

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL RADYASYON ZIRHLAYICILAR: EPOKSİ TEMELLİ
METAL OKSİT MİKRO VE NANO YAPILI KOMPOZİTLER

Yaşar KARABUL

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Önder EYECİOĞLU

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ NESİL RADYASYON ZIRHLAYICILAR: EPOKSİ TEMELLİ METAL
OKSİT MİKRO VE NANO YAPILI KOMPOZİTLER**

Yaşar KARABUL tarafından hazırlanan tez çalışması 27.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Önder EYECİOĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Orhan İÇELLİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa DEMİR, Üye
İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi

Doç. Dr. Zeynep GÜVEN ÖZDEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet KILIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özden ASLAN ÇATALTEPE, Üye
İstanbul Gedik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Orhan İÇELLİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yeni Nesil Radyasyon Zırhlayıcılar: Epoksi Temelli Metal Oksit Mikro ve Nano Yapılı Kompozitler başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yaşar KARABUL

İmza



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FDK-2019-3182 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme
ve
biricik eşime

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca görüş ve önerileriyle tezimin yönetimini üstlenen değerli hocalarım Prof. Dr. Orhan İÇELLİ ve Dr. Öğr. Üyesi Önder EYECİOĞLU'na Bilgi, birikim ve pozitif enerjisini eksik etmeyen; her türlü sorunumu kendine dert edip çözüm üreten kıymetli hocam Doç. Dr. Zeynep GÜVEN ÖZDEMİR'e

Araştırma görevlisi olduğum ilk günden beri sadece bir hoca değil aynı zamanda dost olan tezimin deneysel ve teorik aşamalarında desteklerini unutamayacağım kıymetli hocam Doç. Dr. Mehmet Kılıç'a

Tez çalışmalarım sırasında fikir, görüş ve desteklerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi Üyesi saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa Demir'e

Kompozit hazırlama aşamalarında her an yanımda olan Nazlıcan Şahin ve Merve Bozkurt'a

Doktora öğrenimimi BİDEB 2228-B Doktora Burs Programı'yla destekleyen TÜBİTAK'a

Yıldız Teknik Üniversitesi'nde çalışmaya başladığım ilk günden beri çalışmalarım için destek ve yardımlarını esirgemeyen Fizik Bölümü öğretim üyelerine ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Son olarak her zaman yanımda olan, çalışmalarım boyunca yaşadığım bütün stres, sıkıntı ve üzüntülerimi paylaşıp destek olan değerli eşim Pınar KARABUL canım oğullarım Ayhan Yiğit KARABUL ve Kuzey KARABUL'a bu tezi ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
2 GENEL BİLGİLER	8
2.1 Radyasyon Kavramı.....	8
2.2 Radyasyon Madde Etkileşmesi	13
2.3 Radyasyonun Olumsuz Etkileri.....	17
2.4 Radyasyondan Korunma (ALARA)	19
2.5 Radyasyon Zırhlama Parametreleri	21
2.6 Monte Carlo Yöntemi	23
2.7 Geleneksel Radyasyon Zırhlayıcılar	31
2.8 Yeni Nesil Zırhlayıcılar	34
3 MATERYAL VE METOT	38
3.1 Malzemeler ve Karakterizasyon.....	38
3.2 Kompozitlerin Hazırlanışı.....	51
3.3 Radyasyon Zırhlama Ölçümü	55
4 BULGULAR	66
4.1 Mikro Katkılı Kompozitler	66
4.2 Ticari Nano Katkılı Kompozitler	81
4.3 Sentezlenen Nano Katkılı Kompozitler	94
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	106
5.1 Kompozitlerin Zırhlama Özellikleri	106
5.2 Kompozitlerin Radyasyon Zırhlamalarının Kıyaslanması.....	118
5.3 Parçacık Boyutu ve Radyasyon Zırhlama İlişkisi	120

KAYNAKÇA

123

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

131



SİMGE LİSTESİ

α	Alfa Parçacığı
Z	Atom Numarası
CuO	Bakır Oksit
β	Beta Parçacığı
Bi ₂ O ₃	Bizmut Oksit
B ₄ C	Bor Karbür
σ	Compton Tesir Kesiti
Fe ₃ O ₄	Demir Oksit
E _b	Elektronun Bağlanma Enerjisi
FeCr	Ferrokrom
K _e	Fotoelektronun Kinetik Enerjisi
μ/ρ	Kütle Azaltma Katsayısı
μ	Lineer Azaltma Katsayısı
MoS ₂	Molibden Disülfür
PVC	Polivinil Klorür
λ	Radyasyon Dalgaboyu
NaI(Tl)	Sodyum İyodür (Talyum)
Ta	Tantal
WO ₃	Tungsten Trioksit
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
EGS4	Electron Gamma Shower version 4
ENDF	Evaluated Nuclear Data File
ENDL	Evaluated Nuclear Data Library
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer
GEANT4	Geometry And Tracking version 4
HT	Hidrotermal
HVL	Half Value Layer (Yarı Değer Kalınlığı)
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
keV	Kiloelektronvolt
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen- Low Density Polyethylene
MC	Monte Carlo
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport Code
MCNP6	Monte Carlo N-Particle Transport Code version 6
MeV	Megaelektronvolt
MFP	Mean Free Path (Ortalama Serbest Yol)
MMC	Macro Monte Carlo
PENELOPE	Penetration and Energy Loss of Positrons and Electrons
PET	Pozitron Emisyon Tomografisi
PMT	Photomultiplier Tube
PSE	Particle Size Effect
SEM	Scanning Electron Microscope
ST	Solvothermal
TEM	Transmission Electron Microscope
TVL	Tenth Value Layer (Ona Bir Değer Kalınlığı)
XRD	X-ray Diffraction

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Çekirdeklerin kararlılık çizgisi [16]	9
Şekil 2.2	Temel madde-gama radyasyonu etkileşimlerinin baskınlık bölgeleri [26]	16
Şekil 2.3	ALARA prensibinin genel gösterimi [33].	20
Şekil 2.4	MCNP input dosyasının genel bir gösterimi.....	28
Şekil 3.1	Bisfenol-A epoksi reçinesinin genel molekül yapısı.....	39
Şekil 3.2	İzoforon diamin sertleştiricisinin genel molekül yapısı [47]	39
Şekil 3.3	Mikro Bi ₂ O ₃ parçacıklarının SEM görüntüsü	41
Şekil 3.4	Mikro WO ₃ parçacıklarının SEM görüntüsü	41
Şekil 3.5	Ticari nano Bi ₂ O ₃ 'ün XRD deseni	42
Şekil 3.6	Ticari nano Bi ₂ O ₃ parçacıklarının TEM görüntüsü	43
Şekil 3.7	Ticari nano WO ₃ 'ün XRD deseni	43
Şekil 3.8	Ticari nano WO ₃ parçacıklarının TEM görüntüsü	44
Şekil 3.9	a) Sentezlerde kullanılan otoklav ve bileşenleri b) Otoklav sisteminin şematik gösterimi	46
Şekil 3.10	Nano Bi ₂ O ₃ parçacıkların ST yöntemle sentezinin şematik gösterimi	47
Şekil 3.11	Sentezlenen nano Bi ₂ O ₃ 'ün XRD deseni	48
Şekil 3.12	Sentezlenen Nano Bi ₂ O ₃ parçacıklarına ait TEM görüntüleri.....	48
Şekil 3.13	Nano WO ₃ parçacıkların HT yöntemle sentezinin şematik gösterimi	49
Şekil 3.14	Sentezlenen nano WO ₃ 'ün parçacıklarına ait XRD deseni	50
Şekil 3.15	Sentezlenen Nano WO ₃ parçacıklarına ait TEM görüntüsü	50
Şekil 3.16	Saf epoksi matrislerin teflon kalıplarda çekilmiş fotoğrafları	52
Şekil 3.17	Gama spektroskopisi şematik gösterimi	56
Şekil 3.18	Ba-133 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [54]	57
Şekil 3.19	Cs-137 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [54]	59
Şekil 3.20	Co-60 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [54].....	60
Şekil 3.21	Zırhlama ölçüm geometrisinin şematik gösterimi	61
Şekil 3.22	Boş ve zırhlayıcı varken yapılan ölçümlerin gama spektrum örneği	62
Şekil 3.23	MNCP6 simülasyon geometrisinin genel görüntüsü.....	63

Şekil 4.1	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri.....	67
Şekil 4.2	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri.....	68
Şekil 4.3	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri.....	70
Şekil 4.4	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri.....	72
Şekil 4.5	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri.....	73
Şekil 4.6	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri.....	74
Şekil 4.7	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri.....	76
Şekil 4.8	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri.....	78
Şekil 4.9	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri.....	79
Şekil 4.10	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri.....	80
Şekil 4.11	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri	82
Şekil 4.12	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri	83
Şekil 4.13	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri	84
Şekil 4.14	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri	85
Şekil 4.15	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri	87
Şekil 4.16	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri	88
Şekil 4.17	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri	89
Şekil 4.18	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri	91
Şekil 4.19	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri	92
Şekil 4.20	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri	93

Şekil 4.21	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri95
Şekil 4.22	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri96
Şekil 4.23	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri97
Şekil 4.24	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri98
Şekil 4.25	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri99
Şekil 4.26	81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri100
Şekil 4.27	356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri101
Şekil 4.28	662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri102
Şekil 4.29	1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri104
Şekil 4.30	1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri105
Şekil 5.1	Düşük enerjilerde MCNP simülasyonu ve deneysel olarak elde edilen MFP sonuçları a) Bi_2O_3 katkısı b) WO_3 katkısı.....117
Şekil 5.2	%20 katkılı tüm kompozitlerin deneysel MFP sonuçları.....119
Şekil 5.3	Farklı radyasyon enerjilerinde artan katkı oranıyla PSE faktörünün değişimi a) Bi_2O_3 katkısı b) WO_3 katkısı.....121

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	MCNP ile kullanılabilen 8 farklı dedektör türü ve birimleri [35] ..31
Tablo 3.1	Bisfenol-A epoksi reçinesinin teknik özellikleri39
Tablo 3.2	Ticari mikro ve nano Bi_2O_3 ve WO_3 parçacıklarının kodları ve fiziksel özellikleri.....40
Tablo 3.3	Hazırlanan kompozitlerde takviye parçacık yüzdeleri.....51
Tablo 3.4	Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ ve Epoksi/ $\mu\text{-WO}_3$ kompozitlerinin kütle yoğunlukları ve kurşuna göre göreceli ağırlıkları.....54
Tablo 3.5	Nano boyutta metal oksit katkılı kompozitlerin kütle yoğunlukları ve kurşuna göre göreceli ağırlıkları.....54
Tablo 4.1	81 ve 356 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri.....69
Tablo 4.2	662 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri.....71
Tablo 4.3	1173 ve 1332 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri73
Tablo 4.4	81 ve 356 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-WO}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri.....77
Tablo 4.5	662 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-WO}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri.....79
Tablo 4.6	1173 ve 1332 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-WO}_3$ kompozitlerinin MCNP ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri.....81
Tablo 5.1	81 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/ Bi_2O_3 ve Epoksi/ WO_3 kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri.....107
Tablo 5.2	356 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/ Bi_2O_3 ve Epoksi/ WO_3 kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri.....109
Tablo 5.3	662 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/ Bi_2O_3 ve Epoksi/ WO_3 kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri.....112
Tablo 5.4	1173 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/ Bi_2O_3 ve Epoksi/ WO_3 kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri.....114
Tablo 5.5	1332 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/ Bi_2O_3 ve Epoksi/ WO_3 kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri.....115

Tablo 5.6	Farklı radyasyon enerjileri için en yüksek mikrove nanoparçacık katkılı kompozitlerin ve bazı konvansiyonel zırhlayıcı malzemelerin μ/ρ değerleri	120
------------------	--	-----



Yeni Nesil Radyasyon Zırhlayıcılar: Epoksi Temelli Metal Oksit Mikro ve Nano Yapılı Kompozitler

Yaşar KARABUL

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Orhan İçelli

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Önder Eyecioğlu

Bu tez mikro ve nano Bi_2O_3 ve WO_3 katkılı epoksi matrisinin radyasyon zırhlama kabiliyetini araştırmaya odaklanmıştır. Mikro kompozitler ticari mikro Bi_2O_3 ve WO_3 parçacıkları ile hazırlanırken, nanokompozitler hem ticari olarak temin edilmiş hem de hidrotermal/solvotermal yöntemle sentezlenmiş nanoparçacıklar kullanılarak üretilmiştir. Öte yandan hazırlanan kompozitlerin radyasyon zırhlama parametreleri, mikro kompozitlerde deneysel ve MCNP6 simülasyonu kullanılarak elde edilirken, nano kompozitlerde ise sadece deneysel olarak belirlenmiştir. Tüm deneysel ölçümler NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve Ba-133, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif nokta kaynakları kullanılarak yapılırken, mikro kompozitlerin zırhlama simülasyonları MCNP versiyon 6.2 kodu ile gerçekleştirilmiştir. Mikro kompozitler için elde edilen deneysel ve MCNP6 simülasyon sonuçları, hem farklı parçacık katkısı hem de farklı foton enerjileri bakımından iyi bir tutarlılık sergilemiştir. Ayrıca parçacık boyutunun gelen fotonların yoğunluğunu azaltmadaki etkisi incelendiğinde, aynı katkı ağırlık yüzdeleri için nano parçacık katkısının mikro parçacık katkısına göre daha etkili

olduğu tespit edilmiştir. Bunun da ötesinde, düşük enerjili gama ışınlarına karşı hidrotermal/solvotermal yöntemle sentezlenmiş nanoparçacıkların kullanıldığı epoksi kompozitlerin, ticari olarak temin edilen nanoparçacıkların kullanıldığı epoksi kompozitlere göre daha iyi radyasyon zırhlama kabiliyetine sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, en yüksek Bi_2O_3 ve WO_3 katkılara sahip mikro ve nano kompozitlerin, nükleer tıpta kullanılan bazı tanısıl radyonüklidlerin yanı sıra röntgen, mamografi veya PET taramaları gibi görüntüleme cihazlarının tehlikeli etkilerinden korunmak için umut verici bir potansiyele sahip olduğu önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi, Radyasyon zırhlama, Kompozitler, MCNP6, Gama spektroskopisi.

New Generation Radiation Shielding: Epoxy Based Metal Oxide Micro and Nano Structured Composites

Yaşar KARABUL

Department of Physics

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Orhan İÇELLİ

Co-supervisor: Asst. Prof. Önder EYECİOĞLU

This thesis has focused on investigating the radiation shielding ability of the micro and nano Bi_2O_3 and WO_3 doped epoxy matrix. While micro composites have been prepared with commercial micro Bi_2O_3 and WO_3 particles, nanocomposites have been produced using both commercially supplied and hydrothermal/solvothermal synthesized nanoparticles. On the other hand, the radiation shielding parameters of the composites prepared have been obtained experimentally and by using MCNP6 simulation for the micro-composites, whereas they have been determined only experimentally for the nano-composites. While all experimental measurements have been carried out by using NaI(Tl) scintillation detector and the Ba-133, Cs-137, and Co-60 radioactive point sources, the shielding simulations of the micro composites have been realized by MCNP version 6.2 code. The experimental and MCNP6 simulation results for the micro composites have displayed a good consistency in the context of both different particle dopings and different photon energies. Additionally, when the effect of particle size on reducing the intensity of incident photons was examined, it has been determined that the nanoparticle additive is more effective than the microparticle additive for

the same additive weight percentages. Moreover, it has been determined that the epoxy composites prepared using the nanoparticles synthesized by hydrothermal/solvothermal method against low energy gamma rays have better radiation shielding ability than the epoxy composites synthesized by using commercially supplied nanoparticles. In conclusion, it can be suggested that the micro and nanocomposites having the highest Bi_2O_3 and WO_3 additives have a promising potential to protect against the dangerous effects of imaging devices such as roentgen, mammography, or PET scans as well as some diagnostic radionuclides used in nuclear medicine.

Keywords: Epoxy, Radiation shielding, Composites, MCNP6, Gamma spectroscopy.

1.1 Literatür Özeti

Büyük bir hızla gelişen teknoloji ile birlikte radyasyon kullanımının yaygınlaşması, radyasyonun canlı organizmalar üzerindeki olumsuz etkilerinden korunmayı önemli bir duruma getirmiştir. X-ışınlarının keşfi (W. C. Röntgen, 1895) ile başlayan radyasyon ile tanışıklığımız günümüze kadar artarak devam etmiştir. Yaşamın her anında yapay veya doğal radyasyon yayan kaynaklar sebebiyle canlılar sürekli olarak radyasyona maruz kalırlar. Özellikle tıp merkezlerinde, nükleer tesislerde ve endüstride kullanılan iyonlaştırıcı radyasyonun, insan sağlığı üzerine etkileri en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu sorunu çözmek için uzun zamandan beri toksik özelliklerine rağmen kurşun ve kurşun katkılı kompozitler kullanılmaktadır. Kurşun toksik olmasının yanı sıra, ağırlık açısından da avantajlı değildir. Zira radyoloji merkezlerinde çalışan sağlık personeli radyasyonun zararlı iyonize etkilerinden korumak üzere tasarlanmış oldukça ağır kurşun önlük ve koruyucu giysileri saatler boyunca giymek durumundadır. Son yıllarda kompozit ve nano parçacık üretim teknolojilerinde yapılan çalışmaların sonucu olarak; kurşuna yakın derecede radyasyon zırlama özelliğine sahip, kurşun gibi ağır ve toksik olmayan farklı malzemelerin elde edilebilmesi ulaşılabilir bir hedef haline gelmiştir. Ayrıca, bu yeni malzemelerin tekstil ve tasarım mühendislerince çok çeşitli şekillerde üretilebilmeleri de onların kullanım alanlarını ayrıca genişletmeye başlamıştır. Bu bakımdan, radyasyon zırhlayıcı malzeme arayışının temel motivasyonu; toksik olmayan, hafif, şeffaf ve işlenebilir alternatif malzemeler üzerine oluşturulmuştur. Zırh malzemelerini hafifletmek için polimerler önemli bir çözüm olarak görülmekte ve bununla ilgili farklı araştırmalar sürdürülmektedir. Düşük atom numaralı element içeriklerinden dolayı, polimerlerin tek başına yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyonları (X ve gama ışınları gibi) zayıflatması çok olası değildir. Polimerleri yüksek atom

numaralı elementler veya bileşiklerle güçlendirmek, radyasyon zırhlayıcı malzemeler olarak kullanımlarını mümkün kılan yöntemlerin başında gelmektedir. Bu bağlamda, bilimsel literatür incelendiğinde, kurşun içermeyen mikro ve nano parçacık katkılarıyla zenginleştirilmiş polimerik kompozitler üzerine ümit vadeci sonuçlar rapor etmiş çalışmalar olduğu görülmektedir. Örneğin, Abdel-Azizi ve arkadaşlarının ağırlıkça farklı yüzdelerde bor karbür (B_4C) ile takviye edilmiş etilen-propilen-dien kauçuk (EPDM)/düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kompozitlerin nötron zırhlama özelliklerini inceledikleri çalışmada, ağırlıkça %57 B_4C içeren EPDM/LDPE kompozitinin gelen nötronun akı yoğunluğunu yaklaşık %85 oranında azalttığı tespit edilmiştir [1]. Başka bir çalışmada, Nambiar ve arkadaşları tarafından sentezlenen Polidimetilsiloksan/Bizmut oksit ($PDMS/Bi_2O_3$) nano kompozitlerin X-ışını zırhlama özellikleri araştırılmış ve PDMS matrisine %44,4 oranında nano Bi_2O_3 katkılandırılması halinde üretilen kompozitin 3,73 mm bir kalınlıkta X-ışınlarını etkin biçimde zırhladığı gösterilmiştir [2]. Diğer taraftan, iyonlaştırıcı radyasyonu zırhlama performanslarını araştırmak için Belgin ve arkadaşları hematit kompozitler ile zenginleştirilmiş bir izoftalik polyester geliştirmişlerdir. Ağırlıkça %50 oranında hematit içeren numunenin 662 keV enerjili fotonlara karşı en iyi foton soğurma performansını gösterdiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca, ağırlıkça oldukça hafif olan bu kompozitin, kütle azaltma katsayısının 662 keV enerjili fotonlar için 0,098' e ulaştığı ve bu değer saf kurşunun bu enerjideki $0,1 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ değerine çok yakın olduğu rapor edilmiştir [3]. Bu çalışmalara ek olarak, Mann ve arkadaşları 10-1400 keV foton enerji aralığında bazı polimerlerin radyasyon zırhlama özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Polivinil klorür (PVC) polimerinin 10-110 keV foton enerji aralığında en iyi gama azaltmasına sahip polimerlerden biri olduğunu sonucuna varmışlardır [4]. Afhsar ve arkadaşları ise, tungsten (W), molibden disülfür (MoS_2) ve bor karbür parçacıkları ile güçlendirilmiş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kompozitlerin radyasyon zırhlama kabiliyetlerini incelemişlerdir. %45 tungsten katkılı esnek kompozitlerin, ağır sert kurşun plaka ile karşılaştırıldığında X-ışınına karşı önemli bir zırhlama potansiyeline sahip olduğunu göstermişlerdir [5]. Çok yakın zamanda, Cao ve arkadaşları radyasyon

zırhlayıcı olarak Polimetil metakrilat/Bizmut oksit (PMMA/Bi₂O₃) kompozitlerini hazırlamışlar ve örneklerin deneysel olarak radyasyon perdeleme parametreleri ile mekanik dayanım özelliklerini tespit etmişlerdir. Deney sonuçları, Bi₂O₃'ün ağırlıkça %44 oranında kullanılmasının, saf PMMA'nın kütle zayıflama katsayısını 88 keV ve 122 keV enerjili fotonlar için keskin bir şekilde artırırken; mekanik dayanımını da kayda değer şekilde iyileştirdiğini göstermiştir [6].

