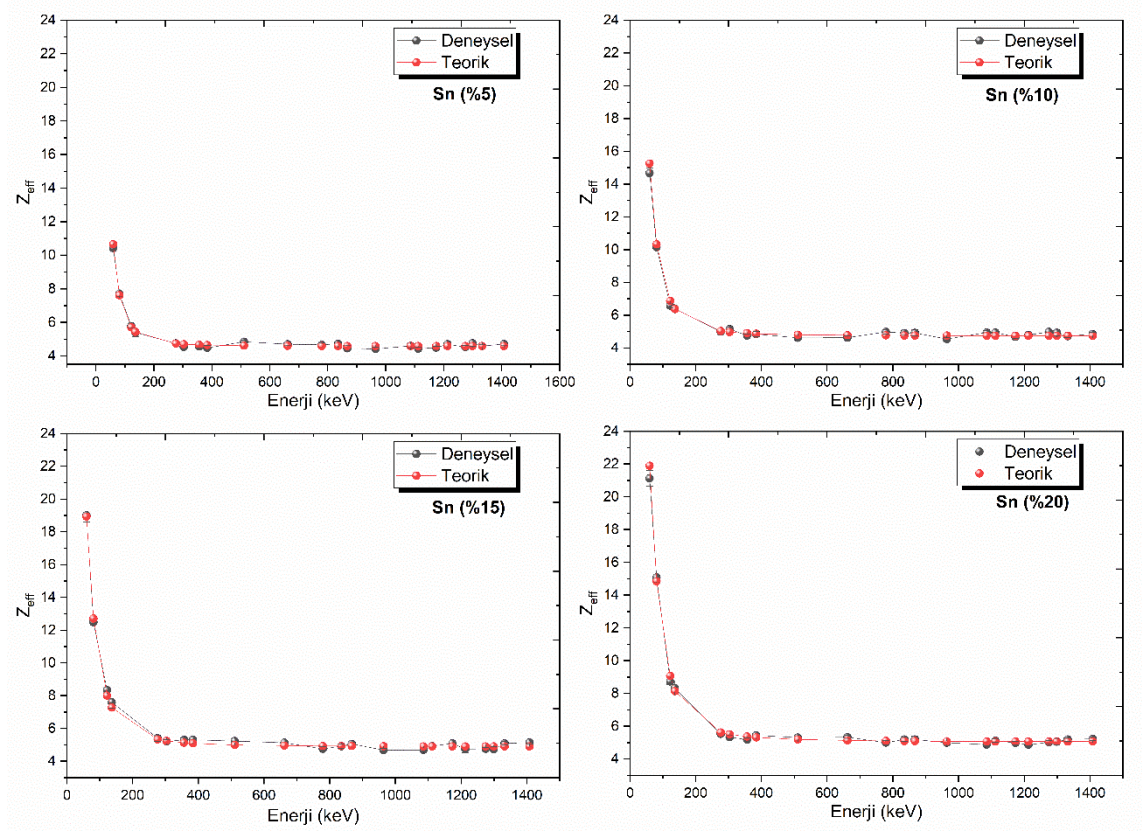
Enerji (keV)	Etkin Atom Numarası (Z_{eff})							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM
59,5	8,5717±0,1769	8,3694	11,4979±0,2387	11,8431	14,4589±0,3026	14,8917	16,9055±0,3614	17,6512
81,0	8,9651±0,1849	9,3469	13,2144±0,2745	13,6935	18,1343±0,3812	17,3473	19,6398±0,4208	20,5698
122,1	7,4714±0,1715	7,6198	10,1831±0,2269	10,5754	13,7088±0,3123	13,2088	15,2015±0,3760	15,6270
136,5	6,9402±0,3249	6,9417	9,3343±0,4447	9,3137	11,8204±0,5679	11,4635	12,9719±0,6753	13,4684
276,4	5,2394±0,1824	5,0503	5,4168±0,1877	5,6722	6,0693±0,2084	6,2643	6,8518±0,2415	6,8425
302,9	4,8326±0,1173	4,9625	5,3633±0,1302	5,4989	5,7806±0,1436	6,0107	6,2570±0,1558	6,5118
356,0	4,9156±0,1026	4,8465	5,2598±0,1093	5,2693	5,7432±0,1194	5,6740	5,8904±0,1229	6,0714
383,9	5,0310±0,1908	4,8055	5,0720±0,1596	5,1879	5,5450±0,1716	5,5543	6,1794±0,2004	5,9146
511,0	4,8982±0,1007	4,7007	5,0837±0,1045	4,9794	5,2566±0,1081	5,2472	5,5625±0,1144	5,5112
661,7	4,7800±0,0982	4,6483	5,0444±0,1036	4,8755	5,3531±0,1101	5,0940	5,3472±0,1097	5,3097
778,9	4,4506±0,1168	4,6273	5,0247±0,1319	4,8337	4,7949±0,1259	5,0322	5,0729±0,1335	5,2285
834,8	4,4635±0,1111	4,6205	4,7044±0,1189	4,8199	5,0297±0,1313	5,0118	5,3058±0,1339	5,2016
867,4	4,5249±0,1754	4,6171	4,6886±0,1731	4,8131	5,2127±0,2058	5,0018	5,3646±0,2062	5,1883
964,1	4,5886±0,1019	4,6087	4,6508±0,1035	4,7963	5,0653±0,1114	4,9770	5,1241±0,1137	5,1556
1085,9	4,6724±0,1235	4,6006	4,9672±0,1299	4,7804	4,8331±0,1266	4,9535	5,2229±0,1344	5,1248
1112,1	4,4816±0,0964	4,5994	4,5426±0,0976	4,7779	4,7437±0,1021	4,9498	5,0144±0,1078	5,1199
1173,2	4,4565±0,0937	4,5971	4,6405±0,0987	4,7731	4,8231±0,1017	4,9427	5,2926±0,1118	5,1104
1212,9	4,7018±0,2218	4,5960	4,7547±0,2255	4,7707	5,1282±0,2479	4,9391	5,2506±0,2607	5,1056
1274,5	4,6287±0,0963	4,5946	4,9078±0,1024	4,7678	4,7490±0,0989	4,9346	5,2780±0,1101	5,0997
1299,1	8,5717±0,1769	8,3694	4,6963±0,1799	4,7669	4,8423±0,1898	4,9333	5,2237±0,2049	5,0979
1332,5	8,9651±0,1849	9,3469	4,8826±0,1017	4,7659	4,8589±0,1010	4,9317	5,2195±0,1086	5,0957
1408,0	7,4714±0,1715	7,6198	4,8194±0,0989	4,7645	5,1082±0,1048	4,9294	5,1795±0,1062	5,0926

Tablo 4.22. Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarası değerleri

Enerji (keV)	Etkin Atom Numarası (Z_{eff})							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM
59,5	10,4294±0,2156	10,6478	14,6702±0,3082	15,2610	19,0123±0,4166	18,9280	21,1292±0,4838	21,8955
81,0	7,7107±0,1616	7,6166	10,1548±0,2096	10,3200	12,4846±0,2588	12,7144	15,0776±0,3152	14,8367
122,1	5,7770±0,1268	5,7017	6,5844±0,1429	6,8777	8,3478±0,1826	8,0002	8,7374±0,1913	9,0660
136,5	5,3934±0,2442	5,4315	6,3959±0,2951	6,3699	7,6006±0,3703	7,2756	8,3292±0,4501	8,1447
276,4	4,7503±0,1625	4,7336	4,9993±0,1900	5,0330	5,4103±0,1910	5,3305	5,5332±0,2071	5,6242
302,9	4,5382±0,1108	4,7040	5,1584±0,1260	4,9756	5,2019±0,1245	5,2458	5,3331±0,1309	5,5129
356,0	4,5608±0,0949	4,6654	4,7616±0,0989	4,9009	5,3076±0,1105	5,1355	5,1846±0,1078	5,3678
383,9	4,4799±0,1489	4,6520	4,8488±0,1570	4,8748	5,3081±0,1894	5,0970	5,4506±0,1774	5,3172
511,0	4,8475±0,0996	4,6186	4,6170±0,0949	4,8099	5,2299±0,1074	5,0008	5,3072±0,1091	5,1903
661,7	4,7059±0,0965	4,6021	4,6335±0,0951	4,7780	5,1342±0,1054	4,9538	5,3343±0,1095	5,1283
778,9	4,6657±0,1220	4,5956	4,9805±0,1306	4,7655	4,7530±0,1241	4,9353	4,9988±0,1311	5,1040
834,8	4,7187±0,1243	4,5936	4,9032±0,1209	4,7617	4,9171±0,1229	4,9296	5,2003±0,1318	5,0964
867,4	4,4518±0,1641	4,5927	4,9252±0,1771	4,7598	5,0609±0,1879	4,9268	5,1967±0,2032	5,0926
964,1	4,4208±0,0982	4,5902	4,5433±0,1007	4,7548	4,6831±0,1035	4,9194	4,9917±0,1124	5,0830
1085,9	4,5968±0,1174	4,5874	4,9438±0,1266	4,7497	4,6951±0,1203	4,9119	4,8776±0,1184	5,0731
1112,1	4,4264±0,0952	4,5871	4,9441±0,1064	4,7490	4,9251±0,1060	4,9109	5,1247±0,1103	5,0718
1173,2	4,4883±0,0945	4,5867	4,6758±0,0987	4,7481	5,0924±0,1071	4,9094	4,9799±0,1050	5,0697
1212,9	4,7056±0,2473	4,5866	4,7939±0,2399	4,7477	4,7484±0,2321	4,9088	4,8710±0,2407	5,0689
1274,5	4,5337±0,0944	4,5866	4,9776±0,1038	4,7474	4,7505±0,0990	4,9083	5,0148±0,1045	5,0681
1299,1	4,7638±0,2027	4,5866	4,9369±0,1940	4,7474	4,7164±0,1740	4,9082	5,0512±0,1990	5,0679
1332,5	4,5891±0,0956	4,5867	4,7245±0,0984	4,7474	5,0984±0,1063	4,9082	5,1901±0,1081	5,0679
1408,0	4,7136±0,0966	4,5871	4,8522±0,0995	4,7479	5,1454±0,1056	4,9086	5,2314±0,1073	5,0684



Şekil 4.21. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarasının enerjiye göre değişimi



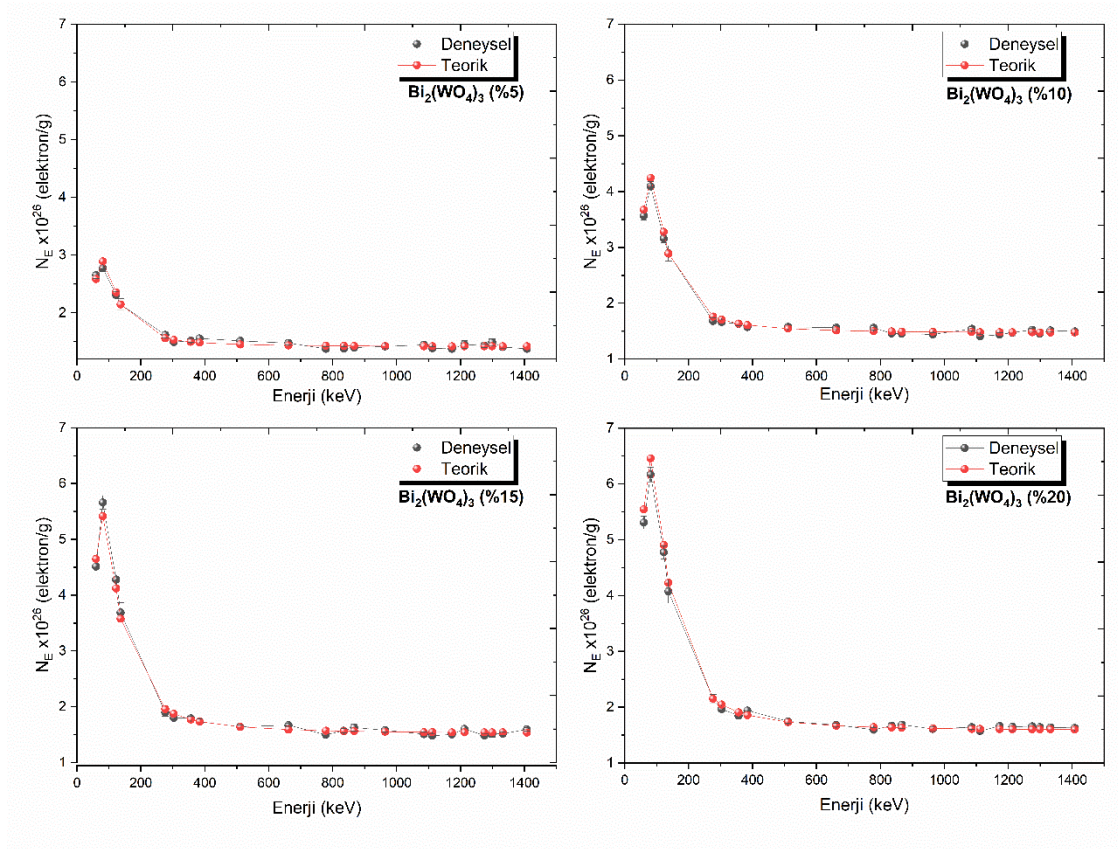
Şekil 4.22. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin atom numarasının enerjiye göre değişimi