Radyasyon zırhlayıcılarla ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı da zırhlama kabiliyetinin, matrise yapılan katkı malzemesine ait parçacık boyutu değerleriyle olan ilişkisini kapsamaktadır. Katkı maddesinin parçacık boyutu nano metre mertebesinde olması halinde örneklerin zırhlama kabiliyetinin iyileştiği rapor eden çalışmalar olduğu bilinmektedir. Örneğin, Afkham ve arkadaşları silikon matris içerisinde nano Fe₃O₄ ve nano B₄C tabakaları sentezlemiş ve nötron zırhlama kabiliyetlerini test etmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre nano Fe₃O₄ katkısıyla 1 MeV civarındaki enerjilerde B₄C'ye göre daha olumlu sonuçlar alınmıştır [7]. 2014 yılında ise Kim ve arkadaşları eriyik karıştırma metoduyla Polietilen/nano tungsten kompozitleri hazırlamışlar ve deneysel olarak 0,3-1,2 MeV foton enerji aralığında radyasyon zırhlama ölçümleri yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda nano boyutlu katkıların zırhlama açısından olumlu etkilerinin olduğu belirtilmiştir. Ancak bu olumlu etkinin yapılacak katkı oranıyla ve radyasyon enerjisiyle değişimler gösterebileceği de bildirilmiştir [8]. Bir diğer zırhlama çalışmasında Botelho ve arkadaşları balmumuna %5 oranında mikro ve nano boyutlarda CuO katkılantırmış ve X ışını için örneklerin zırhlama kabiliyetlerini kıyaslamışlardır. Çalışma sonuçları 60 ve 120 kV potansiyel farkı altında üretilen X-ışınları için mikro ve nano boyutlu CuO kullanılan kompozitlerin benzer performans sergilediğini göstermiştir. Ancak bulgular 30 ve 36 kV potansiyel farkı altında üretilen daha düşük enerjili X-ışınlarına karşı nano CuO katkılı kompozitlerin mikro CuO katkılı kompozitlere kıyasla daha iyi bir zırhlama performansına sahip olduğunu göstermiştir [9].

Polimer matrisli zırhlayıcılar içerisinde epoksi kompozitlerin de sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Termoset polimerler arasında epoksi, kolay hazırlama süreci ve düşük üretim maliyeti gibi özellikleri ile radyasyon zırhlama için yeni

nesil malzeme arayışında ön plana çıkmaktadır. Epoksiyi radyasyon zırhlama çalışmalarında özel kılan bir diğer özellik ise geleneksel radyasyon zırhlayıcı malzemelere göre daha hafif olması ve iyi nötron zırhlaması yapabilmesidir. Bu kritik özellikleri nedeniyle, iyonlaştırıcı radyasyon zırhlayıcılar üzerine yapılan deneysel ve teorik araştırmalar, epoksi temelli mikro ve nano yapıli kompozitler üzerine yoğunlaşmaya başlamıştır. 2013 yılında Turgut ve arkadaşları, Epoksi-Ferrokromyum (FeCr) kompozitlerinin nötron, X ve gama radyasyonuna karşı zırhlama kabiliyetlerini Fluka Monte Carlo ile simüle etmişler ve epoksiye ağırlıkça %50 oranında FeCr katkılandırıldığında, üç radyasyon türü için de zırhlama kabiliyetinde önemli bir iyileşme sağlandığını bildirmişlerdir [10]. Aynı yıl, Noor Azman ve arkadaşları, Epoksi/Tungsten oksit (WO_3) mikro ve nano yapıli kompozitlerin X ışını geçirgenlik özelliklerini araştırmışlar ve benzer katkıli nano kompozitlerin, mikro kompozitler ile karşılaştırıldığında düşük enerjili X-ışınları için daha iyi radyasyon zırhlama kapasitesi sergilediğini göstermişlerdir [11]. 2015 yılında Chang ve arkadaşları ise Epoksi/Tungsten mikro yapıli kompozitlerin Co-60 kaynağından yayılan 1173 ve 1332 keV enerjili radyasyona karşı zırhlama kabiliyetlerini karakterize etmişlerdir. Çalışmada, düzenli bir tungsten katkı oranı artışı ile epoksinin radyasyon zırhlama özelliğinin kademeli olarak arttığı gözlenmiştir [12]. Öte yandan, Li ve arkadaşları epoksi matrisin radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirmek için mikro ve nano boyutlu gadolinyum oksit (Gd_2O_3) parçacıklarıyla epoksiyi katkılandırmayı denemişlerdir. Nano Gd_2O_3 parçacıkları içeren epoksi kompozitlerin, düşük enerjili gama ışınlarına karşı umut verici bir radyasyon zırhlama potansiyeline sahip olduğu çalışma sonucunda raporlanmıştır [13]. 2017 yılında yapılan bir başka çalışmada da, 31-662 keV enerji aralığındaki radyasyonlara karşı zırhlama performansını geliştirmek için epoksi matris bazalt lifleri ve erbiyum oksit (Er_2O_3) ile güçlendirilmiştir. Bu çalışma, 31 keV ile 80 keV arasındaki düşük radyasyon enerjileri için Epoksi/Bazalt fiber/ Er_2O_3 kompozitinin bazalt fiberlere göre iyi bir zırhlama performansı gösterdiğini ortaya çıkarmıştır [14]. 2019'da, demir, bizmut, tantal ve tungsten karbür gibi bazı metal tozları ile güçlendirilmiş epoksi kompozitleri üreten Canel ve arkadaşları nötron ve gama ışını zırhlama kabiliyetini belirlemek

için simülasyon kodlarına dayalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma, nötron ve gama soğurması için en iyi zırhlama zelliklerinin Epoksi/Ta kompozitinde elde edildiğini göstermiştir [15].

Bu bilgiler ışığında, son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, araştırmalarda öncelikli motivasyonun, kurşun ve türevlerini içermeyen, evre dostu radyasyon zırhlayıcı alternatiflerin üretimi olduğu görülmektedir. Bunun başarılabilmesi için de kompozitlerde farklı ana matrislerin ve farklı boyutlarda (mikro ve nano) yüksek atom numaralı elementlerin ve bileşiklerin güçlendirici unsur olarak kullanıldığı görülmektedir.

Alternatif radyasyon zırhlayıcılara karşı duyulan ihtiyaç ve arayışın ne denli büyük olduğu, son 30 yılda yapılan araştırma sayılarından da anlaşılabılır. Web of Science verilerine göre, son 30 yılda radyasyon zırhlaması konusunda yapılan çalışmaların sayısı %600 artmıştır. Bu bağlamda, bu doktora tez çalışmasında; ucuz, üretimi kolay ve işlenebilir epoksi matrisi ile kurşuna göre daha az toksik ve en az onun kadar belirli enerjilerde radyasyon zırhlama kabiliyetine sahip bizmut ve tungsten oksit takviyelere odaklanılmıştır. Kullanılan katkı parçacıklarının boyutları mikro metreden nano metreye kadar değiştirilerek radyasyon zırhlamasında parçacık boyutu etkisi incelenmiştir. Araştırmada mikro metre boyutlu parçacık katkılarında hem deneysel hem de MCNP6 simülasyonuna dayalı radyasyon zırhlama verileri kullanılırken; nano metre boyutlu katkılar için sadece deneysel veriler değerlendirilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Nükleer tesis ve sağlık kuruluşlarında gama ışınlarından korunmaya yönelik yeni malzemelerin geliştirilmesiyle ilgili ciddi bir talep olduğu görülmektedir. Hafif, ucuz, toksik olmayan ve etkin zırhlama kabiliyetine sahip bir zırhlayıcı günümüzde ihtiyaç duyulan ideal bir radyasyonu tanımlamaktadır. Polimer kompozitler bu talebi karşılayabilecek önemli bir potansiyele sahiptirler. Talep edilen özelliklerde ve yüksek zırhlama kabiliyetine sahip bir malzeme geliştirmek için hem uygun polimer matrisi hem de yapılacak katkının türünün dikkatli biçimde seçilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında kurşun ve türevlerine alternatif

olarak kullanılabilecek yeni nesil radyasyon zırhlayıcı kompozitlerin sentezine odaklanılmıştır. Sentezlenecek kompozitlerin esas olarak düşük, orta ve yüksek enerjili gama radyasyonlarını zırhlayabilirken ekonomik, hafif ve çevre dostu olması hedeflenmiştir. Ana matris olarak termoset sınıfından epoksi reçinesi tercih edilmiş olup; bu matrise katkı elemanı olarak yüksek atom numarasına sahip elementler içeren Bi_2O_3 ve WO_3 metal oksitleri tercih edilmiştir. Epoksi matrisine yapılan takviyeler farklı parçacık boyutlarında (mikro ve nano) seçilerek parçacık boyutuyla radyasyon zırhlama arasındaki ilişki ayrıca incelenmiştir. Nano boyutlarda katkı kullanılması halinde radyasyon ve zırhlayıcı arasındaki etkileşim yüzey alanının artmasına bağlı olarak daha fazla etkileşme olması sonucu iyi bir zırhlama etkisi görüleceği düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasında katkı malzemesi olarak, ticari olarak temin edilen mikro boyuttaki Bi_2O_3 ve WO_3 metal oksitlerin yanı sıra hem ticari hem de solvotermal/hidrotermal yöntemlerle sentezlenen nano boyuttaki Bi_2O_3 ve WO_3 metal oksitlerin kullanılması planlanmıştır. Nano katkı malzemelerinin ticari temininin yanında sentezlenmesinin amacı parçacık boyutunun sentez sürecinde kontrol edilebilmesiyle ticari olarak elde edilene göre daha küçük boyutta parçacıkların sentezlenebilmesidir. Böylece parçacık boyutunun zırlama üzerine etkisinin incelenmesi için daha fazla verinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, deneysel çalışmalara ek olarak ilgili kompozitlerin radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesinde, Monte Carlo simülasyonu yönteminin kullanılarak deneysel olarak sınırlı olan enerji spektrumunun istenilen değerlerde genişletilmesi planlanmıştır. Monte Carlo simülasyonunun deneysel sonuçlarla uyumlu sonuç vermesi zırhlama çalışmalarında deneysel yöntemin kısıtlarını (numune hazırlama maliyeti, zamanı ve istenilen enerjide radyoaktif kaynak temini gibi) aşma imkânı vermiştir.

1.3 Hipotez

Epoksi matrisine mikro ve nano boyutlarda Bi_2O_3 ve WO_3 metal oksitleri takviye ederek X ve gama ışınlarını zırhlama kabiliyetine sahip, kolay üretilebilir, kullanışlı ve radyasyon çalışmalarında kullanılan konvansiyonel zırhlama

malzemelerine göre toksik olmayan, hafif ve ekonomik bir kompozit sentezlenebileceği bu tezin ana hipotezidir.

Ayrıca takviye elemanı olarak kullanılan metal oksitlerin farklı parçacık boyutu dağılımlarında matrise eklenmesi durumunda parçacık boyutunun azalmasıyla (mikrodan nano boyutlara) iyonize radyasyon-kompozit arasındaki foton etkileşmelerinin artacağı ve daha iyi bir zırhlama etkisi oluşacağı tezin ikinci hipotezidir.



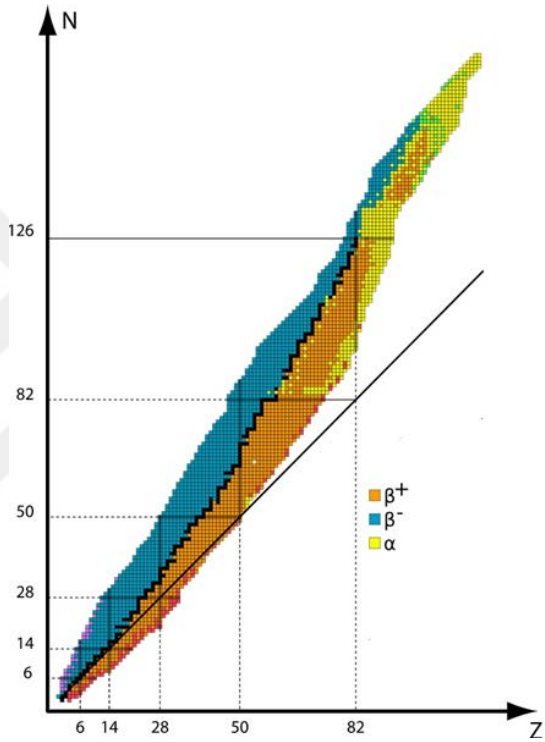
2.1 Radyasyon Kavramı

Radyasyon, uzayda parçacık veya dalga olarak iletilen ve malzemelerden geçerek yayılabilen enerji olarak tanımlanır. Doğrudan insan duyularıyla tespit edilmesi imkânsız olan radyasyon (görünür bölge hariç) görünmezdir. Radyasyon Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında, bir gaz deşarj tüpündeki katot ışınları incelenirken keşfedilmiştir. Günümüze kadar gelen süreçte bilim insanları tıp, endüstri ve enerji gibi çeşitli alanlarda radyasyon uygulamalarını geliştirmeye odaklanmıştır.

Radyasyonu maddede oluşturduğu etkiye göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki kategoride sınıflandırabiliriz. İyonlaştırıcı radyasyon, kozmik ışınları, X-ışınlarını ve radyoaktif maddelerden gelen radyasyonları içerir. Ayrıca, radyasyon elektronlar, pozitronlar, protonlar, alfa parçacıkları, nötronlar, ağır iyonlar ve mezonlar gibi tüm atom ve atom altı parçacıkları da kapsar. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, dalga boyu yaklaşık 10 nm veya daha uzun olan ultraviyole, görünür, radyo dalgaları ve mikrodalga ışınlarıdır.

Radyasyonu anlayabilmek için radyoaktivite kavramının bilinmesi gerekir. Nükleonlarını kalıcı olarak bir arada tutmak için yeterli bağlanma enerjisine sahip çekirdek kararlı bir çekirdek olarak tanımlanır. Doğadaki çekirdeklerin çoğu kararlı durumda bulunur. Öte yandan, kararsız çekirdeklerde ise güçlü nükleer kuvvetler, çekirdeği daimi olarak bir arada tutmaya yetecek kadar bir bağlanma enerjisi üretemez. Bu tip çekirdeklere radyoaktif çekirdekler denir. Bu radyoaktif çekirdeklerin izotoplarına ise radyoizotoplar denir. Bir çekirdeğin kararlılığının en önemli göstergelerinden biri nötron ve proton dengesidir. Kararlı çekirdeklerin büyük bir kısmı eşit sayıda proton ve nötron sayısına sahiptir. Şekil 2.1’de tüm

çekirdekler için proton sayısına karşı nötron numarasının değişimi verilmiştir. Şekil 2.1’de gösterilen siyah renkli doğru kararlılık çizgisi olarak adlandırılır ve bu çizgi hangi çekirdeklerin radyoaktif hangi çekirdeklerin kararlı olduğunu belirlemek için kullanılır. Bazı istisnalar dışında, kararlılık çizgisi üzerinde bulunan herhangi bir çekirdekten kararlı çekirdekler olarak bahsedilir. Şekil 2.1’e göre, proton sayısı 83’ün üzerinde olan ve ayrıca 126’nın üzerinde nötron sayısına sahip tüm çekirdeklerin kararsız olduğu ya da başka bir deyişle bu özelliklere sahip çekirdeklerin radyoaktif olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1 Çekirdeklerin kararlılık çizgisi [16]

Radyoaktif çekirdekler kararsız kalamazlar ve kararlı olmaları için radyasyon yayarak kararlı hale geçmeleri beklenir. Bu sürece ise radyoaktif bozunma denir. Radyoaktif çekirdeklerin kararlı çekirdeğe dönüşmeleri çeşitli radyoaktif bozunmalarla gerçekleşir. Alfa, beta, nötron ve gama bozunmaları bilinen radyoaktif bozunmalardır [17].

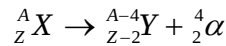
Radyoaktif çekirdekler ve bozunmalar, nükleer fizikteki temel kavramların anlaşılmasına olanak sağlamıştır. Örneğin, alfa ve beta parçacıklarının saçılması, bilim insanlarına atomların daha küçük temel birimlerden oluştuğu fikrini

vermiştir. Bu bağlamda, alfa parçacıklarının saçılması, atom modellerin temelini oluşturan çekirdek fikrinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapay radyoaktivitenin keşfi ise, birçok farklı nükleer reaksiyon sonucunda yüzlerce yapay çekirdeğin üretilmesini mümkün kılmıştır. Radyoaktif çekirdeklerden yayılan radyasyonların araştırılması elektronik enerji seviyelerine benzer nükleer enerji seviyelerinin varlığını ispatlamayı sağlamıştır. Bu seviyelerin tanımlanması ve sınıflandırılmasıyla çekirdeğin yapısı hakkında önemli bilgiler edinilmiştir.

Yukarıda bahsi geçen ve radyoaktif çekirdeklerin gerçekleştirdiği farklı bozunma süreçleri kısaca aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Alfa Bozunması: Alfa parçacıkları (α) pozitif yüklü helyum çekirdekleridir. α bozunması için öncelikle iki proton ve iki nötronun çekirdek içinde birleşmesi ve oluşan pozitif yüklü parçacığın, çekirdek alanındaki Coulomb bariyerini aşması gerekir. Bir çekirdek içinde α parçacığının oluşması çekirdeğin hem nötron hem de proton açısından zengin olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle, α bozunması kurşundan daha ağır çekirdeklerde meydana gelir.

Alfa bozunmasında, ana atom çekirdeği bir alfa parçacığı yayar. Sonuçta ortaya çıkan kız atom çekirdeğin iki tane daha az nötron ve protonu olur. Alfa bozunması reaksiyonu aşağıdaki şekilde temsil edilir:



Burada, X ana çekirdeği ve Y ürün çekirdeğini sembolize etmektedir. Çekirdeğin kütle numarası A , atom numarası, Z ve alfa parçacığı ise α ile ifade edilmektedir. Alfa parçacıkları iyonize radyasyonlardan en az nüfuz edici olanıdır. Enerjisi en yüksek alfa parçacıkları bile hava ortamında sadece birkaç santimetre ilerleyebilirken, canlı dokuda mikro metre mertebesinde ilerleyebilir [18].