Tablo 4.23. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğu değerleri

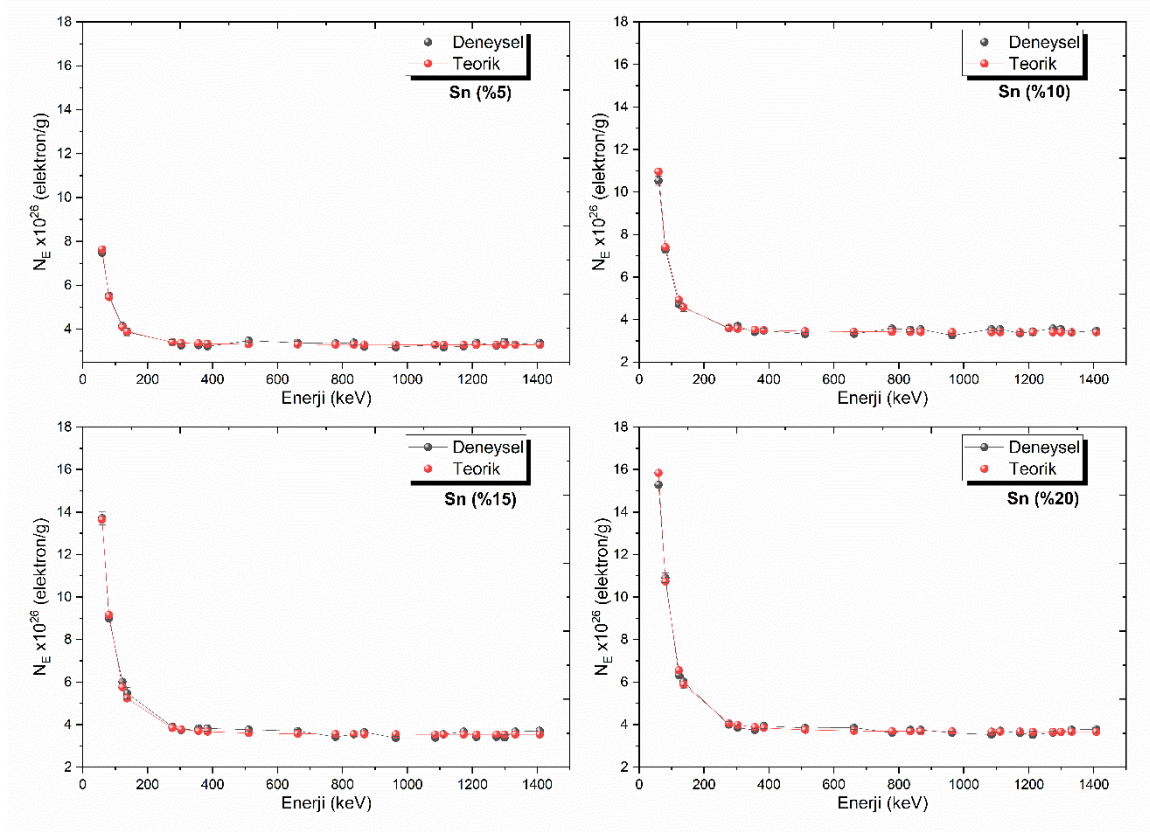
Enerji (keV)	Etkin Elektron Yoğunluğu ($\times 10^{26}$) (elektron/g)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM
59,5	2,6501±0,0547	2,5875	3,5656±0,0740	3,6726	4,5135±0,0945	4,6486	5,3096±0,1135	5,5438
81,0	2,7717±0,0572	2,8897	4,0979±0,0851	4,2464	5,6608±0,1190	5,4151	6,1684±0,1322	6,4605
122,1	2,3099±0,0530	2,3558	3,1579±0,0704	3,2795	4,2793±0,0975	4,1233	4,7744±0,1181	4,9081
136,5	2,1457±0,1005	2,1462	2,8946±0,1379	2,8882	3,6898±0,1773	3,5784	4,0742±0,2121	4,2301
276,4	1,6198±0,0564	1,5614	1,6798±0,0582	1,7590	1,8946±0,0651	1,9555	2,1520±0,0759	2,1491
302,9	1,4941±0,0363	1,5343	1,6632±0,0404	1,7052	1,8045±0,0448	1,8763	1,9652±0,0489	2,0452
356,0	1,5197±0,0317	1,4984	1,6311±0,0339	1,6341	1,7928±0,0373	1,7712	1,8500±0,0386	1,9069
383,9	1,5554±0,0590	1,4857	1,5729±0,0495	1,6088	1,7309±0,0536	1,7338	1,9408±0,0629	1,8576
511,0	1,5144±0,0311	1,4533	1,5765±0,0324	1,5441	1,6409±0,0337	1,6380	1,7470±0,0359	1,7309
661,7	1,4778±0,0304	1,4371	1,5643±0,0321	1,5119	1,6710±0,0344	1,5901	1,6794±0,0345	1,6677
778,9	1,3760±0,0361	1,4306	1,5582±0,0409	1,4989	1,4968±0,0393	1,5709	1,5933±0,0419	1,6421
834,8	1,3800±0,0343	1,4285	1,4589±0,0369	1,4947	1,5701±0,0410	1,5645	1,6664±0,0421	1,6337
867,4	1,3990±0,0542	1,4274	1,4540±0,0537	1,4926	1,6272±0,0642	1,5613	1,6849±0,0648	1,6295
964,1	1,4186±0,0315	1,4249	1,4422±0,0321	1,4874	1,5812±0,0348	1,5536	1,6093±0,0357	1,6193
1085,9	1,4445±0,0382	1,4223	1,5404±0,0403	1,4824	1,5087±0,0395	1,5463	1,6404±0,0422	1,6096
1112,1	1,3856±0,0298	1,4220	1,4087±0,0303	1,4817	1,4808±0,0319	1,5451	1,5749±0,0339	1,6080
1173,2	1,3778±0,0290	1,4213	1,4391±0,0306	1,4802	1,5056±0,0317	1,5429	1,6623±0,0351	1,6051
1212,9	1,4536±0,0686	1,4209	1,4745±0,0699	1,4794	1,6008±0,0774	1,5418	1,6491±0,0819	1,6035
1274,5	1,4310±0,0298	1,4205	1,5219±0,0317	1,4785	1,4824±0,0309	1,5404	1,6577±0,0346	1,6017
1299,1	1,4919±0,0581	1,4204	1,4563±0,0558	1,4783	1,5116±0,0592	1,5400	1,6406±0,0643	1,6011
1332,5	1,4084±0,0294	1,4202	1,5141±0,0315	1,4779	1,5168±0,0315	1,5395	1,6393±0,0341	1,6004
1408,0	1,3770±0,0283	1,4201	1,4945±0,0307	1,4775	1,5946±0,0327	1,5388	1,6267±0,0333	1,5995

Tablo 4.24. Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektron yoğunluğu değerleri

Enerji (keV)	Etkin Elektron Yoğunluğu ($\times 10^{26}$) (elektron/g)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM	Deneyisel	XCOM
59,5	7,4827±0,1547	7,6394	10,5308±0,2212	10,9549	13,7054±0,3003	13,6446	15,2881±0,3501	15,8425
81,0	5,5322±0,1159	5,4646	7,2895±0,1505	7,4081	8,9998±0,1865	9,1654	10,9094±0,2280	10,7351
122,1	4,1448±0,0910	4,0908	4,7266±0,1026	4,9371	6,0177±0,1316	5,7671	6,3220±0,1384	6,5597
136,5	3,8695±0,1752	3,8969	4,5912±0,2118	4,5726	5,4790±0,2669	5,2447	6,0266±0,3257	5,8931
276,4	3,4081±0,1166	3,3962	3,5887±0,1364	3,6129	3,9001±0,1377	3,8426	4,0035±0,1498	4,0694
302,9	3,2560±0,0795	3,3749	3,7029±0,0905	3,5717	3,7499±0,0897	3,7815	3,8588±0,0947	3,9888
356,0	3,2722±0,0681	3,3472	3,4181±0,0710	3,5180	3,8261±0,0796	3,7020	3,7514±0,0780	3,8839
383,9	3,2142±0,1068	3,3376	3,4806±0,1127	3,4993	3,8264±0,1366	3,6743	3,9438±0,1284	3,8473
511,0	3,4779±0,0714	3,3137	3,3142±0,0681	3,4527	3,7701±0,0774	3,6049	3,8400±0,0789	3,7554
661,7	3,3763±0,0692	3,3018	3,3261±0,0683	3,4298	3,7011±0,0760	3,5710	3,8596±0,0792	3,7106
778,9	3,3475±0,0875	3,2972	3,5752±0,0938	3,4209	3,4263±0,0894	3,5577	3,6169±0,0949	3,6930
834,8	3,3855±0,0892	3,2958	3,5197±0,0868	3,4181	3,5446±0,0886	3,5536	3,7626±0,0954	3,6875
867,4	3,1940±0,1177	3,2951	3,5355±0,1271	3,4167	3,6482±0,1354	3,5516	3,7601±0,1470	3,6848
964,1	3,1718±0,0704	3,2933	3,2614±0,0723	3,4132	3,3759±0,0746	3,5463	3,6118±0,0813	3,6778
1085,9	3,2980±0,0843	3,2913	3,5488±0,0909	3,4095	3,3845±0,0867	3,5408	3,5292±0,0857	3,6706
1112,1	3,1758±0,0683	3,2911	3,5491±0,0764	3,4090	3,5504±0,0764	3,5401	3,7080±0,0798	3,6697
1173,2	3,2202±0,0678	3,2908	3,3565±0,0708	3,4083	3,6709±0,0772	3,5390	3,6032±0,0760	3,6682
1212,9	3,3761±0,1774	3,2907	3,4412±0,1722	3,4081	3,4230±0,1673	3,5386	3,5244±0,1741	3,6676
1274,5	3,2527±0,0677	3,2907	3,5731±0,0745	3,4079	3,4245±0,0714	3,5382	3,6285±0,0756	3,6670
1299,1	3,4178±0,1454	3,2907	3,5439±0,1393	3,4079	3,3999±0,1254	3,5382	3,6548±0,1440	3,6669
1332,5	3,2925±0,0686	3,2908	3,3915±0,0707	3,4079	3,6753±0,0766	3,5381	3,7553±0,0782	3,6669
1408,0	3,3818±0,0693	3,2911	3,4831±0,0714	3,4082	3,7092±0,0761	3,5385	3,7852±0,0777	3,6672



Şekil 4.23. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektronik yoğunluğunun enerjiye göre değişimi