Beta Bozunması: Beta parçacıkları, kararsız çekirdeklerden yayınlanan pozitif (β^+) veya negatif (β^-) yüklü elektronlardır. Beta bozunmasında çekirdek bir protonu doğrudan bir nötrona veya bir nötronunu doğrudan bir protona dönüştürerek çekirdeğindeki proton veya nötron fazlalığını düzeltir. Bu süreç üç olası şekilde

gerçekleşebilir. Bunlar β^- bozunumu, β^+ bozunumu ve elektron yakalaması olarak isimlendirilir.

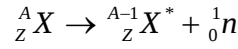
- $n \rightarrow p + e^-$ (Beta- bozunması)
- $p \rightarrow n + e^+$ (Beta+ bozunması)
- $p + e^- \rightarrow n$ (Elektron yakalama)

Çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek nötron bozunuma uğrayacaktır. Bu durumda çekirdekteki nötron, proton, elektron ve antinötrino'ya dönüşür. Bu bozunma türü β^- bozunması olarak adlandırılır. Çekirdeğin kararsızlığı proton fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdekte proton bozunuma uğrayarak bir nötrona, bir pozitrona ve nötrinoya dönüşür. Bu bozunma türü β^+ bozunması olarak adlandırılır. Elektron yakalama olayı beta bozunmasının üçüncü durumudur. Bu bozunmada, proton en yakın atom yörüngesindeki elektronla reaksiyona girerek nötrona dönüşür. Bu olay sonunda bir foton ve bir nötrino salınabilir. Bu süreçte yayınlanan foton X ışını veya gama ışını fotonu olabilir. X-ışını, daha yüksek yörüngelerde bulunan elektronlardan birinin, çekirdek tarafından yakalanan elektron boşluğunu doldurmasıyla yayılır [19].

Beta radyasyonunun girciliği, benzer enerjiye sahip alfa radyasyonuna göre daha fazladır. Bunun sebebi daha hafif ve daha az yüke sahip olmasıdır. Dolayısıyla benzer enerjilerde alfa parçacıklarına göre daha hızlıdır. Ortalama serbest yolları alfa parçacıklarına göre büyük olmasına rağmen beta parçacıkları ince aliminyum levhalarla bile durdurulabilmektedirler [20].

Nötron Bozunması: Nötron radyasyonu serbest bir nötrondan oluşur. Normalde doğal veya yapay nükleer reaksiyonların bir sonucu olarak yayınlanabilir. Nötronun elektrik yükü yoktur ve bir elektrondan 1839 kat daha ağırdır. Nötron radyasyonlarının yarı ömrü yaklaşık 13 dakikadır. Radyoaktif çekirdekler 7–8 MeV'lik bağlanma enerjisinden daha yüksek bir enerjiye sahip oldukları zaman nötron salınımı gerçekleşir. Nötronca zengin çekirdek, aynı ana elementin farklı bir izotopuna bir nötron bozunumu yaparak dönüşebilir. Genel olarak, ürün

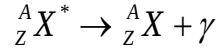
çekirdek, daha sonra temel durumuna dönerken gama fotonları yayan uyarılmış bir durumda bırakılır. Bu bozunma reaksiyonu;



şeklinde gösterilebilir. Burada X nötronca zengin çekirdeği, X* ise uyarılmış durumdaki ürün çekirdeğini temsil eder [21]. Bir nötron havada yüzlerce veya binlerce metre yol alabilir. Bununla birlikte, nötronlar hidrojen bakımından zengin maddelerce durdurulabilir. Dolayısıyla, nötron zırhlayıcı olarak özellikle daha yüksek etkileşme yapma ihtimalini olmasına istinaden hidrojenle zengin malzemeler kullanılır. Örneğin beton, su veya parafin nötron zırhlaması için tercih edilen yaygın malzemelerdendir [22, 23].

Gama Bozunması: Gama radyasyonu veya gama ışınları, atom çekirdeklerinin radyoaktif bozunmasıyla yayılan yüksek enerjili elektromanyetik radyasyonlardır. Gama ışınları manyetik ve elektrik alanında sapmazlar. Genel olarak gama ışınları 10 ekzahertzın üzerinde ($> 10^{19}$ Hz) frekanslara sahiptir. Bu nedenle enerjileri 100 KeV'in üzerinde iken; dalga boyları 10 pikometreden azdır. Bu bakımdan gama radyasyonu, elektromanyetik spektrumda en kısa dalga boyuna ve haliyle en yüksek frekansa sahip çok yüksek enerjili iyonlaştırıcı bir radyasyondur. Bu özelliklerinden ötürü gama ışınları canlı dokulara ciddi oranda zarar verirler. Gama ışınları, oldukça kararsız atom çekirdeklerinin yüksek enerjili hallerinden bozunmaları esnasında üretilirler. Ayrıca, gama radyasyonları doğal olarak oluşan radyoaktif izotoplardan ve kozmik ışın parçacıklarının atmosferik etkileşimlerden üretilen ikincil radyasyonlardan da üretilirler. [19, 24].

Birçok nükleer reaksiyonda, çekirdeği uyarılmış durumda bırakılan bir nüklid üretilir. Bu uyarılmış çekirdekler genellikle 10^{-9} s içinde bir foton yayarak çok hızlı bir şekilde temel durumlarına bozunurlar. Her bir izotoptan yayılan tüm gama ışınları belirli bir enerjiye sahiptir. Bu durum malzemeye özgü karakteristik bir özelliktir. Bir çekirdeğin radyoaktif bozunması sırasında, ürün çekirdeği, temel durumda değil, en düşük enerji seviyesindedir, ancak ürün çekirdeği, temel durumun üzerindeki bir enerjide uyarılır. Bu bozunma reaksiyonu;



şeklinde gösterilebilir. Burada X^* çekirdeği uyarılmış durumdan kararlı duruma bir gama radyasyonu salarak geçer [21].

Gama radyasyonu, diğer iyonlaştırıcı radyasyonlardan farklı olarak büyük bir giricilik potansiyeline sahiptir ve insan vücudundan rahatlıkla geçebilir. Gama ışınları biyolojik dokulara alfa veya beta radyasyonlarına göre çok daha fazla nüfuz eder. Ancak hücre hasarına neden olabilecek dozdan daha düşük oranda iyon oluşturur. Genellikle, yüksek yoğunluklu zırhlayıcılar gama radyasyon şiddetini azaltmak için düşük yoğunluklu alternatiflerden daha etkilidir. Ancak, düşük yoğunluklu malzemeler kullanılarak artan kalınlıkla zırhlama değerleri iyileştirilebilmektedir. Kurşun, yüksek atom numarası nedeniyle gama ışınlarının etkisini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir elementtir. Ayrıca, nötron ve gamaları birlikte durdurabilmek için geleneksel olarak beton veya su zırhlayıcılarda kullanılabilmektedir.

2.2 Radyasyon Madde Etkileşmesi

Radyasyonun maddeyle yapacağı etkileşmeler sahip olduğu enerjiye ve soğurucu ortamın atom yoğunluğuna göre değişmektedir. Radyasyon madde etkileşmesi temelde fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumunu kapsayan üç mekanizmayla açıklanmaktadır. Bunların dışında toplam etkileşme olasılıklarının içerisinde yer alan Rayleigh saçılması olayı da bu mekanizmaya dâhil edilebilmektedir.

Fotoelektrik Olay: Bu olay, madde ortamına giren radyasyonun atomun yörüngesindeki elektronlar ile yaptığı bir etkileşmeyi açıklar. Fotoelektrik olay neticesinde radyasyon, enerjisini yörüngedeki elektrona vererek yok olur ve elektron serbest kalır. Yörüngeden kopan bu elektron, fotoelektron olarak isimlendirilir. Fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için gelen radyasyonun enerjisinin, fotoelektronun bağlanma enerjisinden daha fazla olması gerekir. Fotoelektronun sahip olacağı kinetik enerji;

$$K_e = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

şeklinde formüle edilirken, K_e fotoelektronun sahip olacağı kinetik enerjiyi, $h\nu$ gelen radyasyonun enerjisini ve E_b elektronun bağlanma enerjisini temsil eder. Atomun yörüngesinde oluşan boşluk genellikle daha yüksek enerji seviyelerinden gelen diğer elektronlar tarafından doldurulur ve bu da karakteristik X-ışınlarının veya Auger elektronlarının oluşmasına neden olur. Bir radyasyonun fotoelektrik etkileşmeye girme olasılığı;

$$\tau \cong \text{sabit} \times \frac{Z^5}{E^3} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Z hedef numunenin atom numarası ve E gelen radyasyonun enerjisidir. Denklem (2.2) uyarınca, fotoelektrik olayın özellikle düşük foton enerjilerinde ve yüksek atom numarasına sahip ağır elementler için görülme olasılığı son derece yüksektir. Bu bakımdan bu durumlarda fotoelektrik etkileşmenin madde foton arasında baskın olduğu söylenir.

Compton Saçılması: Compton saçılması, elektromanyetik dalganın bir parçacıkla etkileşimini açıklayan bir diğer önemli olaydır. Bu etkileşim sırasında, yüksek enerjili bir radyasyon, bağlanma enerjisi düşük bir dış kabuk elektronuna çarparak onu yörüngesinden fırlatır. Foton daha sonra elektron tarafından saptırılır ve başlangıçtaki enerjisinin bir kısmıyla saçılma radyasyonu olarak yeni bir yönde ilerler. Dolayısıyla bu saçılma olayı gelen fotonun enerjisinin azalmasına ve dalga boyunun artmasına neden olur. Compton kayması olarak adlandırılan dalga boyundaki değişim;

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

şeklinde formüle edilir. λ ve λ' sırasıyla etkileşmeden önce ve sonra gelen radyasyonun dalgaboylarını temsil etmektedir. m_0 elektronun durgun kütlesi, θ radyasyonun saçılma açısı, c ışık hızı, h ise Planck sabitidir. $h/m_0 c$ terimi ise

Compton dalga boyu olarak isimlendirilen bir sabittir ve sayısal karşılığı $2,4264 \times 10^{-10}$ cm'dir [25].

Compton etkileşimi sonucu saçılan elektronlar sıfırdan bir maksimum değere kadar olan aralıktaki enerjilere sahip olabilirler. 180° lik saçılma açısında elektrona maksimum değerde enerji aktarılır. Compton saçılmasının gerçekleşme ihtimali Compton saçılma katsayısı veya Compton tesir kesiti olarak adlandırılır. Compton tesir kesiti σ ;

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_s \quad (2.4)$$

ile ifade edilir. Denklem (2.4)'deki ifadeler sırasıyla; toplam Compton saçılma katsayısı σ , elektronlarla çarpışmalar sebebiyle kaybedilmiş radyasyon enerjisi için Compton soğurma katsayısı σ_a ve radyasyon demetinden dışarı saçılmadan dolayı enerji kaybına karşılık gelen saçılma katsayısıdır σ_s . Compton etkileşme olasılığı yine fotoelektrik olayda olduğu gibi gelen foton enerjisi ve zırhlayıcının atom numarası ile Denklem (2.5)'de belirtildiği şekilde ilişkilidir [25,26]:

$$\sigma \cong \text{sabit} \times \frac{Z}{E} \quad (2.5)$$

Compton saçılma olayının oluşma olasılığı gelen radyasyon enerjisindeki artışla yavaş yavaş azalırken gram başına elektron sayısı ile doğru orantılıdır. Bu etkileşme tüm elementler için belirli bir foton enerjisi aralığında baskındır.

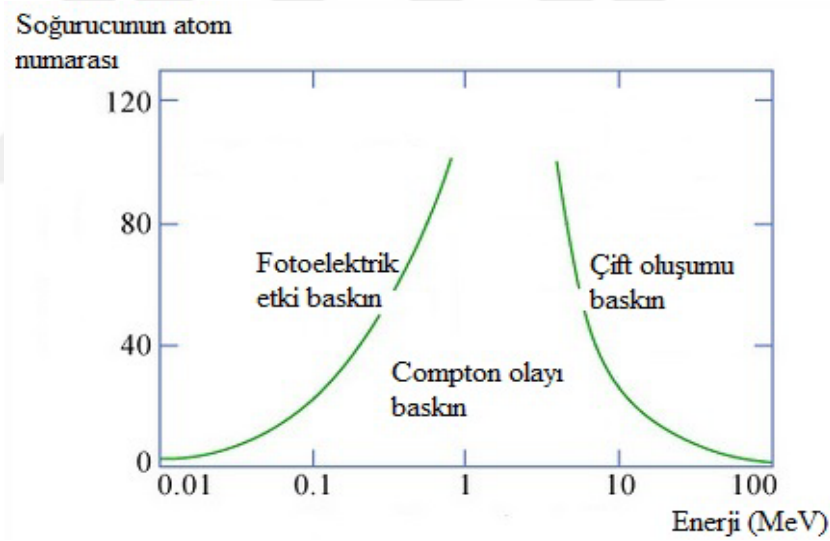
Çift Oluşumu: Çift oluşumu, maddedeyle radyasyon arasında gerçekleşen üçüncü etkileşim sürecidir. Bu etkileşim, atomun çekirdeğe yakın olan bölgesinde sahip olduğu yüksek elektrik alanı nedeniyle oluşur. Çift oluşumu çekirdeğin Coulomb alanında meydana gelir ve gama ışınının bir elektron-pozitron çiftine dönüştürülmesiyle sonuçlanır. Bu etkileşmenin gerçekleşebilmesi için gama ışını en azından toplamda 1022 keV'luk enerjiye sahip olmalıdır. Çünkü elektron ve pozitron toplam serbest kütlelerine eşdeğer enerji bu değerdedir. Bu nedenle, herhangi bir fotonun bu etkileşmeye girmesi için minimum 1022 keV enerji taşıması gerekir. Söz konusu bu eşik enerjinin üzerinde enerjiye sahip fotonun fazla enerjisi elektron-pozitron çifti tarafından eşit olarak paylaşılarak kinetik

enerjiye aktarılır. Bu süreç, enerjinin kütleye dönüşmesini açıklayan en iyi örnektir.

Genelde çift oluşumu sadece yüksek enerjili fotonlar için önemli olup, özellikle enerjisi 5 MeV ve üzerinde olan fotonlar için baskın bir madde-foton etkileşim mekanizmasıdır. Çift oluşumunun gerçekleşme olasılığı, çift oluşumu katsayısı (κ) ile belirlenir. Bu katsayı, enerjisi 1,022 MeV'den büyük olan radyasyonlar için Denklem (2.6)'dan da görüleceği üzere, atom numarasının karesi ile doğru orantılıdır:

$$\kappa \cong \text{sabit} \times Z^2 (E - 1,022) \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da E fotonun MeV cinsinden enerjisini temsil eder [25,26]. Dolayısıyla, çift oluşumu yüksek radyasyon enerjilerinde ağır elementler için baskın bir etkileşim sürecidir.



Şekil 2.2 Temel madde-gama radyasyonu etkileşimlerinin baskınlık bölgeleri [26]

Gelen radyasyonun enerjisine ve etkileşime girilen atomun atom numarasına bağlı olarak ortaya çıkabilecek madde-foton etkileşimlerinin baskın oldukları bölgeler Şekil 2.2' de gösterildiği gibidir [26, 27]. Radyasyon madde etkileşmelerinin baskınlık grafiği incelendiğinde; düşük enerjilerde fotoelektrik olay, orta enerjilerde Compton saçılması ve yüksek enerjilerde ise çift oluşumunun baskın olduğu görülmektedir. Ayrıca Compton saçılmasının baskın olduğu bölge,

soğurucunun düşük atom numaralı değerlerinde genişken soğurucunun atom numarası arttıkça kademeli olarak daralmaktadır.

Rayleigh Saçılması: Rayleigh saçılması, radyasyonun madde ortamında elastik çarpışması esnasında ortaya çıkan bir etkileşim çeşididir. Eğer gelen radyasyonun enerjisi, madde ortamındaki elektronları yörüngesinden koparamayacak seviyedeyse Rayleigh saçılması gerçekleşir. Rayleigh saçılmasında herhangi bir enerji kaybı oluşmaz ve madde ortamına giren radyasyon ile çıkan radyasyonun dalga boyları ve dolayısıyla enerjileri aynı olur. Ancak radyasyonun ilerleyişinin doğrultusunda değişim gerçekleşebilir. Genelde gelen radyasyon küçük bir açı farklılığıyla yön değiştirir ve ilerlemeye devam eder. Bu saçılmaların doz hesaplamalarına bir katkısı yoktur, çünkü bu süreçte herhangi bir yüklü parçacığa enerji aktarımı iyonlaşma veya uyarılma gibi etkileşimler söz konusu değildir. Rayleigh saçılma açısı zırhlayıcının atom numarasına ve gelen radyasyonun enerjisine bağlıdır. Rayleigh saçılma katsayısı;

$$\sigma_R \cong \frac{Z^2}{(hv)^2} \quad (2.7)$$

formülü ile ifade edilir [26,28]. Yüksek atom numaralı malzemelerde bu saçılma 150-200 keV enerjilerine kadar gözlemlenebilir. Bununla birlikte, canlı doku gibi düşük atom numaralı ortamlarda Rayleigh saçılmasının gerçekleştiği enerji aralığı oldukça düşük olmaktadır. Bu bakımdan, yüksek enerjili fotonlarla düşük atom numaralı atomların etkileşimlerinde, Rayleigh saçılması Compton saçılmasının yanında ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bu yüzden bu gibi durumlarda Rayleigh saçılmasının toplam etkileşmeye katkısı ihmal edilebilir mertebede olur.

2.3 Radyasyonun Olumsuz Etkileri

Radyasyonun biyolojik etkileri üzerine ilk çalışmalar 1906 yılında iki Fransız fizyolog tarafından çeşitli doku ve organların radyasyona duyarlılığı konusunda yapılarak başlamıştır. Bu çalışma ile hücrelerin radyasyona duyarlılığının üreme aktiviteleriyle doğru orantılı olduğu ve farklılaşma dereceleriyle ters orantılı olduğu bildirilmiştir. Bu gözlem halen geçerliliğini korumaktadır ve radyasyonun

kanser tedavisindeki temellerinden biridir. O zamandan beri bilim insanları, tıbbi personel, uranyum madencileri, atom enerjisi çalışanları ve endüstriyel radyograflar dâhil olmak üzere pek çok meslek grubu için radyasyon maruziyetine ilişkin çok sayıda gözlem gerçekleştirilmiş ve radyasyonun biyolojik etkileri üzerine muazzam bir veri tabanı oluşturulmuştur. Tanı ve tedavi amaçlı radyasyona maruz kalan hastalar ise bu anlamda ikinci bir bilgi kaynağını oluşturmaktadır. Halen radyasyon veri tabanına bilgi sağlayan en büyük nüfus grubu, Japonya'daki nükleer bombalamalardan sonra hayatta kalan nüfustur. Bu nüfus grubu, bombalama sırasındaki konumlarına bağlı olarak çok çeşitli dozlarda radyasyon maruziyetli yaşamış olan yaklaşık 280.000 kişiden oluşmaktadır [18].

Bu geniş bilgi havuzuna rağmen radyasyonun biyolojik etkilerinin incelenmesi, iki ana nedenden dolayı çok karmaşık ve zor bir iştir. İlk olarak insan vücudu, farklı boyutlarda, işlevlerde ve hassasiyetlerde birçok organa sahip çok karmaşık bir yapıdır. Bununla birlikte, ilgili deneyleri insanlara pratik olarak uygulamak imkânsızdır. Dolayısıyla radyasyonun biyolojik etkilerine ilişkin mevcut insan verileri, kazalardan ve hayvan çalışmalarından ekstrapolasyon ve in vitro deneyler yoluyla elde edilmektedir [22]. İyonlaştırıcı radyasyonun insanlar üzerindeki etkileri genel olarak iki kategoride açıklanabilir: Deterministik ve stokastik etkiler.

Deterministik Etkiler: Genellikle yüksek dozda radyasyona maruz kalındıktan hemen sonra gözlemlenen etkilerdir. Doğaları gereği deterministik etkiler ancak gerçekleştiklerinde gözlemlenebilirler ve ölümle sonuçlanabilirler. Bu etkilerin başlıca belirleyici özellikleri şunlardır:

- Etkilerin gözlenip gözlenemeyeceğini belirleyen bir doz eşiği vardır.
- Bu eşiğin üzerinde gerçekleşen dozlarda, etkinin büyüklüğü alınan dozla birlikte artar.
- Etki kesin olarak radyasyona maruz kalma ile ilişkilidir.

Bu etkilerin örnekleri şunlardır:

- Eritem (ciltte kızarıklık)
- Epilasyon (saç dökülmesi)

- Kemik iliği hücre bölünmesinin çökmesi
- Mide bulantısı, kusma, ishal (Maruz kalındıktan sonraki erken dönemde)
- Merkezi sinir sistemi hasarı
- Doğmamış çocukta hasar (fiziksel bozukluklar, mikrosefali, zekâ geriliği) [29].

Ortaya çıkan bazı deterministik etkilerin ardından uygun ortam şartları bulunuyorsa dokunun veya organın tamiri mümkün olabilir.

Stokastik Etki: Stokastik etkiler, adından da anlaşılacağı gibi olasılıksal olan etkilerdir. Maruz kalan herhangi bir kişide meydana gelebilir ya da gelmeyebilir. Bu etkiler genellikle radyasyona maruz kaldıktan yıllar sonra hatta on yıllar sonra ortaya çıkar. Stokastik etkilerin temel özellikleri şunlardır;

- Bir eşik gözlenemeyebilir.
- Etki olasılığı dozla artar.
- Etkiyi kesin olarak radyasyona maruz kalma ile ilişkilendirmek mümkün değildir.

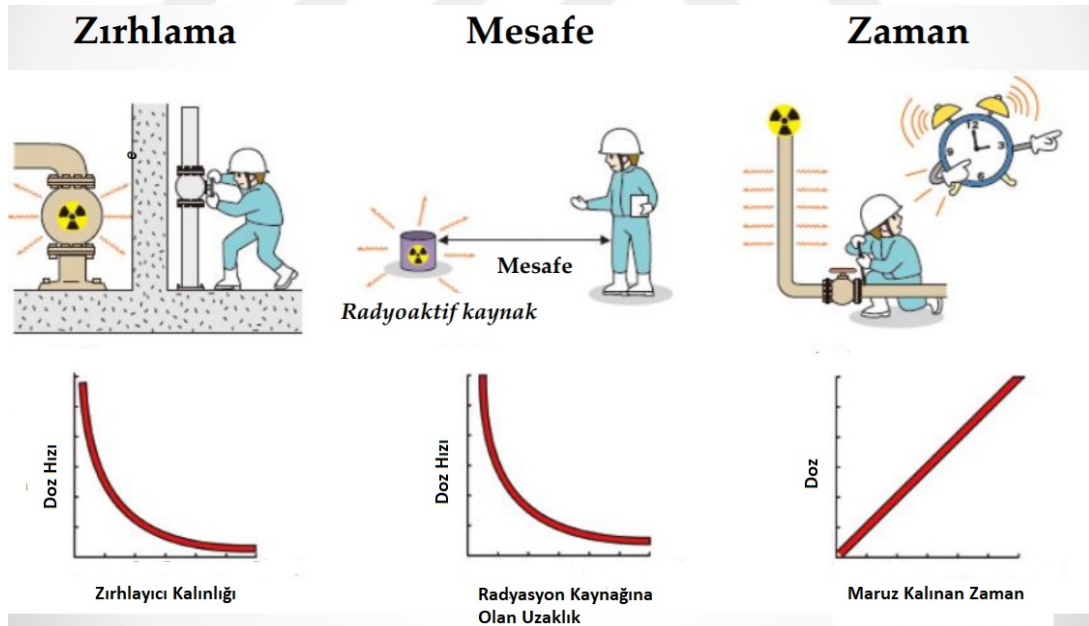
Bu etkilerin örnekleri arasında kanser indüksiyonu ve genetik etkiler yer alır [29].

2.4 Radyasyondan Korunma (ALARA)

Radyasyondan korunmanın temel amacı nüfus etmesi durumunda biyolojik sistemlerde yaratacağı olumsuz sonuçları engellemek veya en az seviyeye düşürmektir. Bu amaca yönelik olarak, iyonlaştırıcı radyasyona maruziyeti azaltmak için “ALARA” prensibi hayata geçirilmiştir. ALARA (As Low As Reasonably Achievable), İngilizce makul olarak gerçekleştirilebilecek ölçüde düşük ifadesinin baş harflarından türetilmiş bir kısaltmadır. Esasında, ALARA radyasyondan korunma için optimizasyonu temsil etmektedir [30].

Radyasyondan korunmada belirlenen önlemler Şekil 2.3’de gösterildiği gibi zaman, mesafe ve zırhlama olarak üç ana unsura dayanmaktadırlar. Zaman kuralında radyasyon maruziyet süresi en az seviyeye düşürülerek alınan dozun azaltılması hedeflenir. Mesafe unsuru, herhangi bir radyoaktif kaynaktan biyolojik

sisteme nüfus edecek doz oranını azaltmak için kaynaktan olabildiğince uzak kalınmasına dayanır. Radyoaktif kaynağa olan uzaklık arttıkça maruz kalınan radyasyon miktarı da azalır. Üçüncü radyasyondan korunma şekli ise radyoaktif kaynak ile biyolojik sistem arasına koruyucu maddeler yani zırhlayıcılar, konularak radyasyon şiddetinin azaltılmasını kapsar. Radyasyonun zararlı etkilerini bertaraf etmek için radyasyonun yakınında bulunma süresi minimuma ve radyoaktif kaynağa olan mesafe maksimum seviyeye getirilse bile, radyasyondan etkilenmemek imkânsızdır. Bunun için özellikle nükleer tesislerde ve tıp merkezilerindeki personelin sağlığını korumak adına radyasyonla geçirdikleri süre dikkate alınarak zırhlama materyallerinin (önlükler, gözlükler, siperlikler vb) kullanımı en etkili yöntem olarak belirir. Özellikle, kullanılacak zırhlayıcı materyal sayesinde radyoaktif kaynaktan yayınlanan giriciliği yüksek ışınların zırhlayıcı materyaldeki atomlarla etkileşime girmesi ve enerjisinin tamamını veya bir kısmını kaybetmesi sonucunda doz miktarının zararsız seviyeye gelmesi sağlanır [31, 32].



Şekil 2.3 ALARA prensibinin genel gösterimi [33]

Zırhlama uygulamaları iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki, radyasyon kaynağının etkin zırhlama özelliği olan zırhlayıcı materyallerle çevrelenmesi iken; ikincisi, kaynakla biyolojik sistem arasında koruyucu yapılar ve ekipmanların

kullanımıdır. Zırhlayıcı materyal kalınlığı arttırıldıkça radyasyon şiddetinde azalmalar meydana gelmektedir. Daha güvenli bir çalışma ortamı tesis etmek toplum sağlığı ile ilgili hukuki zorunlulukları yerine getirmek için nükleer tesislerde, tıpta teşhis ve tedaviye yönelik uygulamaların yapıldığı merkezlerde, radyoizotop projelerinde, parçacık hızlandırıcı çalışmalarında ve diğer birçok alanda yaygın olarak radyasyon zırhlaması yapılmaktadır. Ayrıca, nükleer santrallerde, reaktör kabına gelen radyasyon demetlerinin şiddetini düşürmek için de zırhlama yapılmaktadır. Gama demetinin soğurulmasıyla ortaya çıkabilecek aşırı ısınma sorununu aşmak için termal zırhlama yapılmaktadır. Bunların dışında savunma teknolojilerinin hassas elektronik sistemlerini koruyan farklı özellikte zırhlayıcılar da üretilmektedir [34–36].

2.5 Radyasyon Zırhlama Parametreleri

Radyasyon zırhlaması için kullanılacak malzemeler homojen yoğunluğa ve içeriğe sahip olmalıdır. Bunun yanında radyasyon zırhlayıcı malzemelerin radyasyon dozunu güvenli bir seviyeye düşürmek için yeterli bir kalınlıkta üretilmesi gerekmektedir. Bir malzemenin radyasyon zırhlama kabiliyetini belirlemek ve bilinen başka malzemelerle kıyaslayabilmek için; lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı (HVL) ve onda bir değer kalınlığı (TVL) gibi parametrelerin bilinmesi gereklidir.

Azaltma katsayıları: Radyasyon bir madde ortamından geçerken önceki bölümlerde belirtilen olası madde-foton etkileşmelerini yaparak şiddetini azaltır. Deneysel veriler ışığı altında, madde-foton etkileşimlerine bağlı olarak, gelen radyasyon şiddetindeki düşüşün eksponansiyel olduğu bilinmektedir. Başlangıç şiddeti I_0 olan monoenerjik fotonlardan müteşekkil bir ışın demetinin, dx kalınlığındaki bir zırhlayıcıdan geçerken şiddetindeki değişim dI kadar olmaktadır. Ayrıca radyasyon şiddetindeki azalmanın, fotonun etkileşerek ilerlediği zırhlayıcının kalınlığıyla doğru orantılı olduğu hesaba katılırsa şiddetin mesafeyle azalışı Denklem (2.8)'deki gibi olur:

$$-\frac{dI}{dx} = \mu I_0 \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de μ belirli bir radyasyon enerjisi için zırhlayıcı malzemenin toplam lineer azaltma katsayısıdır. Zırhlayıcı ortamda birim uzunluk başına etkileşme ihtimalini ifade eder. Lineer azaltma katsayısının birimi cm^{-1} dir. Denklem (2.8)'nin sonlu bir x kalınlığı için integrali alındığında, dar bir foton demetinin x kalınlığındaki bir zırhlayıcıdan geçerken radyasyon şiddetindeki değişim Denklem (2.9)'daki gibi elde edilir:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) "Beer-Lambert Yasası" olarak bilinir. Burada I_0 gelen demetin şiddeti, $I(x)$ soğurucu ortamın x kalınlığını geçen radyasyon şiddetidir. Radyasyon etkileşme parametresi olarak kullanılan lineer azaltma katsayısı, soğurucu ortamın fazından bağımsızdır. Soğurucu ortamın kütle yoğunluğuna (ρ) bağlı olarak ise kütle azaltma katsayısı μ_m parametresi tanımlanır [25, 26]. Kütle azaltma katsayısı, bir zırh malzemesinin monoenerjik bir fotonla birim hacim başına toplam etkileşim olasılığını temsil etmektedir. Lineer azaltma katsayısının malzemenin yoğunluğuna oranı kütle azaltma katsayısını vermektedir ve bu katsayının birimi cm^2/g 'dir.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.10)$$

Ortalama serbest yol: Radyasyon-madde etkileşimi sırasında madde içinde ilerleyen radyasyonların peş peşe meydana gelen iki etkileşimi arasındaki ortalama mesafe ortalama serbest yol olarak bilinir. Birimi cm olan ortalama serbest yol parametresi;

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (2.11)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

HVL ve TVL: Madde ortamında etkileşen tek enerjili radyasyonun malzemeye girmeden önce sahip olduğu başlangıç şiddetini (I_0) yarıya düşürmek ($I = I_0/2$) için gerekli malzeme kalınlığına yarı değer kalınlığı (HVL) denir. HVL, bir malzemeye gelen fotonların şiddetinin yarısına düştüğü kalınlığı tarif etmesi nedeniyle, bir malzemenin radyasyon zırhlama performansı değerlendirilirken kullanılan önemli bir parametredir. Herhangi bir zırhlayıcının tek enerjili radyasyon demeti için yarı-değer kalınlığı;

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.12)$$

formülüyle hesaplanır.

Benzer biçimde zırhlayıcıdan geçen radyasyon şiddetini başlangıçtaki radyasyon şiddetinin onda birine düşüren kalınlık ise onda bir değer kalınlığı (TVL) olarak isimlendirilir. Bu parametre ise;

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (2.13)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

2.6 Monte Carlo Yöntemi

Radyasyonun bir malzemeden geçişi ve madde-foton etkileşim simülasyonları için Monte Carlo (MC) yöntemi ilk olarak 1940'larda Manhattan projesi çalışmaları yapılırken John Von Neumann, Stanislaw Ulam ve Nicholas Metropolis tarafından Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda kullanılmıştır. Bu yöntem adını Ulam'ın amcasının kumar oynadığı ünlü Monte Carlo kumarhanesinden almıştır. Simülasyona bu isim, istatistiksel simülasyonların şans oyunlarına benzerliğine itafen verilmiştir. Benzer bir fikir, Enrico Fermi tarafından Manhattan projesinden yaklaşık 15 yıl önce, yani 1930'larda çeşitli hesaplamalarda da kullanılmıştır. Fermi ve Richtmyer tarafından 1948'de hazırlanmış bir raporda ise, ilk kez Fermiac adlı mekanik bir MC hesaplama cihazı kullanılarak gerçekleştirilen nötron difüzyonu hesaplarından bahsedilmektedir [37, 38]. Daha sonra Ulam, Neumann

ve Metropolis, MC simülasyonlarının otomasyonunda bilgisayarların potansiyel kullanımını fark etti. Bu gelişmelerin ardından MC yöntemleri; finans (borsa tahminleri), siyaset bilimi (anket tahminleri), ulaşım (trafik yönetimi), genetik, nükleer fizik ve medikal fizik gibi birçok farklı uygulama alanında kullanılmaya başlamıştır. Özellikle tıpta MC simülasyon teknikleri 1970-1980'lerde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak o yıllarda bilgisayarların düşük bilgi işleme hızına ve MC kodlarının basitliğine bağlı olarak yalnızca homojen su fantomunu ıslanlayan noktasal radyoaktif kaynakları ele alan basit radyasyon geometrileri modellenebiliyordu. Günümüzde Monte Carlo teknikleri belirli bir sinyal türü üreten pek çok farklı fiziksel süreci simüle etmek için kullanılmaktadır. Örneğin, bir detektör içindeki nötron etkileşimlerini ve bir sintilasyon detektöründe gama radyasyonları tarafından üretilen fiziksel bir süreci simüle etmek, detektörün belirli bir radyasyon türüne tepkisini tahmin etmek, deneylerin sonucunu ve fizibilitesini tahmin etmek Monte Carlo ile yapılabilen çalışmalardan sadece bir kaçıdır.

Fizikte ve bazı mühendislik alanlarında, MC yöntemi iki adımda kullanılır.

Fiziksel sürecin simülasyonu: Bu, belirli özelliklere ve belirli bir fiziğe sahip olaylar oluşturan algoritmalarla (olay oluşturunucular olarak adlandırılır) gerçekleştirilir. Bu iki şekilde olabilir;

- Parametrik: Hızlı yanıt alınması amacı ile sadeleştirilmiş süreçtir. Sürecin tüm fiziği dikkate alınarak değil, sadece diğer deneylerden elde edilen veriler dikkate alınarak simüle edilmiş bir fiziksel süreçtir.
- Bütün: Sürecin üretilen parçacıkların enerjisi, boyutları, yönleri, türleri, v.b. tüm fiziksel parametreleri tanımlanarak gerçekleştirilen fiziksel süreç simülasyonudur.

Dedektör simülasyonu: Dedektör simülasyonu üç ana unsur dikkate alınarak gerçekleştirilir;

- Geometri: Dedektörün geometrisi olabildiğince kesin bir şekilde tanımlanmalıdır.

- Vuruş simülasyonu: Dedektörün yanıtının simüle edilmesini ifade eder. Bu esnada varsa sınır koşullarının tanımı yapılır.
- Sayısallaştırma: Çözünürlüklerin ve verimliliklerin tanımını ifade eder [39].

MC simülasyonu sayesinde, bir deneyin hassasiyetinin deney yapılmadan tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Bu ise ilgili deneysel sistemin finanse edilmeye değer olup olmadığını tespitini imkânlı kıldığı için son derece kıymetlidir. Zira nükleer fizik ve yüksek enerji fiziği alanlarında yapılan bu tür deneysel çalışmaların maliyetleri göz önüne alındığında, MC simülasyonunun değeri daha da iyi anlaşılmaktadır [40, 41]. Çeşitli alanlarda kullanılmak üzere çeşitli MC kodları geliştirilmiştir. MC kodlarından bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Electron Gamma Shower 4 (EGS4) [42]
- Macro Monte Carlo (MMC) Code [43]
- Electron Gamma Shower National Research Council, Canada (EGSnrc) Code [44]
- Penetration and Energy Loss of Positrons and Electrons (PENELOPE) Code [45]
- GEANT4 Code [46]
- Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP) Code [47]

Günümüzde kapsam ve güvenilirlik açısından en gelişmiş kodlar GEANT4 ve MCNP' dir. Bu tez çalışmasında, çeşitli mikro ve nano boyutlu parçacıklarla kuvvetlendirilmiş epoksi temelli kompozit malzemelerin foton etkileşim parametrelerinin tayini öncelikle deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Hem deney sonuç hassasiyetlerinin kontrolü hem de deneysel olarak çalışılmamış bazı foton enerjilerinde malzemelerin radyasyon zırlama parametrelerinin tayininde MCNP6.2 simülasyon paketi kullanılmıştır.

2.6.1 MCNP Similasyon Kodu

MCNP, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından özellikle nötron, foton, elektron veya birleşik nötron / foton / elektron taşınması [48, 49] için geliştirilmiş genel amaçlı bir simülasyon kodudur. Kod, sanal parçacıkları yok olana kadar izler. Bir parçacık, ömrü boyunca çok farklı etkileşimlere ve olaylara maruz kalabilir. MCNP sanal parçacık ile içinden geçtiği malzeme arasındaki fiziksel etkileşimin sonucunu belirlemek için kullanılır. Örnek olarak bir nötron düşünülecek olunursa, madde ortamında nötron ilerlerken her bir çekirdekle etkileşime girebilir. Simülasyonda nötronun hangi çekirdekle etkileşime girdiğini örneklemek için rastgele bir sayı kullanılır. Benzer şekilde, diğer bir rastgele sayı da bu nötronları çekirdekler arasında geçecek etkileşimle ikincil parçacıkların yayılma yönünü ve enerjisini belirlemek için kullanılır. Parçacıklar, ağırlıkları sıfıra ulaşana kadar kod tarafından izlenir ve bu noktada parçacık kod tarafından sonlandırılır.

MCNP'nin başlangıç sürümlerinde, nötron ve fotonların hareket analizi hedeflenmiştir. MCNP'nin sonraki sürümlerinde ise elektron da bu havuza dâhil edilmiştir. MCNP tüm hesaplama süreçlerinde tesir kesiti kütüphanelerini kullanır. Nötronlar için tüm reaksiyonların göz önüne alındığı ENDF/B-VI verileri esas alınırken; fotonlar için bütün radyasyon madde etkileşimleri (koherent saçılma, floresans üretimi, fotoelektrik soğurulma, çift üretiminde soğurulma, bremsstrahlung gibi) göz önünde bulundurulur. Bu anlamda MCNP simülasyonu fizikçilerin milyonlarca stokastik etkileşimi simüle etmesine ve olası sonuca ulaşmalarına olanak tanır. 2018 yılında, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı MCNP programının en güncel versiyonunu olan MCNP 6.2'yi kullanıma sunmuştur.

MCNP6'nın sahip olduğu özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Windows, Linux, MAC, Unix v.b. yaygın olarak kullanılan tüm işletim sistemlerinde çalıştırılabilir.
- Genel kaynak, kritik kaynak, yüzey kaynağı v.b. farklı kaynakların tanımlanmasına olanak sağlar.