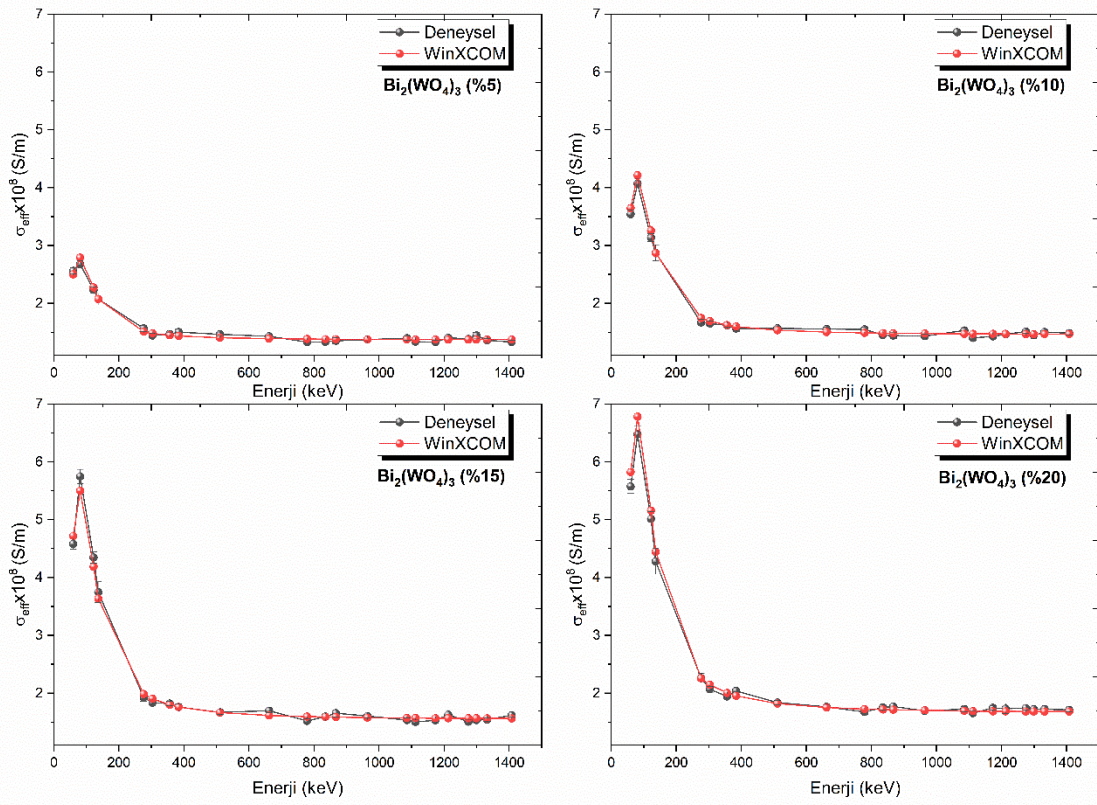
Şekil 4.24. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin elektronik yoğunluğunun enerjiye göre değişimi

Tablo 4.25. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri

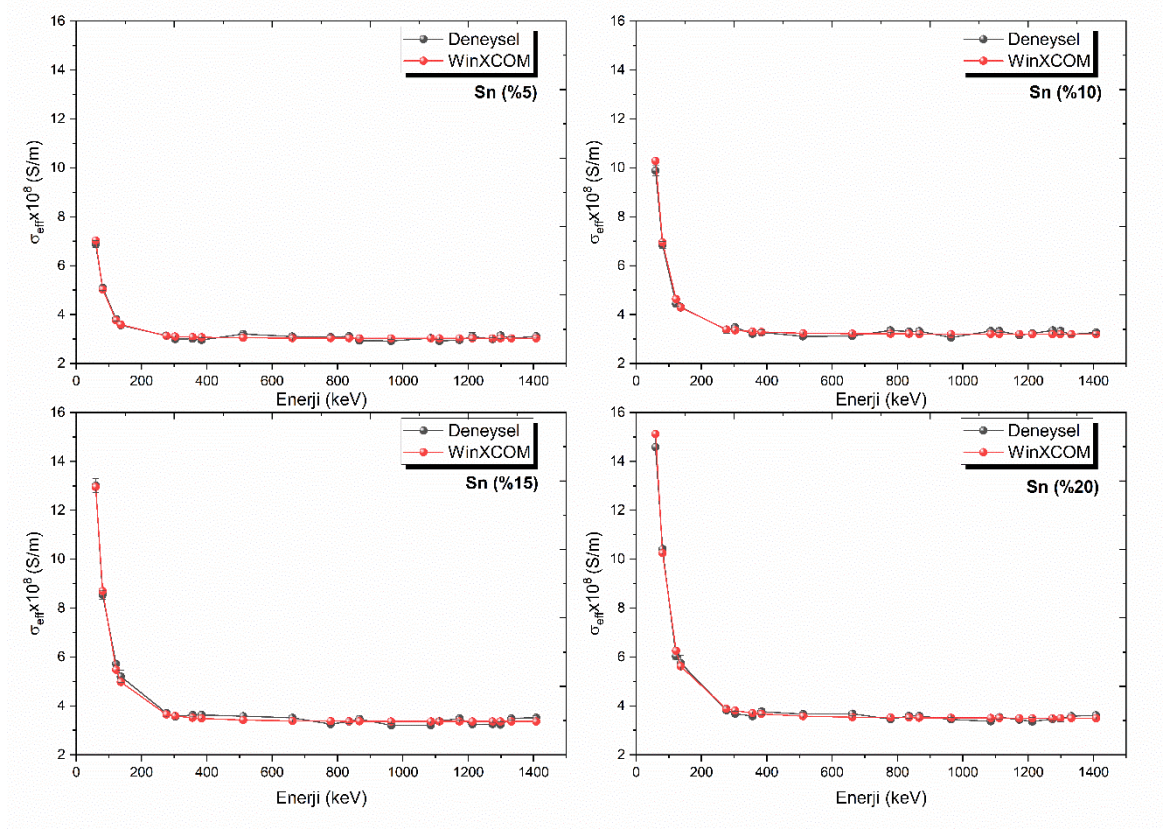
Enerji (keV)	Etkin İletkenlik ($\sigma_{\text{eff}} \times 10^8$, S/m)							
	$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%10)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%15)		$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20)	
	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM	Deneyssel	XCOM
59,5	2,5586±0,52	2,4982	3,5397±0,07	3,6460	4,5827±0,09	4,7199	5,5777±0,12	5,8237
81,0	2,6760±0,55	2,7900	4,0682±0,08	4,2157	5,7476±0,12	5,4982	6,4798±0,13	6,7867
122,1	2,2302±0,51	2,2745	3,1350±0,07	3,2557	4,3450±0,01	4,1865	5,0155±0,12	5,1559
136,5	2,0716±0,97	2,0721	2,8736±0,13	2,8673	3,7464±0,18	3,6333	4,2799±0,22	4,4437
276,4	1,5639±0,54	1,5075	1,6676±0,06	1,7463	1,9236±0,06	1,9854	2,2607±0,08	2,2576
302,9	1,4425±0,35	1,4813	1,6511±0,04	1,6929	1,8322±0,04	1,9051	2,0644±0,05	2,1484
356,0	1,4673±0,30	1,4467	1,6193±0,03	1,6222	1,8203±0,03	1,7984	1,9434±0,04	2,0032
383,9	1,5017±0,57	1,4344	1,5615±0,05	1,5972	1,7575±0,05	1,7604	2,0388±0,07	1,9514
511,0	1,4621±0,30	1,4031	1,5651±0,03	1,5330	1,6661±0,03	1,6631	1,8353±0,04	1,8183
661,7	1,4268±0,29	1,3875	1,5530±0,03	1,5010	1,6967±0,03	1,6145	1,7642±0,04	1,7519
778,9	1,3285±0,34	1,3812	1,5469±0,04	1,4881	1,5197±0,03	1,5950	1,6737±0,04	1,7250
834,8	1,3323±0,33	1,3792	1,4483±0,03	1,4839	1,5941±0,04	1,5885	1,7506±0,04	1,7162
867,4	1,3507±0,52	1,3782	1,4434±0,05	1,4818	1,6521±0,06	1,5853	1,7699±0,07	1,7118
964,1	1,3697±0,30	1,3757	1,4318±0,03	1,4766	1,6054±0,03	1,5774	1,6906±0,04	1,7010
1085,9	1,3947±0,36	1,3732	1,5292±0,04	1,4717	1,5318±0,04	1,5700	1,7232±0,04	1,6908
1112,1	1,3377±0,28	1,3729	1,3985±0,03	1,4709	1,5035±0,03	1,5688	1,6544±0,03	1,6892
1173,2	1,3302±0,28	1,3722	1,4286±0,03	1,4695	1,5287±0,03	1,5666	1,7462±0,04	1,6861
1212,9	1,4035±0,66	1,3719	1,4638±0,07	1,4687	1,6254±0,07	1,5654	1,7324±0,08	1,6845
1274,5	1,3816±0,28	1,3715	1,5109±0,03	1,4678	1,5052±0,03	1,5640	1,7414±0,04	1,6826
1299,1	1,4404±0,56	1,3713	1,4458±0,05	1,4676	1,5347±0,06	1,5636	1,7235±0,07	1,6820
1332,5	1,3598±0,28	1,3712	1,5032±0,03	1,4672	1,5400±0,03	1,5631	1,7221±0,04	1,6812
1408,0	1,3295±0,27	1,3711	1,4837±0,03	1,4668	1,6190±0,03	1,5624	1,7089±0,03	1,6802