- Belirlenen bir problemin tasarımı görsel olarak görüntülenebilir.
- Çalışılan detektörlerden elde edilen sonuçlar grafik olarak alınabilir.
- Varyans azaltma konusunda oldukça fazla seçenek sunar.
- Farklı ve zengin tally (dedektör) yapısı kullanımını destekler.
- Güncel ve oldukça geniş bir tesir kesiti kütüphanesine sahiptir [50].

MCNP'nin temeli, üzerinde çalışılacak problemle ilgili tüm özellikleri ve bilgileri içeren kullanıcı tanımlı bir girdi dosyasına dayanmaktadır. Bu dosya, giriş kodu ve sistem geometrisi gibi bilgileri içerir. Bu bilgilere nötron, foton veya elektron kaynağının konumu, geometrisi ve enerji spektrumu, oluşturulacak geçmişlerin sayısı ve olası varyans teknikleri dâhildir.

Nötron enerjileri, elementlerin büyük çoğunluğu için kesitler ve nükleer veriler 10–11 MeV ile 20 MeV arasında değişirken, foton enerjileri 1 keV ile 1 GeV arasında değişir. Nükleer ve atomik veri kitaplıkları birincil olarak Değerlendirilmiş Nükleer Veri Dosyasından [51] (ENDF) ve Değerlendirilmiş Nükleer Veri Kitaplığından (ENDL) elde edilir. MCNP tarafından ele alınan nükleer veri tabloları, nötron ve foton etkileşimleri, nötron kaynaklı fotonlar, nötron dozimetrisi, nötron aktivasyonu ve termal parçacık saçılmasından oluşur [48, 49]. Mevcut nötron etkileşim tabloları yaklaşık 100 izotop için geçerliken, foton etkileşim tabloları hidrojenden ($Z=1$) plütonyuma ($Z=94$) kadardır.

Input Dosyası: Şekil 2.4'de, genel bir MCNP girdi dosyasının yapısı görülmektedir. Dosya üç bölümden oluşur: hücre kartları, yüzey kartları ve veri kartları. Başlık satırı dosyaya başlar ve boş satırlar üç bölümü birbirinden ayırır. Hücre, yüzey ve veri kartları, 80 karakterle sınırlı (MCNP6 da artırılmıştır) kod satırlarıdır. Sistem geometrisi hücre ve yüzey kartlarında belirtilirken, radyasyon kaynağı, fizik, malzemeler, geçmişler ve hesaplamalar veri kartlarında tanımlanmalıdır. Yorum kodu, dolar simgesiyle (\$) veya satırın ilk karakterinde "C" harfiyle tanımlanır.

1	c	MCNP6 girdi örneği		Başlık kartı
2	1	0 -1 #2 #3 #4 #5 imp:p=1		
3	2	2 -1 2 -3 -4 imp:p=1		
4	3	1 -11.34 8 -6 -4 #4 #5 imp:p=1		Hücre kartı
5	4	3 -3.67 5 -6 -7 imp:p=1		
6	5	0 8 -5 -9 imp:p=1		
7	6	0 1 imp:p=0		
8				
9	1	so 100		
10	2	px 10		
11	3	px 10.5		
12	4	cx 4		Yüzey kartı
13	5	px 30		
14	6	px 32		
15	7	cx 2		
16	8	px 26		
17	9	cx 1		
18				
19	mode	p		
20	c	Pb Collimator		
21	m1	82000.84p -1 \$Lead Collimator		
22	c	Detector volume		
23	m2	1000.84p -0.111894 \$Water, Liquid		
24		8000.84p -0.888106		
25	m3	11000.84p 1 \$NaI		Data kartı
26		53000.84p 1		
27	f4:p	4		
28	E4	0.01 98i 1		
29	sdef	erg=0.081 par=2 rad=d2 vec=1 0 0 axs= 1 0 0 dir=1		
30	nps	100000		
31				

Şekil 2.4 MCNP input dosyasının genel bir gösterimi

Şekil 2.4’de verilen kod örneğinde, 100 cm yarıçaplı havası alınmış (vakum ortamı) bir çalışma uzayı oluşturulmuştur. Çalışma uzayı içine kalınlığı 0,5 cm ve yarıçapı 4 cm olan içi su dolu silindirik materyal yerleştirilmiştir. Silindirin sol tarafına bir noktasal radyasyon kaynağı konulurken; sağ tarafına ise NaI(Tl) materyalden oluşturulan bir silindirik dedektör eklenmiştir. Bu dedektör kurşun materyal ile zırhlanmıştır. Data kart kısmında mode kartı ile foton modu aktive edilmiştir. Sdef kartı kısmında ise kaynağın enerjisi, yönü ve dağılımı gibi parametreler belirlenmiştir. Foton enerjisi 82 keV olarak seçilmiştir. Çizilen dedektör geometrisine foton akısının ölçülmesi için f kartı ile tally ataması

yapılmıştır. Böylece, ilgili hacim içerisindeki ortalama akı hesaplanabilir hale gelmiştir.

Geometri özellikleri: Hücre ve yüzey kartları kesinlikle birbiriyle ilişkilidir ve ikisi birlikte sistem geometrisini tanımlamaktadır. Yüzey kartları, kullanıcı tanımlı şekiller ve hacimler aracılığıyla hücreleri oluşturmaya hizmet eden girdilerdir.

Hücre kartı girişleri, hücrenin kendisini sınırlayan yüzeylerin listesi dâhilinde oluşturulur. Hücre numarası, söz konusu hücreyi tanımlayan ve düzelten ilk karakter olmalıdır ve bunu hücre malzeme numarası ve yoğunluğu takip etmelidir. Yoğunluk 10^{-24} atom/cm³ (pozitif girişler) veya g/cm³ (negatif girişler) cinsinden ifade edilebilir. Son olarak, geometri açıklamasını takiben, "hücre önemi" gibi hücre parametreleri tanımlanabilir. Şekil 2.4'de sunulan kodu dikkate alarak,

1. satır 1 0 -1 #2 #3 #4 #5 imp:p=1

1. hücrenin, 1. yüzey tarafından tanımlanan silindirin içindeki yoğunluğu 0. g / cm³ olan malzeme 1'den (vakum) yapıldığı anlamına gelir. Yoğunluk değeri önündeki eksi (-) işaretinin birimlerin g/cm³ olduğu anlamına gelirken, yüzey sayısının önündeki işaret malzemenin belirtilen yüzeyin "içinde" kaldığı anlamına gelir. Yüzey kartları herhangi bir geometrik şeklin dış sınırlarını belirlemede kullanılan ve hacim oluşturmaya yarayan düzlemlerdir. Yüzey kartının 1 ila 5 sütun arasında olması gerekir. Öncelikli olarak yüzey numarası girilir, ardından alfabetik bir kısaltma ile yüzey tipi belirlenir. Yüzey tipini takiben boyutları belirleyen kodlamalar verilir.

Şekil 2.4'de yer alan yüzey kartlarına göz atılacak olunursa, birinci yüzey kartının "1...so 100 " şeklinde olduğu görülmektedir. Bu, "Bir numaralı yüzeyin orijini kartezyen koordinat sisteminin merkezi olan 100 cm yarıçaplı bir küre yüzeyi tanımlar." demektir. Kaynak, materyal içerikleri, dedektörler, fizik paketleri gibi birçok detayın belirlendiği yer veri kartı kısmıdır. Şekil 2.4'e bakılacak olunursa, m2 kodlu materyal girdisi su molekülünün bileşenlerinin kütle ağırlıkları olan hidrojen ve oksijeni belirtmektedir. Eksi işareti ile kütlece ağırlıkları verilmiştir. Ayrıca .84p databanktan tesir kesit değerleri çekilmiştir. MCNP, kullanıcının enerji spektrumunun yanı sıra kaynakların boyutunun ve şeklinin de tanımlamasına izin

verir. Kullanıcı enerji aralığını ve olasılık dağılımlarını tanımlayabilir veya Watt, Gaussian ve Maxwellian dağılımları gibi bazı yerleşik işlevleri kullanabilir. Kaynağın yayılım yönü, doğrultusu, yayılım yoğunluğu gibi birçok ayarlama da bu sdef kartı aracılığı ile yapılabilir.

Hücre kartlarında kullanılacak unsurları veya bileşiklerini belirtmek için materyal kartları tanımlanmalıdır. MCNP materyal kartı iki zorunlu bölümden oluşur: malzeme numarası ve temel (veya izotopik) bileşim. Bir seçenek olarak, kullanıcı, tanımlanan her izotop için belirli bir kesitin kullanımını belirleyebilir. İzotoplar ve materyaller, atomik bolluk veya bunların kütle fraksiyonu kullanılarak tanımlanabilir. Şekil 2.4 örneğinde “M1” saf kurşun elementi, “M2” su bileşeni, “M3” ise dedektör materyalinden oluşmaktadır. M1 ile M3 atomik fraksiyon (pozitif işaret) ile M2 ise kütle fraksiyonu (negatif işaret) ile verilmiştir.

Tally kartları, kullanıcının parçacık akımı, parçacık akışı ve enerji birikimi gibi miktarları "ölçmesine" olanak tanıyan girdilerdir. Tally okumaları gönderilen parçacık sayısına göre normalize edilir. Genel olarak, enerji akısı $\Phi(E)$ ve olasılık dağılımına $f(E)$ bağlı olarak, Denklem (2.7) uyarınca hesaplanabilir:

$$C = \int \Phi(E)f(E)dE \quad (2.14)$$

$f(E)$ genellikle bir veya daha fazla kesit kitaplığı veya kullanıcı tanımlı bir yanıt işlevi ile temsil edilir. MCNP kodu içinde tally belirtmek için gereken tek veri kartı "F" kartı olarak bilinir ve bunu <999 tam sayısı izler. Böyle bir tamsayının son basamağı sadece 1'den 8'e kadar olabilir ve tally türünü tanımlar. Tally'lerin türü, tanımı ve birimlerinin bir özeti Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 MCNP ile kullanılabilen 8 farklı dedektör türü ve birimleri [47]

Sembol	Tanımlama	Birim
F1	Yüzey üzerindeki toplam akı	Parçacık
F2	Yüzey üzerindeki ortalama akı	Parçacık/cm ²
F4	Hücre üzerindeki ortalama akı	Parçacık/cm ²
F5	Bir yüzük dedektörde ya da noktadaki akı	Parçacık/cm ²
F6	Bir hücre üzerindeki depolanan ortalama enerji	MeV/g
F7	Hücre üzerindeki depolanan ortalama fisyon enerjisi	MeV/g
F8	Dedektörde oluşan pulsa ait enerji dağılımı	Puls

Örneğin, Şekil 2.4’de verilen örnek kodla açıklanan F2 sayısı (F2:p4), 4 numaralı hücreden geçen tüm fotonların puanlandığı anlamına gelir. Ayrıca enerji, zaman, dağılım, doz vb. parametreler ilgili tally kartı kullanılarak hesaplanabilir [39, 41].

2.7 Geleneksel Radyasyon Zırhlayıcılar

İnsanı ve çevresini radyasyonun yıkıcı etkisinden korumak için farklı radyasyon koruyucu malzemeler üretilmiştir. Kullanılacak zırhlayıcıların seçiminde radyasyonun türü ve enerjisi de önemli rol oynamaktadır. Bir nötron demetine uygun zırh üretmek için içerisinde bol miktarda hidrojen olan malzemeler tercih edilirken; X ve gama radyasyonu gibi yüksek enerjili demetlerin zırhlarında yüksek atom numarasına ve kütle yoğunluğuna sahip materyaller sıklıkla seçilmektedir. Bu özellikleri barındıran malzemelerin bir arada kullanılmasıyla hem gama hem de nötron radyasyonuna karşı avantajlı zırhlayıcılar ortaya çıkmaktadır. Beton, kurşun, çelik gibi materyaller genellikle bu amaçla kullanılan ticari zırhlayıcılardır [41].

Gama radyasyonu için kullanılan zırhlayıcılar ise beton veya kurşun gibi yüksek yoğunluğa sahip olmalıdır. Düşük yoğunluklu malzemeler, radyasyon şiddetini azaltmak için artan kalınlık ile telafi edebilse de, yüksek yoğunluklu malzemeler göre daha etkisiz kalabilirler. Madde ile gama ışını etkileşiminin iyi bir şekilde algılanması, uygun fiziksel özelliklere sahip radyasyon koruyucu malzeme üretiminin ilk anahtarıdır. Yüksek atom numarasına ve yüksek kütle yoğunluğuna sahip elementler içeren malzemeler, etkili gama zırhlama için iyi bir seçenektir.

Beton: İyi bir zırhlayıcı özelliği gösterdiği ve yapı malzemelerinde de kullanıldığı için beton ticari olarak kullanılan bir zırhlayıcı türüdür. Zırhlayıcılarda iki farklı tür beton kullanılmaktadır: *Sıradan* ve *ağır beton*. Yüksek enerjili radyasyonları zırhlamak amacıyla genellikle daha yoğun ve etkili olan ağır betonlar kullanılmaktadır. Betonun özellikle daha etkili hale getirmek için oluşumu esnasında yoğun agregalar ilave edilir. Ağır betonların sıradan betonlara göre daha fazla tercih edilmesinin diğer bir nedeni ise HVL değerlerinin sıradan betonlara kıyasla daha düşük olmasıdır. Böylelikle daha ince tabakalarda aynı radyasyon perdeleme performansı elde edilebilmektedir [52].

Yaygın olarak radyasyon zırhlayıcı olarak beton kullanılmasının nedeni de betonun hazırlanma aşamasında istenilen şekilde kalıplanabilmesidir. Sahip olduğu yüksek orandaki hidrojen içeriği sadece gama ve X ışınları için değil nötronları zırhlayabilmek için de önemli bir avantaj sağlamaktadır. Sıradan betonlar ucuz ve kolay elde edilebilirken yoğunlukları da $2,2-2,4 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Ağır betonların ise yoğunluğu $3,7-4,8 \text{ g/cm}^3$ arasındadır. Yoğun agregalar ile zırhlama açısından güçlendirilmiş bu betonlar çoğunlukla radyoterapi ünitelerinde kullanılır. Ağır betonun sıradan betona göre daha maliyetli oluşu ve üretim sürecinin daha zor oluşu ağır betonun olumsuz özellikleridir. Ayrıca, beton pompalarının ve nakil araçlarının bu tür ağır betonlar için dizayn edilmemiş olması da ağır betonun bir başka dezavantajıdır. Bu sorunu aşabilmek için ticari olarak blok döküm betonlar üretilmektedir. Bu tarz ağır blok betonlar radyasyon zırhlama kabiliyetini arttırmak için yüksek atom numaralı malzemelerle veya hurda çelik ve demir oksitlerle güçlendirilmektedir [41, 53].

Kurşun ve türevleri: Uzun yıllardır kurşun, en çok kullanılan radyasyon zırhlayıcı malzemedir. Kurşunun fiziksel ve mekanik özellikleri onu yaygın bir radyasyon zırhlayıcı malzeme yapmaktadır. Kurşun zırhlayıcı kullanmanın temel avantajı, yüksek yoğunluğu nedeniyle kompakt olmasıdır. Ayrıca, kurşun cam, gözlem odaları ve laboratuvarlar için görünürlük ve etkili gama radyasyonu zırhı sağlar. Ek olarak, kurşun tuğlalar, izotop hazırlığı sırasında birincil gama radyasyonuna karşı koruma sağlamak için de kullanılır. Kurşun zırhlama uygulamaları,

laboratuvar ve muayene odası duvarları, döşemeleri ve tavanlarının yapımında kurşun astarlı alçıpan ve kurşun astarlı kontrplak kullanımını içerir [54].

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, kurşun kullanımının sağlık açısından tehlikeleri olduğuna dair endişeler oluşturmuş ve kurşunun öncelikli zırh malzemesi olması gerekliliğini sorgulatmıştır. Kurşun, hem sağlık çalışanlarının hem de hastaların biyokimyasal sistemlerini etkileyen büyük tehlikeler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bu radyasyon koruyucu malzeme, toksitesi nedeniyle de sağlık için tehlikelidir. Araştırmalar, kurşuna maruz kalmanın bağışıklık sistemi üzerindeki olumsuz etkileri olduğunu ve alerji, bulaşıcı hastalık, otoimmünite veya kanser insidansını artırdığını göstermiştir. Ayrıca, hem erkek hem de dişilerin üreme sistemleri, yüksek dozda kurşun maruziyetinden olumsuz yönde etkilenmektedir. Kurşun zehirlenmesinin sinir sistemi üzerinde de istenmeyen sonuçlar vardır. Kurşun maruziyeti nöron miyelin kılıfı kaybına ve nöron sayısında azalmaya neden olur [55, 56].

Kurşunun bu olumsuz etkilerinden kurtulmak amacıyla pek çok çalışma mevcuttur. Örneğin, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan bir araştırmada, radyasyona maruz kalan personelin radyoaktif kaynaklardan rutin olarak korunması için kurşun yerine yine yüksek atom numaralı bizmutun kullanılması halinde hem maliyet hesabı yapılmış hem de bu değişimin faydaları irdelenmiştir. Bu ve benzeri araştırmalarla geline son nokta ise, işyerlerinde ve özellikle nükleer tesislerde kurşunun tamamen kullanımının kaldırılması yönünde olmuştur. Dolayısıyla kurşunun toksik olmayan malzemelerle değiştirilmesi hayati bir önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; kurşun yerine bizmut kullanımı genellikle fotoelektrik etkileşimle enerjileri kaydeden yüksek enerjili X ışınlarının ve düşük enerjili gama ışınlarının perdelenmesinde, çalışanların sağlığını tehdit etmeyen daha güvenilir bir alternatiftir. Compton saçılmasının daha etkin olduğu orta enerjiye sahip radyasyon kaynakları içinse tungsten, kurşunun neredeyse iki katı performansa sahip olan ve sağlık ile çevre açısından tehdit teşkil etmeyen bir malzemedir. Radyasyon zırhlayıcı malzemeler olarak kullanılan sıklıkla kullanılan kurşun, tungsten ve bizmutun atom numarası sırasıyla 82, 74 ve 83 iken; kütle yoğunlukları ise 11,30 gr/cm³ 19,11 gr/cm³ ve 9,80 gr/cm³'dür. Yukarıda da

bahsedildiği gibi tungsten veya bizmattan yapılan radyasyon koruyucular toksik olmadıklarında, hem insan sağlığına zarar vermezler hem de çevresel tehlike yaratmazlar. Bunların dışında, tungsten ve bizmut için dekontaminasyon prosedürlerine ve endüstriyel hijyen desteğine ihtiyaç duyulmamaktadır. Radyasyon koruyucu malzeme olarak bizmut kullanmanın dezavantajı ise saf bizmutun kırılğan olması ve tuğla oluşturmaya elverişli olmamasıdır. Bu nedenle, birçok ticari bizmut tuğlalar, bizmut-polimer kompozitlerden üretilir [41, 57].

Paslanmaz Çelik: Çelik %11'in üzerinde krom bulunduran demir temelli alaşımların bir sınıfıdır. Çelik sıradan beton ve kurşun ile kıyaslandığında daha maliyetli zırhlayıcılar sınıfındandır. Ancak bu maliyetine rağmen kurşun gibi toksik etkilere sahip olmaması nedeniyle zırhlama uygulamalarında tercih edilmektedir. Üretim aşamalarındaki farklılıklardan kaynaklı değişimlere rağmen çeliğin ortalama kütle yoğunluğu $7,8 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Zırhlama kabiliyeti olarak kurşun ve beton ortasında bir yerde olan çelik nötron zırhlaması açısından daha geridedir. Çeliğin ön plana çıkmasını sağlayan olumlu özellikleri arasında yüksek korozyona direnci, ısıya dayanıklılık, geri dönüşüme açık oluşluluk, kolay üretim ve temizlik süreçleri sayılabilir. Ticari olarak genellikle zırhlama malzemesi olarak dış katman veya kurşun iç astarı olarak kullanılır [41, 53, 58].

2.8 Yeni Nesil Zırhlayıcılar

Son on yılda, kurşun ve beton gibi geleneksel radyasyon zırhlama malzemelerinin yukarda bahsedilen dezavantajlarına istinaden, bilim dünyası onlara alternatif malzeme arayışına girmiştir. Gelişen üretim teknolojileriyle birlikte toksik olmayan, hafif, esnek, düşük maliyetli ve trasparan özellikte malzeme arayışı büyük bir hız kazanmıştır.

Cam Zırhlayıcılar: Metalleri radyasyon koruyucu malzeme olarak kullanmanın bazı dezavantajları vardır. Metaller görünür ışığa şeffaf olmadığından bu malzemelerle yapılan koruyucuların içi görümez. Günümüzde gözlükler, görünür ışığa karşı iyi şeffaflık, yüksek yoğunluk, imalat kolaylığı ve toksik olmama gibi olağanüstü fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle geleneksel koruyucu malzemelere gelecek vadeden bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bizmut

tabanlı sistemler toksik değildir ve kurşun içermeyen radyasyon zırhlayıcı camlar için yeni bir olasılık olduğu kanıtlanmıştır [54, 59]. Camların beton ve kurşuna göre en büyük avantajları saydam olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde camlar, radyoaktif ortamda içerinin görülebileceği bir pencere oluşturma fırsatı sunmaktadır. Camların bir diğer avantajı ise çok bileşenli olarak hazırlanabilmeleri olup, cam sistemin içine eklenebilecek farklı bileşenler sayesinde, camın istenilen özelliklere (optik, fiziksel, ısı, kimyasal, zırhlama vb.) sahip olması sağlanabilmektedir [52, 60].

Kompozitler: İçinde bulunduğumuz teknolojik olarak gelişmiş bu çağda, çeşitli uygulamalar için ekonomik ve daha sağlam malzemelere yönelik artan bir talep oluşmuştur. Eskiden çividen uçağa kadar her şeyi üretmek için metaller ve metal alaşımları kullanılırdı. Daha sonra polimerlerin keşfiyle birlikte, plastikler metal elemanların yerini almaya pek çok endüstriyel sektörde almaya başlamıştır. Plastiklerin kolaylıkla kalıplanabilmeleri, ucuz maliyetleri ve ayrıca metal muadillerinden daha hafif ve hatta sağlam oluşları onların tercih edilmelerinde öne çıkan özelliklerinden sadece bir kaçıdır. İlk zamanlarda plastik ve türevlerinin kullanımı, nispeten düşük mukavemetlerinin bir sonucu olarak, yiyecek konteyneri ve çöp kutuları gibi düşük kaliteli uygulamalarla sınırlıyken, polimer mühendisliğindeki baş döndürücü gelişmeler ve polimer kompozitlerin keşfiyle birlikte otomotivden, denizcilik ve havacılığa kadar genişlemiştir. Bilindiği üzere, en az iki farklı ya da aynı gruptaki malzemenin makroskopik düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelere *kompozit malzemeler* denir. Kompozitlerin onu oluşturan bileşenlerin tek başlarına sahip oldukları özelliklerin sinerjik bir kombinasyonu olduğu bilinmektedir. Yani kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler ile kompozit malzeme arasında önemli ölçüde fiziksel ve kimyasal farklılıklar vardır. Kompozit malzemelerin çoğu, sertlik ve tokluk gibi mekanik özellikleri iyileştirmek için geliştirilmiştir. Ekseriyetle kompozitler yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, yüksek korozyon direnci veya yüksek radyasyon zırhlama kabiliyeti gibi üstün özelliklerin elde edilebilmesi için hazırlanırlar [61–63].

Bir kompozit malzeme, çeşitli şekillerde bir araya getirilmiş çok sayıda malzemeden oluşabilir. Temel olarak iki farklı bileşen fazı içerirler. Bunlar matris ve takviye elamanıdır. Kompozit malzemelerin matrisi, takviye malzemelerini bir arada tutan maddedir. Kompozit malzemeler polimer, metal ve seramik malzemeler olmak üzere üç farklı matris çeşidine göre sınıflandırılırlar [64].

Polimer matrisli kompozitler hafif oluşları, yüksek mukavemetleri, kolay işlenebilirlikleri, kimyasal açıdan inert oluşları ve kolay geri dönüştürülebilmeleri gibi avantajları nedeniyle günümüzde hem teknolojik olarak hem de akademik olarak araştırma açısından önem arz etmektedirler. Polimerlerin üretimi yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmediğinden; karmaşık şekilli parçaların üretimi açısından avantajlıdır. Polimerler farklı zincir bağlanma şekillerine göre kendi içlerinde termoset, termoplastik ve elastomerler olarak üç ana sınıfa ayrılırlar [64, 65].

Termosetler arasında epoksiler, polyester, vinil ester, fenolikler ve amino reçineler, bismaleimidler, siyanat ester, poliimidler ve poliamidler bulunur. Bunlardan epoksiler, günümüzün polimer matrisli kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılanlardır [66]. Epoksi terimi, hâlihazırda başka bir şekilde birleşmiş iki karbon atomu ile bağlanmış bir oksijen atomundan oluşan bir kimyasal grubu ifade eder. Epoksi reçine, yararlı bir termoset forma dönüştürülebilen birden fazla epoksi grubu içeren herhangi bir molekül olarak tanımlanır. Epoksi reçineler, epoksit veya oksiran işlevselliği ile karakterize edilir. Isı ve sertleştiricilerin uygulanmasıyla kimyasal olarak çapraz bağlı, çözünmez, infüze edilebilir bir matris reçinesine kürlenirler. Epoksi bileşikleri, glisidil eterler, epoksi novalak reçine, sikloalifatik reçineler, glisidil esterler ve glisidil amin olmak üzere farklı türlerde sınıflandırılır. Bu reçineler, üç boyutlu bir ağ oluşturmak için sertleştirici ile kürlenir. Epoksi reçinelerin diğer termosetlere göre öne çıkan özelliklerinden bazıları şunlardır:

- İstenilen özelliklere sahip son ürünler elde etmek için farklı kap ömrü koşullarında kürlenebilme yeteneği
- Uygun geleneksel işlemle işlenebilme yeteneği

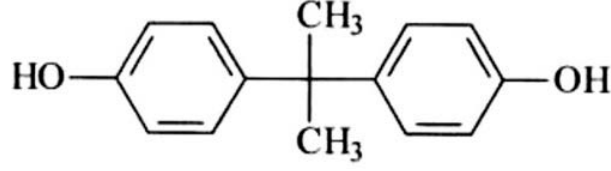
- Kürlenme sırasında uçucu madde salınımının olmaması
- Doğru  reme ile düşük büzülme
- Çok çeşitli takviye, dolgu ve pigmentleri kabul etme ve bunlarla uyumlu olma becerisi [67].

Bisfenol-A'nın diglisidil eterine dayalı epoksi reçineleri, yüksek performanslı hafif ağırlıklı fiber takviyeli kompozitlerin geliştirilmesinde ısıyla sertleşen matrisler olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Radyasyon zırhlama bakımından epoksi kompozitler, son yıllarda oldukça popüler bir malzeme haline gelmiştir. Özellikle ana matris olarak seçilen epoksiye yüksek atom numaralı elementler veya bileşikler katkılanarak epoksinin zırhlama kabiliyetini arttırmaya yönelik olarak yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir [12, 13, 68–73].

Bu tez çalışması deney ve simülasyon olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kapsamda üretilen kompozitler için ana matris olarak epoksi polimeri kullanılırken; takviye elemanı olarak tungsten oksit ve bizmut oksit parçacıkları tercih edilmiştir. Kompozit yapımında kullanılan tungsten ve bizmut oksitler üç farklı parçacık boyutu dağılımına sahiptir. İlk iki parçacık dağılımı ticari olarak temin edilmiş mikro ve nano yapıları tungsten oksit ve bizmut oksitleri oluştururken; üçüncü dağılım hidrotermal ve solvotermal yöntemler kullanılarak tez çalışmaları kapsamında üretilmiş olan nano metal oksit parçacıklara aittir. Tüm takviye elemanlarıyla ilgili bilgiler ayrı başlıklar altında bu bölümde anlatılmıştır. Takviye elemanlarının üretim bilgileri, yapısal ve morfolojik karakterizasyonları (SEM, TEM ve XRD) alt başlıklar altında resim ve tablolar kullanılarak detaylandırılmıştır. Matris ve takviye elemanlarına ait verilen bilgilerin ardından, kompozitlerin oluşturulma aşamaları ve genel özellikleriyle ilgili detaylar sunulmuştur. Daha sonra üretilen kompozitlerin zırhlama kabiliyetlerinin deneysel olarak tespit edildiği gama spektroskopisi yöntemi, kullanılan ölçüm düzeneği ve geometrisi anlatılmıştır. Bu bölümün son kısmında MCNP programı kullanılarak yapılan modelleme, geometri ve program ayarları gösterilmiştir.

3.1 Malzemeler ve Karakterizasyon

Epoksi: Tez çalışmasında kompozitlerin matrisi olarak bir termoset polimer olan epoksi seçilmiştir. AC510UV kodlu bisfenol-A türü epoksi reçinesi Armor Chemical firmasından temin edilmiştir. Şekil 3.1’de ilgili epoksi reçinesine ait molekül yapısı verilmiştir [74].



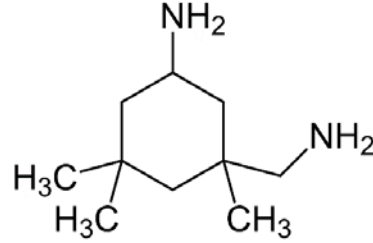
Şekil 3.1 Bisfenol-A epoksi reçinesinin genel molekül yapısı

Temin edilen epoksi reçinesi şeffaf renklidir ve uygun sertleştiriciyle ideal karışım oranı 2:1 olarak belirlenmiştir. Tablo 3.1’de epoksi reçinesine ait teknik bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.1 Bisfenol-A epoksi reçinesinin teknik özellikleri

Reçine tipi	Alevlenme Noktası	Kuruma Süresi	Renk	Raf Ömrü	Karışım Ömrü (23 °C’de)	İdeal Karışım Oranı
BPA	100°C	24 saat	Şeffaf	1 yıl	20-23 dakika	%66,66 reçine

Reçineye eklenen sertleştirici malzemesi Armor Chemical firmasından temin edilmiş olan AC510-B kodlu izoforon diamin türü sertleştiricidir. Şekil 3.2’de izoforon diaminin molekül yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.2 İzoforon diamin sertleştiricisinin genel molekül yapısı [75]

Ticari Katkılar: Bu tez çalışmasında epoksilere takviye elemanı olarak bizmut oksit ve tungsten oksit kullanılmıştır. Bu amaçla ilk aşamada mikro ve nano boyutlarda bizmut ve tungsten oksitler Nanografi firmasından temin edilmiştir. Bu ticari katkılara ait ürün kodları ve fiziksel bilgiler Tablo 3.2’de verilmiştir.

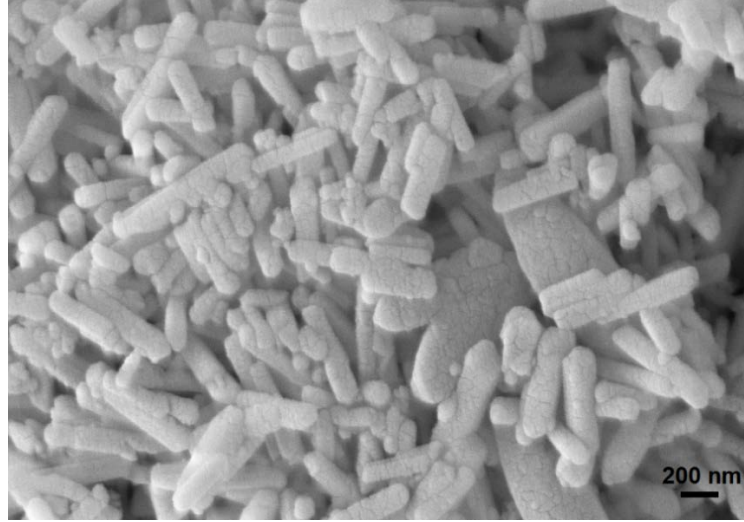
Tablo 3.2’deki bilgilere ek olarak, mikro tungsten oksit ve bizmut oksit partikül ortalama boyutlarının 0,035 mm’den az olduğu üretici firma tarafından bildirilmiştir. Hem mikro yapılu bu oksitlerin ortalama parçacık boyutlarının aralık

tayini hem de morfolojileri hakkında bilgi edinebilmek için, Zeiss EVO® LS 10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile SEM görüntüleri alınmıştır.

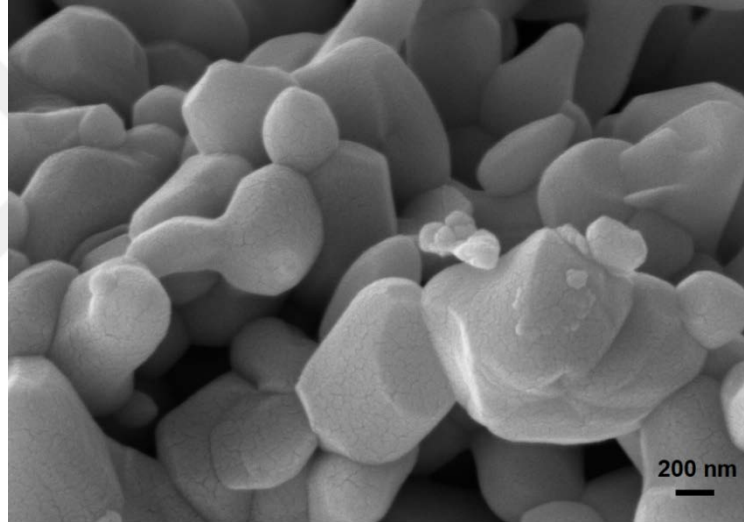
Tablo 3.2 Ticari mikro ve nano Bi_2O_3 ve WO_3 parçacıklarının kodları ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Adı	Kodu	Safılık
Mikro Bi_2O_3	NG01OM0202	Safılık: %99,99 Bileşim: Bi-%89,7 O-%10,3 CAS: 1304-76-3 Erime noktası: 817 °C Yoğunluk: 8,90 g/cm ³
Nano Bi_2O_3	NG04SO0301	Safılık: %99,99 Biçim: Küresel Moleküler Ağırlık: 466 g/mol Erime noktası: 810 °C Yoğunluk: 9,20 g/cm ³
Mikro WO_3	NG01OM2702	Safılık: %99,99 Bileşim: W-%79,3 O-% 20,7 CAS: 1314-35-8 Erime noktası: 1473 °C Yoğunluk: 7,16 g/cm ³
Nano WO_3	NG04SO3601	Safılık: %99,99 Biçim: Küresele yakın Moleküler Ağırlık: 231,8 g/mol Erime noktası: 1470 °C Yoğunluk: 7,1 g/cm ³

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de sırasıyla mikro Bi_2O_3 ve WO_3 tozlarının 15 kV çalışma voltajı ve 50 KX büyütme oranında elde edilen SEM görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Mikro Bi_2O_3 parçacıklarının SEM görüntüsü

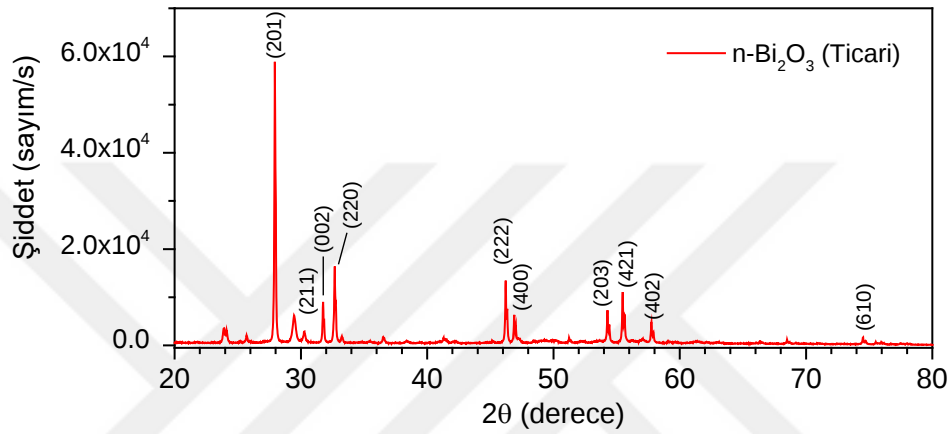


Şekil 3.4 Mikro WO_3 parçacıklarının SEM görüntüsü

Şekil 3.3'e göre, Bi_2O_3 mikro partiküllerinin uzunluklarının $0,2 \mu\text{m}$ ile $0,6 \mu\text{m}$ arasında değiştiği görülmektedir. Parçacık biçimlerinin ise çoğunlukla çubuk formunda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'de verilen SEM görüntüsü ise, WO_3 partiküllerinin çakıl taşı formunda ve $0,3 \mu\text{m}$ ile $0,8 \mu\text{m}$ arasında değişen boyutlara sahip olduklarını açığa çıkarmıştır.

Tez çalışması kapsamında sentezlenen kompozitlerdeki katkı parçacığı boyutunun radyasyon perdeleme performansı üzerine etkisi de araştırıldığından; ticari olarak temin edilen nano bizmut oksit ve nano tungsten oksit tozları için ortalama

parçacık boyutlarının tespiti büyük önem arz etmektedir. Nano tozlarda ortalama parçacık boyutu tayini için hem tozların X-ışını Kırınım (XRD) desenleri kullanılarak Debye-Scherrer analizi yapılmış hem de transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile görüntüleme gerçekleştirilmiştir. XRD analizinde Cu K α tüpüne ($\lambda=1,5406$ Å) sahip Rigaku model X-ışını kırınım cihazı kullanılmış ve örneklerin XRD kırınım desenleri $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ aralığında elde edilmiştir. Ticari nano Bi₂O₃ tozunun XRD deseni 3.5' de gösterildiği gibidir.