Tablo 4.26. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri

Enerji (keV)	Etkin İletkenlik ($\sigma_{\text{eff}} \times 10^8$, S/m)							
	Sn(%5)		Sn(%10)		Sn(%15)		Sn(%20)	
	Deneysel	XCOM	Deneysel	XCOM	Deneysel	XCOM	Deneysel	XCOM
59,5	6,8871±0,14	7,0313	9,8878±0,20	10,2860	13,0134±0,28	12,9558	14,5889±0,33	15,1180
81,0	5,0918±0,10	5,0296	6,8444±0,14	6,9558	8,5454±0,17	8,7027	10,4105±0,21	10,2442
122,1	3,8149±0,08	3,7652	4,4380±0,10	4,6356	5,7138±0,12	5,4759	6,0329±0,13	6,2597
136,5	3,5615±0,16	3,5867	4,3109±0,19	4,2934	5,2024±0,25	4,9800	5,7510±0,31	5,6236
276,4	3,1368±0,10	3,1259	3,3696±0,12	3,3923	3,7032±0,13	3,6486	3,8205±0,14	3,8833
302,9	2,9968±0,07	3,1063	3,4768±0,08	3,3536	3,5606±0,08	3,5906	3,6823±0,09	3,8064
356,0	3,0117±0,06	3,0808	3,2094±0,06	3,3032	3,6329±0,07	3,5151	3,5798±0,07	3,7063
383,9	2,9583±0,099	3,0719	3,2681±0,10	3,2857	3,6332±0,12	3,4888	3,7634±0,12	3,6713
511,0	3,2010±0,06	3,0499	3,1119±0,06	3,2419	3,5797±0,07	3,4229	3,6644±0,07	3,5837
661,7	3,1075±0,06	3,0390	3,1230±0,06	3,2204	3,5142±0,07	3,3907	3,6831±0,07	3,5409
778,9	3,0810±0,08	3,0347	3,3569±0,08	3,2120	3,2533±0,08	3,3781	3,4515±0,09	3,5241
834,8	3,1160±0,08	3,0334	3,3048±0,08	3,2094	3,3656±0,08	3,3742	3,5906±0,09	3,5189
867,4	2,9398±0,10	3,0328	3,3197±0,11	3,2081	3,4640±0,12	3,3722	3,5881±0,14	3,5163
964,1	2,9193±0,06	3,0311	3,0622±0,06	3,2048	3,2055±0,07	3,3672	3,4466±0,07	3,5096
1085,9	3,0355±0,07	3,0293	3,3321±0,08	3,2013	3,2136±0,08	3,3621	3,3678±0,08	3,5028
1112,1	2,9230±0,06	3,0291	3,3324±0,07	3,2009	3,3711±0,07	3,3614	3,5384±0,07	3,5019
1173,2	2,9638±0,06	3,0288	3,1515±0,06	3,2002	3,4856±0,07	3,3604	3,4384±0,07	3,5004
1212,9	3,1074±0,16	3,0288	3,2311±0,16	3,2000	3,2502±0,15	3,3599	3,3633±0,16	3,4999
1274,5	2,9938±0,06	3,0288	3,3550±0,07	3,1998	3,2516±0,06	3,3596	3,4625±0,07	3,4993
1299,1	3,1458±0,13	3,0288	3,3275±0,13	3,1998	3,2283±0,11	3,3595	3,4877±0,13	3,4992
1332,5	3,0304±0,06	3,0288	3,1844±0,06	3,1998	3,4897±0,07	3,3595	3,5836±0,07	3,4992
1408,0	3,1126±0,06	3,0291	3,2704±0,06	3,2001	3,5219±0,07	3,3598	3,6121±0,07	3,4995



Şekil 4.25. $Bi_2(WO_4)_3$ ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenliğinin enerjiye göre değişimi



Şekil 4.26. Sn ile katkılanmış polimer kompozitlerin etkin iletkenliğinin enerjiye göre değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile %5-10-15 ve 20 oranlarında katkılanmış polimer kompozitlerinin gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimleri (RPE), radyasyon geçirime oranı (TF), kütle azaltma katsayıları (μ/ρ), lineer azaltma katsayıları (μ), yarı kalınlık değerleri (HVL), onda-bir kalınlık değerleri (TVL), serbest ortalama yol değerleri (MFP), atomik ($\sigma_{t,a}$), moleküler ($\sigma_{t,m}$) ve elektronik ($\sigma_{t,el}$) tesir kesitleri, etkin atom numaraları (Z_{eff}), etkin elektron yoğunlukları (NE) ve etkin iletkenlik (σ) parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu ve ^{241}Am radyoaktif kaynaklarından yayımlanan yirmi iki farklı enerjide ve HPGe detektör yardımı ile Şekil 3.6'da gösterilen deney geometrisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir deneysel sonuç teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve genel olarak deneysel ve teorik veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Deneysel ve teorik sonuçlar Tablo 4.1-4.26 ve Şekil 4.1-4.26'da sunulmuştur.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini belirlemek için incelenen ilk parametre radyasyon koruma verimidir ve bu parametre sadece deneysel olarak incelenmiştir. Bu parametreyi elde etmek için Denklem (3.1) kullanılmıştır. Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait deneysel radyasyon koruma verimi sonuçları görülmektedir. Benzer şekilde, Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'te Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait deneysel radyasyon koruma verimi sonuçları görülmektedir. İlgili tablolar ve şekiller incelendiğinde, ağırlıkça %20 oranında güçlendirilmiş polimer kompozitlerin daha iyi bir zırhlama malzemesi olduğu görülmektedir. Bunlar arasından Sn(%20) kodlu numunenin $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) kodlu numuneden düşük enerjilerde (ilk enerjilerde) daha iyi bir zırhlama malzemesi olmasına rağmen yüksek enerjilerde (diğer enerjilerde) tersi bir durum olduğu görülmektedir, yani, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) kodlu numune yüksek enerjilerde Sn(%20) kodlu numuneden daha iyi bir zırhlama malzemesidir. İlgili şekil ve tablolardan

gözlemlenen diğer bir durum ise artan enerji ile radyasyon koruma verimi parametresinin azaldığı ve artan katkılama miktarı ile bu parametrenin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de düşük enerjilerde bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın sebebi $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ bileşiği içinde bulunan bizmut ve tungsten elementlerinin K tabakası soğurma enerjilerinin (Bi için 90,53 keV ve W için 69,53 keV) bu enerji bölgesinde bulunmasıdır. Denklem (4.44) veya (100-RPE) eşitliği ile belirlenen bir diğer radyasyon zırhlama parametresi ve radyasyon koruma veriminin tersi diyebileceğimiz radyasyon geçirme faktörüdür. Bu parametreye ait deneysel sonuçlar $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler için Tablo 4.3 ve Şekil 4.2’de ve Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitler için Tablo 4.4 ve Şekil 4.4’te verilmiştir. Bu parametre radyasyon koruma veriminin tersi olduğu için beklenildiği gibi artan enerji ile arttığı ve artan katkılama miktarı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Bu parametrede de radyasyon koruma veriminde olduğunda gibi %20 katkılı polimer kompozitlerin daha iyi bir radyasyon zırhlama malzemesi olduğu gözlemlenmiştir.

Maddenin fiziksel halinden ve yoğunluğundan bağımsız ve radyasyon zırhlama çalışmalarında öncü parametre olan kütle azaltma katsayısı sonuçları deneysel olarak Denklem (3.33) ile ve teorik olarak temelinde karışım kuralı olan Denklem (3.34) yardımı ile belirlenmiştir. Bu parametre belirlendikten sonra bunlar yardımıyla lineer azaltma katsayısı, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol gibi birçok parametre belirlenebilir. Sunulan çalışmadaki teorik değerler WinXCOM programı (L Gerward vd. 2001) kullanılarak elde edilmiştir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı sonuçları 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında Tablo 4.5 ve Şekil 4.5’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Benzer şekilde, farklı oranlarda Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı sonuçları Tablo 4.6 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Kütle azaltma katsayılarının artan enerji ile azaldığı ve artan katkılama miktarı ile arttığı gözlemlenmiştir. Çalışan enerjileri düşük enerji (59,5 keV ile 136,5 keV arası), orta enerji (276,4 keV ile 964,1 keV arası) ve yüksek enerji (1085,9 keV ve üstü) bölgesi olarak üç kısımda değerlendirecek olursak, düşük enerji bölgesinde keskin bir azalış gözlemlenirken orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise gözlemlenen azalış daha azdır.

Düşük enerji bölgesinde fotoelektrik tesir kesiti daha baskın iken orta ve yüksek enerji bölgelerinde Compton saçılması tesir kesiti ve çift oluşum tesir kesiti daha baskındır. Fotoelektrik tesir kesiti Z^{4-5} (Z, atom numarası) ve $E^{-3,5}$ (E, foton enerjisi) ile, Compton saçılması tesir kesiti Z ve E^{-1} ile ve çift oluşum tesir kesiti Z^2 ve E ile orantılıdır. Bu bağımlılıklarda düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki azalmaları açıklamaktadır. Tablo 4.5 ve 4.6 incelendiğinde 59,5 keV foton enerjisi hariç $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerden daha yüksek kütle azaltma katsayılarına sahip oldukları görülmektedir. Çalışılan tüm numuneler içinde 59,5 keV foton enerjisi dışında $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%20)$ kodlu numunenin en iyi kütle azaltma katsayılarına sahip olduğu ve bu yüzden de en iyi radyasyon zırhlama malzemesi olacağı gözlemlenmiştir. İlgili tablo ve şekillerden de görüleceği gibi üretilen kompozitlerin düşük enerji bölgesinde daha iyi bir zırhlama malzemesi olabileceği aşıkardır. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%5)$ kodlu numune ile $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3(\%20)$ kodlu numunenin kütle azaltma katsayıları arasında 59,5 keV foton enerjisinde %116,8'lik bir artış varken, 81,0 keV'de bu artış %136,1'dir. Benzer şekilde Sn(%5) kodlu numune ile Sn(%20) kodlu numunenin kütle azaltma katsayıları arasında 59,5 keV foton enerjisinde %153,5'lik bir artış varken 81,0 keV'de bu artış %106,7'dir. Bu bilgilerde artan katkılama oranı ile kütle azaltma katsayısının arttığını belirtmektedir.

Kütle azaltma katsayısı kullanılarak farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için belirlenen ilk parametre lineer azaltma katsayısıdır. Bu parametrede numunenin yoğunluğu da etkili olduğu için kullanışlı bir parametredir. Sunulan çalışmada güçlendirilmiş kompozitlerin lineer azaltma katsayıları, kütle azaltma katsayılarının numunenin yoğunluğuna bölünmesiyle belirlenmiştir. Elde edilen deneysel ve teorik lineer azaltma katsayıları $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş kompozitler için Tablo 4.7 ve Şekil 4.7'de ve Sn ile güçlendirilmiş kompozitler için ise Tablo 4.8 ve Şekil 4.8'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4.7-4.8 ve Şekil 4.7-4.8 incelendiğinde artan enerji ile lineer azaltma katsayısının azaldığı ve artan katkılama miktarı ile lineer azaltma katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Artan enerji ile azalmanın düşük enerji bölgesinde keskin, daha sonraki enerji bölgelerinde daha düzgün olduğu görülmektedir. Kütle azaltma katsayılarında da bahsedildiği gibi bu azalmalar ilgili bölgeye göre fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitlerinin baskınlığına göre değişmektedir. Tablo 4.7 ve 4.8'den de görüldüğü gibi 59,5 keV enerjisi hariç $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir

radasyon zırlama malzemesi olduğu aşıkardır. Benzer şekilde, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) ile kodlanmış numune 59,5 keV foton enerjisi dışında bütün incelenen kompozitler içinde en iyi radyasyon zırlama malzemesidir.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş kompozitlerin radyasyon zırlama özelliklerini incelemek için belirlenen sonraki parametreler daha pratik bilgiler sunması açısından ve lineer azaltma katsayısına bağlı olan yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol parametreleridir. Bu parametreler ile lineer azaltma katsayısı arasında ters bir orantı vardır. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş kompozitlerin yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol değeri sırasıyla denklem (3.40), (3.41) ve (3.42) ile belirlenmiştir. Yarı kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin yarıya düşmesi için gerekli numune kalınlığı, onda-bir kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin %90'nını soğurmak için gerekli numune kalınlığı iken serbest ortalama yol başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'sinin geçebileceği numune kalınlığı olarak ifade edilir. Tanımlardan da anlaşılabilceği gibi bu parametreler ne kadar küçük olursa numunenin radyasyon zırlama özelliği de o kadar iyi olacaktır. 59,5 keV ile 1408,0 keV enerji aralığında 22 farklı enerjide farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş kompozitlerin deneysel ve teorik yarı kalınlık değeri Tablo 5.9 ve Şekil 5.9'da, onda-bir kalınlık değeri Tablo 4.11 ve Şekil 4.11'de ve serbest ortalama yol değeri Tablo 4.13 ve Şekil 4.13'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı enerji değerlerinde farklı oranlarda Sn ile güçlendirilmiş kompozitlerin deneysel ve teorik yarı kalınlık değeri Tablo 4.10 ve Şekil 4.10'da, onda-bir kalınlık değeri Tablo 4.12 ve Şekil 4.12'de ve serbest ortalama yol değeri Tablo 4.14 ve Şekil 4.14'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.9-4.14 ve Tablo 4.9-4.14 incelendiğinde artan foton enerjisi ile yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol değeri arttığı gözlemlenmiştir. Yine, aynı tablolar ve şekillerden de görülebileceği gibi artan katkılama miktarına göre yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol değeri azaldığı görülmektedir. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş numuneler içinde 59,5 keV foton enerjisi hariç $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş olanlar daha düşük yarı kalınlık, onda-bir kalınlık ve serbest ortalama yol değerlerine sahip olduğundan $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırlama malzemesidir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler kendi

aralarında incelendiğinde, en düşük yarı kalınlık, onda-bir kalınlık ve serbest ortalama yol değerlerine sahip olan $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) kodlu numune çalışılan numuneler içinde en iyi radyasyon zırhlama malzemesi olduğu görülmektedir. Yarı kalınlık değeri sonuçları pratikte en kullanışlı parametre olduğu için farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin katkılama oranı ile değişimi bazı enerjilerde incelenirse; üretilen kompozitler düşük enerji bölgesinde radyasyon şiddetini iyi azalttığından, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5) kodlu numune ile $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) kodlu numunenin yarı kalınlık değerleri arasında 59,5 keV foton enerjisinde %135,8'lik bir artış varken, 81,0 keV'de bu artış %156,8'dir. Sn(%5) kodlu numune ile Sn(%20) kodlu numunenin yarı kalınlık değerleri arasında 59,5 keV foton enerjisinde %162,8'lik bir artış varken, 81,0 keV foton enerjisinde bu artış %114,3'tür. Daha kolay bir dil ifade edilecek olursa 59,5 keV'de Sn(%5) kodlu numune kalınlığının %162,8'i kadar daha ince bir Sn(%20) kodlu numune aynı oranda radyasyon şiddetini azaltacaktır. Bu yükselişler göz önüne alındığında artan katkılama oranı ile yarı kalınlık değerlerinin azaldığını tekrar ifade edebiliriz.