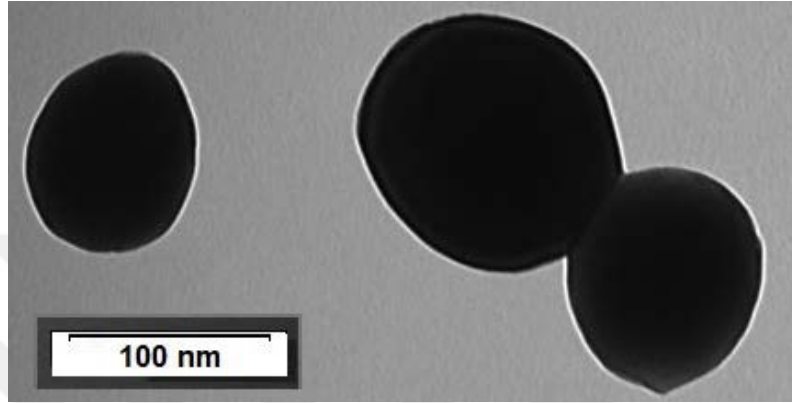


Şekil 3.5 Ticari nano Bi₂O₃'ün XRD deseni

Şekil 3.5'den de görüleceği üzere, Bragg kırınım zirvelerinin 2θ 'nın $27,94^\circ$, $30,22^\circ$, $31,72^\circ$, $32,70^\circ$, $46,20^\circ$, $46,92^\circ$, $54,22^\circ$, $55,48^\circ$, $57,74^\circ$ ve $74,47^\circ$ e eşit olduğu değerlerde gerçekleşmiştir. İlgili kırınım zirvelerinin International Centre for Diffraction Data bankasının JCPDS No: 27-0050 nolu kartıyla eşleştiği görülmektedir [76]. Buna uygun olarak, Bragg zirvelerine ilişkin Miller indisleri Şekil 3.5'de gösterilmiştir. İlgili analiz sonucu ticari nano Bi₂O₃ tozunun kristal yapısının tetragonal beta fazının ana kırınım açılarıyla uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Tozdaki nano parçacıkların ortalama parçacık boyutu Debye-Scherrer yaklaşımı ile yüksek şiddete sahip Bragg kırınım pikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama tane boyutu (D) ; X-ışınının dalga boyu (λ), K sabiti, yarı maksimum tam genişlik değeri (B) ve Bragg açısı (θ) olmak üzere;

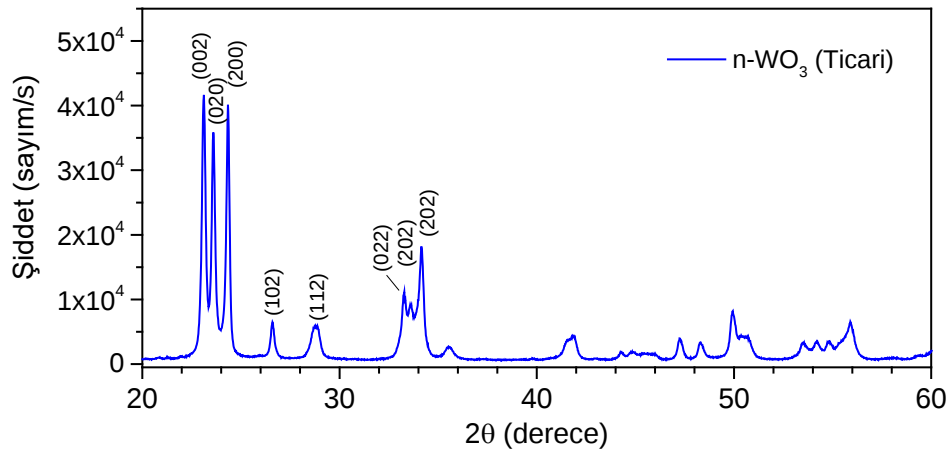
$$D_p = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} \quad (3.1)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Debye-Scherrer analizine göre Bi_2O_3 partiküllerinin ortalama tane boyutları 95 nm olarak belirlenmiştir. Aynı Bi_2O_3 nano tozunun ortalama tane boyutu, JEOL JEM 1220 model TEM ile elde edilmiş görüntüleriyle de desteklenmiştir (Bakınız Şekil 3.6). Şekil 3.6'ya göre, söz konusu Bi_2O_3 tozunun ekseriyetle 100 nm ve daha düşük çaplara sahip parçacıklardan oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.6 Ticari nano Bi_2O_3 parçacıklarının TEM görüntüsü

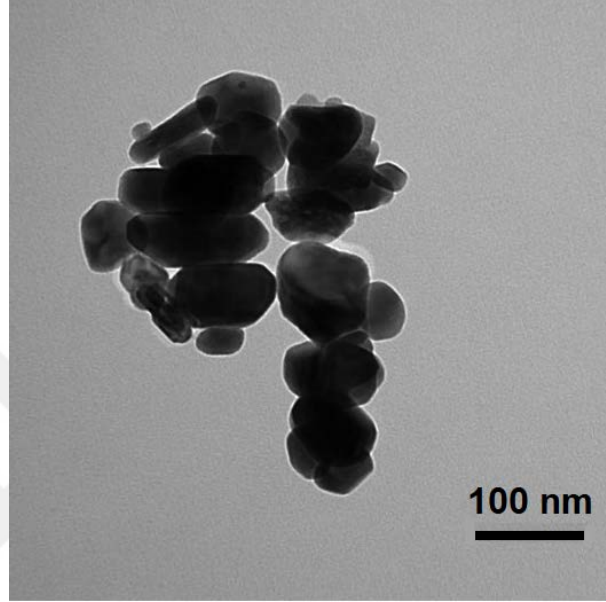
Benzer şekilde, XRD analizi ticari nano WO_3 tozu için de yapılmış olup; $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ aralığında ilgili XRD deseni Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Ticari nano WO_3 'ün XRD deseni

Şekil 3.7'den XRD zirvelerinin $2\theta = 23,1^\circ$, $23,6^\circ$, $24,4^\circ$, $33,6^\circ$ ve $34,1^\circ$ 'de olduğu görülmüş ve JCPDS No: 32-1395] kartı uyarınca Bragg kırınım zirvelerinin monoklinik WO_3 kristal yapısıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir [77]. Buna uygun olarak kırınım zirvelerine ilişkin Miller indisleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Yapılan Debye-Scherrer analizi ise WO_3 partiküllerinin ortalama tane boyutunun 45 nm olduğunu göstermiştir. Debye-Scherrer analizinden elde edilen ortalama tanecik boyutu bulgusu, Şekil 3.8’de verilen TEM görüntüsüyle de uyuşmaktadır. Zira WO_3 tozunun TEM görüntüsü de 50 nm ve daha düşük çaplı nano WO_3 parçacıklarını işaret etmektedir.



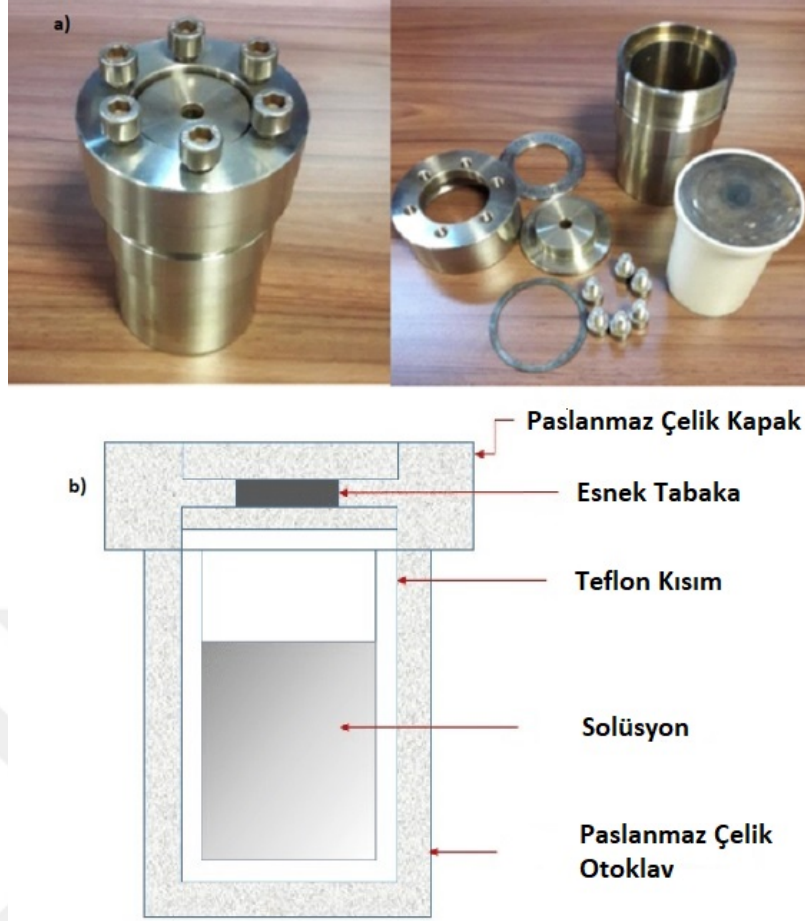
Şekil 3.8 Ticari nano WO_3 parçacıklarının TEM görüntüsü

Solvothermal (ST) ve Hidrotermal (HT) Yöntemiyle Nano Parçacık Sentezi: Bu tez çalışmasında hem ticari nano Bi_2O_3 ve WO_3 katkılara alternatif olması hem de daha düşük tanecik boyutuyla daha fazla radyasyon etkileşimi sağlayacak nano parçacıkların sentezlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaca uygun olarak nano Bi_2O_3 ve nano WO_3 parçacıklar sırasıyla ST ve HT yöntem uygulanarak sentezlenmiştir. Nanoparçacık sentezi için uygulamadaki basitliği ve sahip olduğu yüksek kontrol kabiliyeti sebebiyle ST ve HT metotlar tercih edilmiştir. Bu metotlar özünde, normal koşullar altında nispeten çözünmeyen malzemeleri çözmek ve yeniden kristalleştirmek için kapalı bir sistemde bir atmosfer basınç ve oda sıcaklığı koşullarının üzerindeki sulu veya susuz çözücüler veya mineralleştiriciler varlığında herhangi bir heterojen veya homojen kimyasal reaksiyonu ifade etmektedir.

Bu teknikler, malzemelerin sentezi, değişimi, yapı stabilizasyonu için oldukça kullanışlıdır. Özellikle nanoparçacık sentezinde ST ve HT tekniklere sıklıkla başvurulmaktadır. ST ve HT metotla, sentez sırasında çeşitli yüzey aktif maddeler ile organik katkı maddelerin kullanılması suretiyle nano parçacıkların istenen şekil, boyut ve fiziko-kimyasal özelliklerde üretimi mümkün olabilmektedir.

Özellikle, nano metal oksit parçacıkların sentezinde bu yöntemlerin kullanılmasının önemli avantajları aşağıdaki maddelerle özetlenebilir:

- Basit ve nispeten düşük maliyetli bir deneysel kurulum
- Kolay deneysel sentez koşulları
- Nano parçacıkların kontrollü bir difüzyon süreci ile yüksek kalitede ve homojenlikte üretimi
- Düşük parçacık topaklanm
- Nano parçacıklar için istenen boyut ve morfolojinin elde edilebilmesi
- Sentez sonrası ek kimyasal işlemlere gerek olmaması
- Reaksiyonlar kapalı bir sistemde gerçekleştiği için çevreye ve insan sağlığına zarar vermemesi [78].

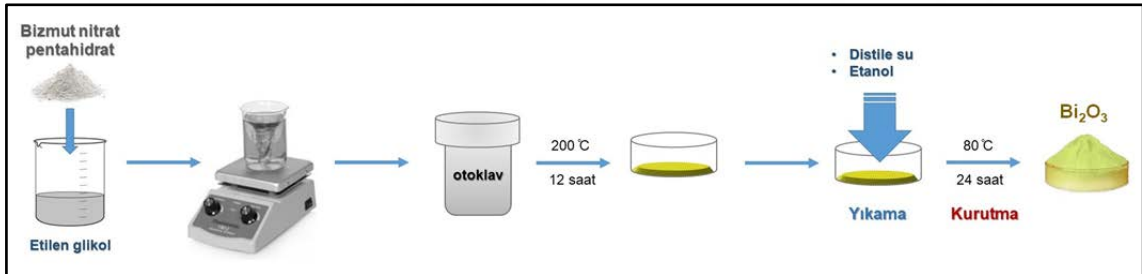


Şekil 3.9 a) Sentezlerde kullanılan otoklav ve bileşenleri b) Otoklav sisteminin şematik gösterimi

Genel olarak HT sentez, sulu çözelti içinde suyun kaynama noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar ile olurken; ST sentez nispeten daha yüksek sıcaklıklarda su dışındaki alkol veya organik çözücü içinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla yapılır. Bu yöntemlerde bahsedilen kimyasal reaksiyonlar otoklav adı verilen kapalı bir kapta kimyasal çözeltinin ısıtılması sonucu çözücünün kaynama noktasını aşması ile kaptaki basıncın yükselmesi sonucunda gerçekleşir. Dolayısıyla otoklav sistemi bir yüksek basınç ve sıcaklık reaktörü olarak da düşünülebilir. Otoklav içinde gerçekleşen bu süreç malzeme sentezinde kullanılan öncü malzemenin (precursor) çözünürlüğünü ve reaktivitesini de artırmaktadır [79, 80]. Bi_2O_3 ve WO_3 nano parçacıkların sentezinde kullanılan otoklav sistemi ve bileşenleri ile setin şematik gösterimi Şekil 3.9' da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sistem temel olarak iki kısımdan

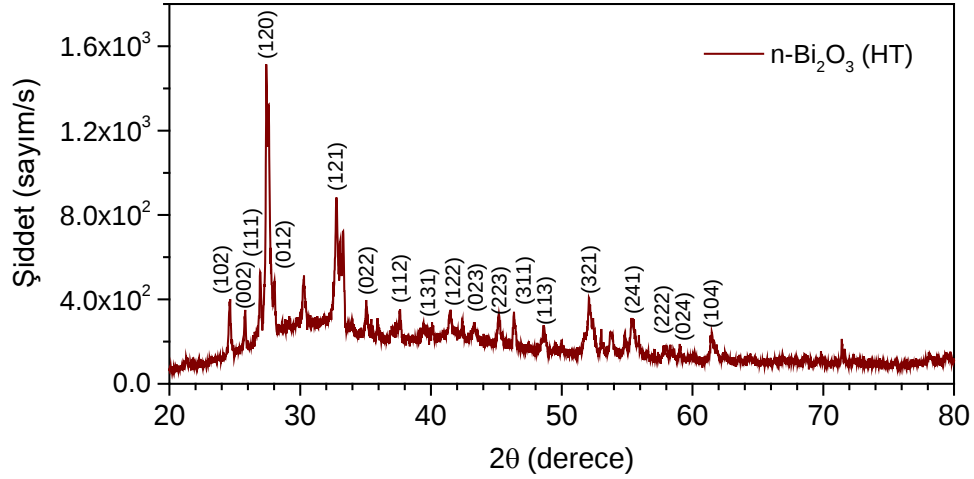
oluşmaktadır. Çözeltilerin konulduğu iç kap teflon malzemedan üretilirken; dış kısım paslanmaz çelikten yapılmıştır.

ST yöntemiyle Bi_2O_3 nano parçacık sentezi: Bi_2O_3 nano parçacıkları ST metot ile sentezlenmiş olup; başlangıç maddesi olarak Bizmut nitrat pentahidrat $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (BiN) ve çözücü olarak etilen glikol kullanılmıştır. BiN kimyasalı (CAS Numarası 10035-06-0) Sigma Aldrich firmasından, etilen glikol (CAS Numarası 107-21-1) ise Carlo Erba firmasından temin edilmiştir. Öncelikle 0,728 gram BiN, 50 ml etilen glikol içerisinde çözölmüştür. Bu çözeltide kullanılan BiN oranı 30 mM olarak ayarlanmıştır. Çözelti 2 saat boyunca oda sıcaklığında 1000 rpm devir hızında manyetik karıştırıcı cihazında karıştırılmıştır. Ardından 50 ml hacmindeki çözelti, paslanmaz çelik otoklav içerisine aktarılmıştır. Otoklav kapatılarak, çözelti 200°C’de 12 saat süreyle ST işleme maruz bırakılmıştır. 12 saat sonunda otoklav açılarak elde edilen koyu renkli çökelti sırasıyla saf su ve etanolle yıkanmıştır. Elde edilen Bi_2O_3 parçacıkları, 80°C’de 24 saat kurutulmuş ve 500°C’de 4 saat tavlantılmıştır. Sentez yöntemi şematik olarak Şekil 3.10’ da verilmiştir.



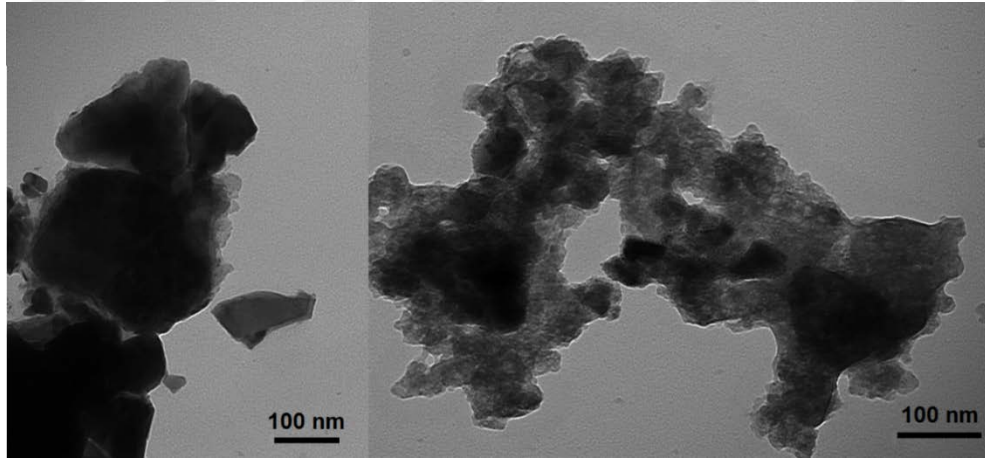
Şekil 3.10 Nano Bi_2O_3 parçacıkların ST yöntemle sentezinin şematik gösterimi

Sentezlenen nano bizmut oksitlerin ortalama parçacık boyutu ticari nano parçacıklarda olduğu gibi, hem XRD analizi hem de TEM görüntüleriyle tespit edilmiştir. XRD deseni ve TEM görüntüleri aynı cihazlarla ve daha önce bahsedilen koşullarda elde edilmiştir. Şekil 3.11’de sentezlenen nano Bi_2O_3 parçacıkların XRD deseni, Şekil 3.12’de ise TEM görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Sentezlenen nano Bi_2O_3 'ün XRD deseni

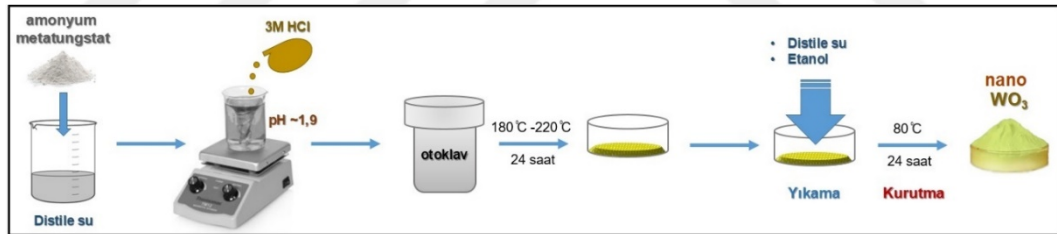
Şekil 3.11'de yüksek şiddetli Bragg zirvelerinin 27,4, 30,2, 33,2 ve 46.4° e karşılık geldiği açılarda gerçekleştiği görülmüştür. İlgili Bragg kırınım zirveleri JCPDS No:76-1730 koduyla tanımlı monoklinik Bi_2O_3 kristal yapısıyla eşleşmektedir [81]. XRD deseninde monoklinik Bi_2O_3 kristal yapısını tarifleyen Miller indisleri ayrıca gösterilmiştir. Debye-Scherrer analizine göre Bi_2O_3 parçacıklarının ortalama tanecik boyutları 33 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.12 Sentezlenen Nano Bi_2O_3 parçacıklarına ait TEM görüntüleri

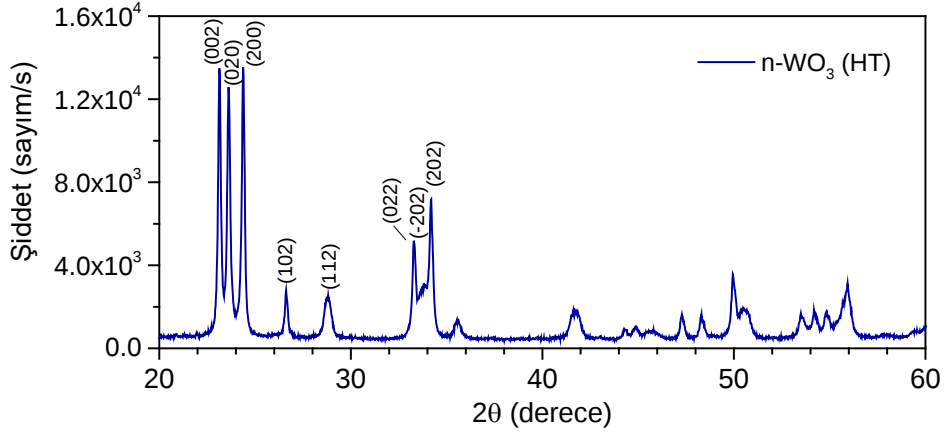
Ortalama tanecik boyutu bulguları, Şekil 3.12' de verilen TEM görüntüleriyle desteklenmektedir. Şekil 3.12'den görüldüğü gibi ST yöntemle sentezlenen nano Bi_2O_3 partiküllerin 60-90 nm arasında değişen çaplara sahiptirler.