Bir malzemenin radyasyon zırhlama özelliğini incelemek için tercih edilebilecek diğer parametreler içerisinde moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri parametreleri tercih edilebilir. Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla gelen foton enerjisinde numuneye ait molekül ile fotonun, atom ile fotonun ve elektron ile fotonun etkileşmesinin olasılığını belirten parametrelerdir. Dolayısıyla, gelen foton ile molekülün, atomun veya elektronun etkileşme olasılığı ne kadar büyük olursa malzemenin radyasyonu azaltma kabiliyeti de o kadar iyi olacaktır. Bu parametreler kütle azaltma katsayısı kullanılarak belirlenebilen ve etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik gibi parametrelerin hesabında kullanılan parametrelerdir. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerji aralığında moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla denklem (3.35), (3.36) ve (3.37) yardımıyla belirlenmiştir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş kompozitlere ait deneysel ve/veya teorik moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sonuçları sırasıyla Tablo 4.15 ve Şekil 4.15, Tablo 4.17 ve Şekil 4.17 ve Tablo 4.19 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Farklı oranlarda Sn ile güçlendirilmiş kompozitlere ait deneysel ve/veya teorik moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sonuçları sırasıyla Tablo 4.16 ve Şekil 4.16, Tablo 4.18 ve Şekil 4.18 ve Tablo 4.20 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu tesir kesitlerinden moleküler ve atomik

olanlar hem deneysel hem de teorik belirlenmesine rağmen, elektronik tesir kesiti üretilen kompozitler içinde hidrojen, oksijen gibi elementlerin kütle azaltma katsayıları deneysel belirlenemeyeceğinden dolayı sadece teorik olarak hesaplanmıştır. İlgili şekillerden ve tablolardan da görülebileceği gibi her üç tesir kesiti için de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Yani, her üç tesir kesiti artan foton enerjisi azalmakta ve artan katkılama oranı ile artmaktadır. Düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki ani ve düzgün azalmaların sebebi kütle azaltma katsayılarında da bahsedildiği gibi fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitleridir. Tablo 4.15-4.20 incelendiğinde $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerden 59,5 keV foton enerjisi hariç daha yüksek moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitlerine sahip olduğu görülmektedir, yani, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemeleridir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler kendi içinde incelendiğinde %20 $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozit artan katkılama oranına göre bu tesir kesitleri arttığından diğerlerine göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesidir. Bu tesir kesitlerinden de gözlemlenen bir diğer nokta önceki parametrelerde de gözlemlendiği gibi düşük enerji bölgesinde bu numuneler daha iyi bir radyasyon zırh malzemesidir.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini belirlemek için incelenen son üç parametre etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenliktir. Bu parametreler ne kadar yüksekse numunenin radyasyon zırhlama özelliği de o derece iyi olacaktır. Bu parametrelerden etkin iletkenlik, elektriksel iletkenliğin göz önüne alındığı alanlarda ayrı bir öneme sahiptir. Etkin atom numarası, atomik ve elektronik tesir kesitleri yardımıyla belirlenebilen bir parametre iken, etkin elektron yoğunluğu etkin atom numarası yardımı ile ve etkin iletkenlik etkin elektron yoğunluğu yardımıyla belirlenen parametrelerdir, yani, bu parametreler birbiri ile doğrudan ilişkilidir. Etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik sırasıyla denklem (3.38), (3.39) ve (3.43) ile yardımıyla belirlenmiştir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait deneysel ve teorik etkin atom numaraları, elektron yoğunlukları ve iletkenlikler 59,5 keV ile 1408,0 keV foton enerjisi aralığında sırasıyla Tablo 4.21 ve Şekil 4.21, Tablo 4.23 ve Şekil 4.23 ve Tablo 4.25 ve Şekil 4.25’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı enerjilerde farklı oranlarda Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlere ait

deneysel ve teorik etkin atom numaraları, elektron yoğunluklar ve iletkenlikler sırasıyla Tablo 4.22 ve Şekil 4.22, Tablo 4.24 ve Şekil 4.24 ve Tablo 4.26 ve Şekil 4.26'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bütün güçlendirilmiş polimer kompozitlerin etkin atom numaralarının, elektron yoğunluklarının ve iletkenliklerinin artan foton enerjisi ile eksponensiyel olarak azaldığı ve artan katkılama oranı ile arttığı ilgili tablo ve şekillerden görülmektedir. Tablo 4.21-4.22 ve Şekil 4.21-4.22 incelendiğinde $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerden 59,5 keV foton enerjisi hariç daha yüksek etkin atom numarası değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu yüzden, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesidir. Farklı oranlarda $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitler karşılaştırıldığında ise $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) ile kodlanmış numunenin bunlar arasında en iyi radyasyon zırh malzemesi olduğu aşıkardır. Artan katkılama oranı ile polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama kabiliyetleri farklı enerjilerde incelenirse; $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%5) kodlu numune ile $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ (%20) kodlu numunenin etkin atom numaraları arasında 59,5 keV foton enerjisinde %97,2'lik artış, 81,0 keV'de %119,1'lik artış, 661,7 keV'de %11,9'luk ve 1332,5 keV'de %14,6'lık bir artış gözlemlenmiştir. Sn(%5) kodlu numune ile Sn(%20) kodlu numunenin etkin atom numaraları arasında 59,5 keV'de %102,6'lık artış, 81,0 keV'de %95,5'lik artış, 661,7 keV'de %13,4'lük artış ve 1332,5 keV'de %13,1'lik bir artış gözlemlenmiştir. Etkin elektron yoğunluğu ve iletkenlik parametreleri direkt olarak birbirine bağlı parametrelerdir. Etkin elektron yoğunluğu numunenin içindeki elementlerin atomik ağırlıkları toplamı ile ilişkili olduğundan (denklem 3.8'e bakınız) bu parametrelerde farklı bir durum gözlemlenmiştir. $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitleri H, C, O, Co, W ve Bi elementleri oluştururken, Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitleri H, C, O, Co ve Sn elementleri oluşturmaktadır. Etkin elektron yoğunluğu ile numuneyi oluşturan elementlerin atomik ağırlıkları toplamı arasında ters orantı olduğu için Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir ve etkin iletkenlik ile etkin elektron yoğunluğu doğru orantılı olduğundan (denklem 3.12'ye bakınız) etkin iletkenlik sonuçlarına göre de Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitler daha iyi bir radyasyon zırh malzemesidir. Farklı oranlarda Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitler kendi içinde incelendiğinde %20 Sn ile katkılanmış Sn(%20) kodlu numune diğerlerine göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesidir.

$\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ veya Sn ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin radyasyon koruma verimi, radyasyon geçirme oranı, kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık ve onda-bir kalınlık değerleri, serbest ortalama yol parametresi, moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik gibi 13 farklı radyasyon zırhlama parametresi düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerinde incelendiğinde, $\text{Bi}_2(\text{WO}_4)_3$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin Sn ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu ve özellikle düşük enerji bölgesinde radyasyonu daha iyi azalttığı yapılan çalışmalar sonucunda bulunmuştur. %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katkılama yapılarak radyasyon zırhlama kapasitelerindeki artışın eğilimi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Sunulan çalışmada %20 üst sınır olarak tutulmuştur ve %20 ile katkılanan kompozitlerin diğerlerinden daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. Benzer çalışmalar daha yüksek katkılama oranlarında gerçekleştirildiğinde daha iyi radyasyon zırh malzemesi elde edilebileceği gözlemlenen sonuçlardan tahmin edilmektedir. Üretilen bu kompozitler radyasyondan korunmanın önemli olduğu nükleer santraller, hastanelerin radyasyon ile ilgili birimleri ve araştırma laboratuvarları gibi alanlarda alternatif radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

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

Akman F, Ozkan I, Kaçal MR, Polat H, Shams AM Issa, Tekin HO, Agar O (2021) Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes* 167: 109470

Akman F, Kaçal MR, Almousa N, Sayyed MI, Polat H (2020) Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Progress in Nuclear Energy* 121:103257

Akman F, Kaçal MR, Sayyed MI, Karataş HA (2019) Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume p. 782: 315-322

Akman F, Ogul H, Kaçal MR, Polat H, Dilsiz K, Turhan MF (2020) Impact of lead (II) iodide on radiation shielding properties of polyester composites. *Applied Physics A* 126:301

Akman F, Ogul H, Kaçal MR, Polat H, Dilsiz K, Agar O (2021) Gamma attenuation characteristics of CdTe-Doped polyester composites. *Progress in Nuclear Energy* 131: 103608

Alshiplia M, Kabira NA, Hashimb R, Marshdeha MW, Tajuddina AA (2018) Measurement of attenuation coefficients and CT numbers of epoxy resin and epoxy-based Rhizophora spp particleboards in computed tomography energy range. *Radiation Physics and Chemistry* 149: 41–48

Amandeep Sharma, Sayyed MI, Agar O, Kaçal MR, Polat H, Akman F (2019) Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics* 241: 122330

Bagheria K, Razavib SM, Ahmadib SJ, Kosaric M, Abolghasemia H (2018) Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated polyester/nanoclay/PbO composites. *Radiation Physics and Chemistry* 146: 5–10

Bashter II (1997) Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 24, p. 17: 1389-1401

Belgin EE, Aycik GA, Kalemteas A, Pelit A, Dilek DA, Kavak MT (2016) Usability of natural titanium-iron oxide as filler material for ionizing electromagnetic radiation shielding composites; preparation, characterization and performance. *Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry* 309: 659–666

Bhosale RR, More CV, Gaikwad DK, Pawar PP, Rode MN (2017) Radiation shielding and gamma ray attenuation properties of some polymers. *Nuclear Technology & Radiation Protection* 3: 288-293

Büyükyıldız M, Taşdelen MA, Karabul Y, Çağlar M, İçelli O, Boydaş E (2018) Measurement of photon interaction parameters of high-performance polymers and their composites. *Radiation Effects & Defects in Solids* 5–6: 474–488

Cherkashinaa NI, Pavlenkoa VI, Noskovb AV (2019) Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry* 159: 111–117

Dong M, Xue X, Liu S, Yang H, Li Z, Sayyed MI, Agar O (2019) Using iron concentrate in Liaoning Province, China, to prepare material for X-Ray shielding. *Journal of Cleaner Production* 210: 653-659

Eke C, Agar O, Segebade C, Boztosun I (2016) Attenuation properties of radiation shielding materials such as granite and marble against γ -ray energies between 80 and 1350 keV. *Radiochimica Acta* p. 105 (10): 851-863

Geraldelli W, Tomal A, Poletti ME (2013) Characterization of tissue-equivalent materials through measurements of the linear attenuation coefficient and scattering profiles obtained with polyenergetic beams. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 2: 566 - 571

Hassan HE, Badran HM, Aydarous A, Sharshar T (2015) Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for γ -rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 360: 81–89

Hassan HE, Badran HM, Aydarous A, Sharshar T (2015) Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for c-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 360: 81–89

Hassanzadeh M, SadatKiai SM (2018) Calculation of photon attenuation coefficient and dose rate in concrete with the addition of SiO₂ and MnFe₂O₄ nanoparticles using MCNPX code and comparison with experimental results. *Nuclear Science and Technology* 29:152

İçelli O, Yalçın Z, Okutan M, Boncukcuoğlu R, Şen A (2011) The determination of the total mass attenuation coefficients and the effective atomic numbers for concentrated colemanite and Emet colemanite clay. *Annals of Nuclear Energy* 38: 2079–2085

Kaçal MR, Polat H, Oltulu M, Akman F, Agar O, Tekin HO (2020) Gamma shielding and compressive strength analyses of polyester composites reinforced with zinc: an experiment, theoretical, and simulation based study. *Applied Physics A* 126:205

Kaçal MR, Akman F, Sayyed MI, Akman F (2019) Evaluation of gamma-ray and neutron attenuation properties of some polymers. *Nuclear Engineering and Technology* 51: 818-824

Kharita MH, Yousef S, AlNassar M (2011) Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete. *Progress in Nuclear Energy* 53: 207-211

Knoll FE, (2010) *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc.

Kucuk N, Cakir M, Isitman NA (2013) Mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and effective electron densities for some polymers. *Radiation Protection Dosimetry*. 1: 127–134

L Gerward, N Guilbert, K B Jensen, H Levring (2001) X-ray absorption in matter. *Reengineering XCOM. Radiation Physics and Chemistry* p. 60: 23-24

Li Q, Wei Q, Zheng W, Zheng Y, Okosi N, Wang Z, Su M (2018) Enhanced Radiation Shielding with Conformal Light-Weight Nanoparticle–Polymer Composite. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 10: 35510–35515

Li R, Gu Y, Yang Z, Li M, Hou Y, Zhanga Z (2017) Gamma ray shielding property, shielding mechanism and predicting model of continuous basalt fiber reinforced polymer matrix composite containing functional filler. *Materials and Design* 124: 121–130

Li R, Gu Y, Zhang G, Yang Z, Li M, Zhanga Z (2017) Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide. *Composites Science and Technology* 143: 67-74

Malkapura SM, Divakara L, Narasimhana MC, Karkeraa NB, Goverdhanb P, Sathianc V, Prasadd NK (2017) Neutron radiation shielding properties of polymer incorporated self-compacting concrete mixes. *Applied Radiation and Isotopes* 125: 86–93

Manjunatha HC (2017) A study of gamma attenuation parameters in polymethylmethacrylate and Kapton. *Radiation Physics and Chemistry* 137: 254–259

Manjunatha HC, Seenappa L, Chandrika BM, Sridhar KN, Hanumantharayappa C (2018) Gamma, X-ray and neutron shielding parameters for the Al-based glassy alloys *Applied Radiation and Isotopes* 139: 187-194

Mann KS, Rani A, Heer MS (2015) Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry* 106: 247–254

Martin JE (2006). *Physics for Radiation Protection, A Handbook*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA

Milad VS, Mostean B, ZM Shamsaie (2017) Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study. *Vacuum* 136: 73-76

Mirji R, Lobo B (2017) Computation of the mass attenuation coefficient of polymeric materials at specific gamma photon energies. *Radiation Physics and Chemistry* 135: 32–44

Mkhaiber AF, Dheyaa A (2018) Experimental study of some shielding parameters for composite shields. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* 1003: 012109

Ozkalaycı F, Kaçal MR, Agar O, Polat H, Sharma A, Akman F (2020) Lead (II) chloride effects on nuclear shielding capabilities of polymer composites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 145: 109543

Podgoršak EB (2006). *Radiation Physics for Medical Physicist*. Germany: Springer

Sayyed MI, Akman F, Gecibesler IH, Tekin HO (2018) Measurement of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, and electron densities for different parts of medicinal aromatic plants in low-energy region. *Nuclear Science and Technology* 29:144

Sharma A, Sayyed MI, Agar O, Kaçal MR, Polat H, Akman F (2019) Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Material Chemistry and Physics* Volume 241: 122330

Singh R, Singh S, Singh G, Thind KS (2017) Gamma Radiation shielding properties of steel and iron slags. *New Journal of Glass and Ceramics*, 7: 1-11

Singh VP, Badiger NM (2016) Photon interaction with semiconductor and scintillation detectors. *Nuclear Science and Technology* 27:72

Singh VP, Shirmardi SP, Medhat ME, Badiger NM (2015) Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using Monte Carlo simulation. *Vacuum* 119: 284-288

Syed Naeem Ahmed (2007) *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Great Britain: Academic Press Inc. Published by Elsevier

Tekin HO, Akman F, Shams AM Issa, Kacal MR, Kilicoglu O, Polat H (2020) Two-step investigation on fabrication and characterization of iron-reinforced novel composite materials for nuclear-radiation shielding applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 146: 109604

Tekin HO, Kaçal MR, Shams AM Issa, Polat H, Susoy G, Akman F, Kilicoglu O, Gillette VH (2021) Sodium dodecatungstophosphate hydrate-filled polymer composites for nuclear radiation shielding. *Materials Chemistry and Physics* 256: 123667

Tekin HO, Kavaz E, Altunsoy EE, Kilicoglu O, Agar O, Erguzel TT, Sayyed MI (2019) An extensive investigation on gamma-ray and neutron attenuation parameters of

cobalt oxide and nickel oxide substituted bioactive glasses. *Ceramics International* 45: 9934-9949

Tekin HO, Manici T (2017) Simulations of mass attenuation coefficients for shielding materials using the MCNP-X code. *Nuclear Science and Technology* 28:95.

Tekin HO, Singh VP, Manici T (2017) Effects of micro-sized and nano sized WO₃ on mass attenuation coefficients of concrete by using MCNPX code. *Applied Radiation and Isotopes* 121: 122–125

Turner JE (2007) *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA

Vahabi SM, Bahreinipour M, Zafarghandi MS (2017) Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study. *Vacuum* 136: 73-76

Waly SA, Bourham MA (2015) Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials. *Annals of Nuclear Energy* 85: 306–310