HT yöntemiyle WO₃ nano parçacık sentezi: WO₃ nano parçacıkların sentezi, Nguyen ve arkadaşlarınca kullanılan prosedüre [82] bağlı kalınarak gerçekleştirilmiştir. Ancak Nguyen ve arkadaşlarının kullandığı sodyum tungstat dihidrat yerine başlangıç kimyasalı olarak amonyum meta tungstat hidrat (AMT) ve çözücü olarak yine saf su kullanılmıştır. AMT kimyasalı (CAS Numarası 12333-11-8) Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Başlangıçta 8,20 gram AMT 25,0 ml saf su içerisinde çözülmüştür. Çözeltinin pH değerini 1,9'a ayarlamak için 3M HCl çözeltisi, AMT çözeltisine damla damla ilave edilmiştir. Çözeltinin pH değeri istenen noktaya getirildikten sonra çözelti 4 saat boyunca oda sıcaklığında 1000 rpm devir hızında manyetik karıştırıcı cihazında karıştırılmıştır. Ardından çözelti 50 ml hacimli paslanmaz çelik otoklavın içine aktarılmıştır. Otoklav kapatılarak, 180°C' deki etüv içerisine 24 saat boyunca bırakılmıştır. 24 saat sonunda otoklav açılarak elde edilen sarı renkteki çökelti sırasıyla saf su ve etanolle yıkanmıştır. Son olarak WO₃ parçacıkları 80°C'de 24 saat kurutulmuş ve 500°C'de 3 saat tavlanmıştır. Sentez sırasında gerçekleştirilen işlemlere ait şematik gösterim Şekil 3.13' de verilmiştir.



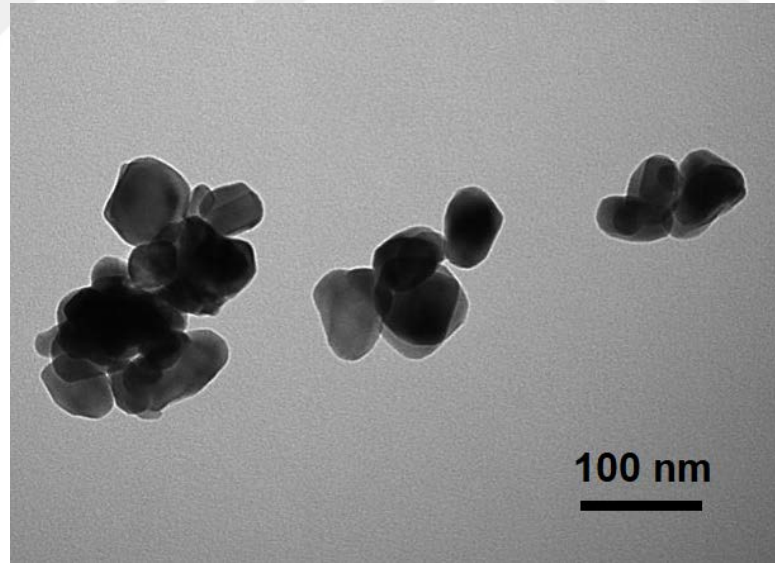
Şekil 3.13 Nano WO₃ parçacıkların HT yöntemle sentezinin şematik gösterimi

Nano tungsten oksitlerin ortalama parçacık boyutları solvotermal yöntemle sentezlenen Bi₂O₃ nano parçacıklarında olduğu gibi hem XRD deseni hem de TEM görüntüleri ile tespit edilmiştir. Sentezlenen nano WO₃ tozunun XRD deseni 20° < 2θ < 60° aralığında Şekil 3.14'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14 Sentezlenen nano WO₃'ün parçacıklarına ait XRD deseni

Ticari nano WO₃ toza ait XRD deseninde olduğu gibi, HT yöntemle sentezlenen WO₃ nano toz için de 2θ 'nın 23.1°, 23.6°, 24.4°, 33.6° ve 34.1°'e eşit olduğu değerlerde Bragg kırınım zirveleri gözlenmiştir. Bu bakımdan sentezlenen tungsten oksit tozun yine JCPDS No: 32-1395 kartıyla uyumlu olarak monoklinik WO₃ kristal yapısıyla eşleştiği görülmüştür [77]. Yapılan Debye-Scherrer analizi ise WO₃ parçacıklarının ortalama tane boyutunun 44 nm olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.15 Sentezlenen Nano WO₃ parçacıklarına ait TEM görüntüsü

Debye-Scherrer analizince öngörülen ortalama boyutu değeri, Şekil 3.15'de verilen TEM görüntüsü ile de doğrulanmıştır. Şekil 3.15'e göre ST yöntemle sentezlenen nano WO₃ parçacıkların çaplarının büyük çoğunlukla 50 nm ve daha altında olduğu görülmüştür.

3.2 Kompozitlerin Hazırlanışı

Bu tez çalışmasında hazırlanan kompozitleri, katkı yapılan parçacık türüne göre ikiye, katkıların parçacık boyutu dağılımına göre üç kısma ayırarak kategorize etmek mümkündür. Epoksi matrisine yüksek atom numaraları ve radyasyon zırhlama kabiliyetleri sebebiyle bizmut ve tungsten elementleri katkılandırılmak istenmiştir. Bu iki elementi büyük oranda içeren Bi_2O_3 ve WO_3 bileşiklerinin kütlece farklı oranlarda epoksi matrisine katılması suretiyle kompozitler hazırlanmıştır. Katkılandırılan metal oksitler boyut dağılımı açısından üç sınıfa ayrılmıştır. İlgili dağılımlar, ticari olarak mikro ve nano boyuttaki katkılar ile HT veya ST metotlarla sentezlenmiş nano oksit katkılardır. Mikro katkılarda takviye elamanlarının ağırlıkça yüzdeleri %5-%30 arasında değişirken; nano takviyeler bu oran %2,5 ile %20 arasında tutulmuştur. Mikro katkılar nano katkılara kıyasla daha yüksek ağırlık yüzdelerinde tutulması, belirli bir mikro katkıda (örneğin %5'de) elde edilen radyasyon perdeleme performansının daha düşük bir nano katkıda (örneğin %2,5'da) elde edilip edilemeyeceğinin tespitine olanak sağlamaktadır. Böylece nano parçacık kullanımının avantajına vurgu yapma imkânı hâsıl olabilecektir. Ayrıca, nano parçacık katkılarında ağırlıkça yüksek oranlara çıkıldığında topaklanma riskinin de artacağı göz önünde bulundurularak; nano parçacık katkıları ağırlıkça %20 ile sınırlandırılmıştır.

Tablo 3.3 Hazırlanan kompozitlerde takviye parçacık yüzdeleri

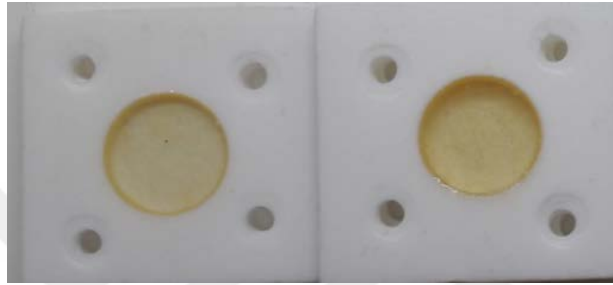
Katkı Parçacığı	Katkı Yüzdeleri				
	2,5	5	10	20	30
$\mu\text{-WO}_3$		X	X	X	X
n- WO_3 (ticari)	X	X	X	X	
n- WO_3 (HT)	X	X	X	X	
$\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$		X	X	X	X
n- Bi_2O_3 (ticari)	X	X	X	X	
n- Bi_2O_3 (ST)	X	X	X	X	

Tablo 3.3'de Tez çalışmasında üretilen tüm kompozitlerin takviye parçacık içerikleri verilmiştir. Saf epoksi matrisinin ve söz konusu 24 kompozitin

hazırlanışına ilişkin detaylar ile kompozitlere ait bazı fiziksel özellikler sırasıyla Kısım 3.3.1 ve 3.3.2’de verilmiştir.

3.2.1 Saf Epoksinin Hazırlanışı

Saf epoksi matrisinin üretiminde epoksi reçine ve sertleştirici sonrasında 2:1 oranında birleştirilmek üzere önce ayrı ayrı kaplarda tartılmış ve sonrasında uygun kaplarda birleştirilerek 10 dakika süreyle karıştırılmıştır. Bu karıştırma işleminin ardından reçine-sertleştirici karışımı kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3.16 Saf epoksi matrislerin teflon kalıplarda çekilmiş fotoğrafları

Epoksilerin kalıplara yapışmaması için Şekil 3.16’da gösterildiği gibi 10 mm ve 20 mm derinlikli 17,8 mm çaplı silindirik teflon kalıplar kullanılmıştır. Teflon kalıplardaki karışımın sertleşmesi için karışım 24 saat süreyle vakum ortamında ve oda sıcaklığında tutulmuştur. Sertleşme işlemini takiben, 10 mm ve 20 mm kalınlıkta silindirik numuneler elde edilmiştir. Burada iki farklı derinlikli teflon kalıp kullanılmak suretiyle, radyasyon ölçümlerinde kullanmak üzere iki farklı kalınlıkta örnek üretilmiştir.

3.2.2 Kompozitlerin Hazırlanışı

Epoksi ana matrisiyle hazırlanan tüm mikro ve nano yapıları kompozitler aynı üretim prosedürüyle üretilmiştir. Tablo 3.3’de verilen ağırlıkça katkı oranlarına göre kompozitlerin matris ve takviye elemanları hazırlanarak üretim süreci başlatılmıştır. İlk olarak takviye elemanı (Bi_2O_3 veya WO_3) metal oksit parçacıkları agat havanda öğütülerek tamamen ince toz haline getirilmiştir. Ardından beher kaplar içerisine aktarılan metal oksit tozlarına epoksi reçinesi eklenmiş ve karışım mekanik karıştırıcıda 15 dakika boyunca 1000 rpm hızında karıştırılarak metal

oksit tozlarının homojen biçimde dağılması sağlanmıştır. Bu karıştırma işlemini takiben epoksi sertleştiricisi, reçine-sertleştirici oranı olan 2:1 korunacak biçimde bu karışıma dâhil edilmiştir. Tekrar takviye elemanının bu karışım içinde homojen dağılmasını sağlamak amacıyla mekanik karıştırıcı kullanılarak 10 dakika tüm karışım yüksek hızda (1000 rpm) karıştırılmıştır. Sertleşme işlemi yaklaşırken kompozit karışımlar, Şekil 3.16’da görülen özel hazırlanmış teflon kalıplara dökülerek vakum altında 24 saat boyunca oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılmıştır. Böylelikle, saf epoksi matriste olduğu gibi, her kompozit için de homojen kuvvetlendirici parçacık dağılımına sahip 10 mm ve 20 mm kalınlıklı iki silindirik örnek üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin kütle yoğunlukları, kompozitlerin suda çözünmediği göz önüne alınarak, Arşimet prensibine göre daldırma sıvısı su kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Hazırlanan saf epoksi matris ile mikro ve nano yapıları kompozitlerin kütle yoğunluklarını içeren bilgiler sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’ de verilmiştir. Ayrıca, saf kurşunun yoğunluğu referans değeri alınarak (%100) hazırlanan tüm örneklerin kurşuna göre yüzde ne kadar ağır oldukları $H(\%)$ parametresi ile tespit edilmiştir. $H(\%)$ parametresinin hesabı Denklem (3.2) uyarınca kurşunun yoğunluğu $11,342 \text{ g/cm}^3$ olarak alınarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerin $H(\%)$ değerleri Tablo 3.4’te verildiği gibidir.

$$H(\%) = \left(\frac{\rho_{malzeme}}{\rho_{kurşun}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Tablo 3.4 Epoksi/ μ -Bi₂O₃ ve Epoksi/ μ -WO₃ kompozitlerinin kütle yoğunlukları ve kurşuna göre göreceli ağırlıkları

Malzeme	ρ (g/cm ³)	H (%)
Kurşun	11,342	100
Epoksi	1,123	9,901
Epoksi/%5 μ -Bi ₂ O ₃	1,151	10,148
Epoksi/%10 μ -Bi ₂ O ₃	1,187	10,465
Epoksi/%20 μ -Bi ₂ O ₃	1,278	11,267
Epoksi/%30 μ -Bi ₂ O ₃	1,340	11,814
Epoksi/%5 μ -WO ₃	1,141	10,059
Epoksi/%10 μ -WO ₃	1,213	10,694
Epoksi/%20 μ -WO ₃	1,353	11,929
Epoksi/%30 μ -WO ₃	1,517	13,375

Tablo 3.5 Nano boyutta metal oksit katkıli kompozitlerin kütle yoğunlukları ve kurşuna göre göreceli ağırlıkları

Malzeme	ρ (g/cm ³)	H (%)	Malzeme	ρ (g/cm ³)	H (%)
Kurşun	11,342	100	Epoksi	1,123	9.901
Epoksi/%2,5 ht-Bi ₂ O ₃	1,151	10,148	Epoksi/%2,5 n-Bi ₂ O ₃	1,107	9,760
Epoksi/%5 ht-Bi ₂ O ₃	1,170	10,465	Epoksi/%5 n-Bi ₂ O ₃	1,137	10,024
Epoksi/%10 ht-Bi ₂ O ₃	1,210	11,267	Epoksi/%10 n-Bi ₂ O ₃	1,176	10,368
Epoksi/%20 ht-Bi ₂ O ₃	1,335	11,814	Epoksi/%20 n-Bi ₂ O ₃	1,302	11,479
Epoksi/%2,5 ht-WO ₃	1,178	10,059	Epoksi/%2,5 n-WO ₃	1,159	10,218
Epoksi/%5 ht-WO ₃	1,168	10,694	Epoksi/%5 n-WO ₃	1,196	10,544
Epoksi/%10 ht-WO ₃	1,225	11,929	Epoksi/%10 n-WO ₃	1,236	10,897
Epoksi/%20 ht-WO ₃	1,365	13,375	Epoksi/%20 n-WO ₃	1,340	11,814

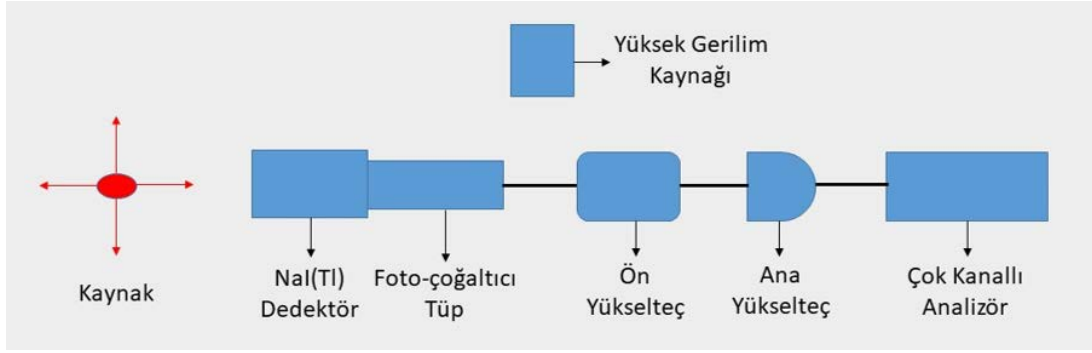
Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’deki örneklerin kurşuna göre göreceli ağırlıkları değerlendirildiğinde, sentezlenen numunelerin ağırlık bakımından kurşundan en az %86 daha hafif olduğu görülmüştür.

3.3 Radyasyon Zırhlama Ölçümü

Bu bölümde örneklerin radyasyon zırhlama performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan deneysel ve Monte Carlo simülasyonuna dayanan yöntemler iki ana başlık altında açıklanmıştır. İlk kısımda malzemelerin gama spektroskopisi ile deneysel olarak radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği ile deney düzeneğindeki cihaz ve yazılım bileşenlerinin tanıtımı yapılmış; deneysel hesaba ilişkin detaylar verilmiştir. İkinci kısımda ise Monte Carlo Monte Carlo simülasyonuna ait geometri, malzeme türleri ve dedektör bilgileri sunulmuştur.

3.3.1 Deneysel Ölçüm Sistemi

Tez çalışmasının deneysel radyasyon ölçümleri Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Nükleer Spektroskopi Laboratuvarında yapılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen radyasyon zırhlama ölçümlerinde gama spektroskopisi kullanılmıştır. Gama spektroskopisi genellikle bir malzemenin radyoaktivitesini ve radyoizotopların yoğunluğunu tayin etmede kullanılan bir yöntemdir. Spektroskopi sistemi bir dedektör, buna bağlı elektronik sistemler (fotoçoğaltıcı tüp, yükselticiler analog-digital sinyal dönüştürücü ve çok kanallı analizör gibi) ve yazılımın kurulu olduğu bir bilgisayardan oluşur. Bu spektroskopinin temel hedefi, detektörden gelen sinyallerin işlenmesiyle oluşan ve enerji soğurulmasına karşılık gelen sinyaller için spektrumdaki zirvelerin analizinin yapılmasıdır. Sistem ölçüm yaparken oluşabilecek istenmeyen gürültüleri ve sayımları engellemek için, çeşitli koruyucu kolimatörler ve zırhlarla çevrilidir. Şekil 3.17’ de ölçüm spektroskopisinin şematik gösterimi verilmiştir.

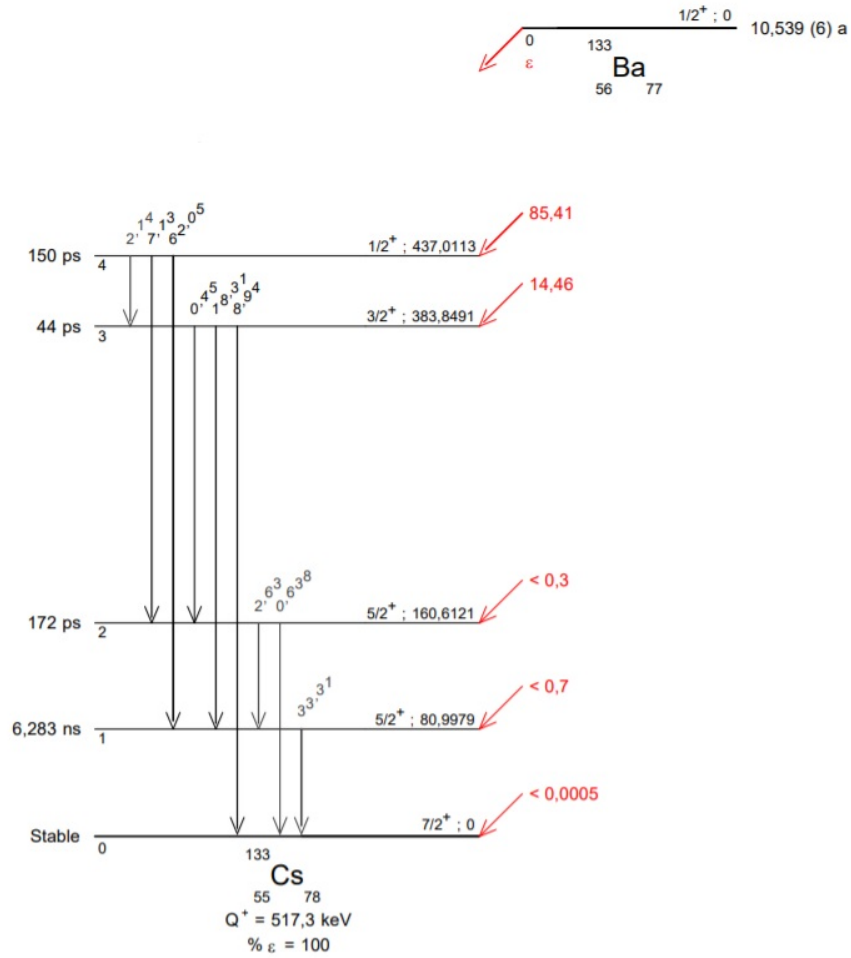


Şekil 3.17 Gama spektroskopisi şematik gösterimi

Ölçümlerde kullanılan NaI(Tl) dedektörünün çalışma prensibi tipik bir sintilatör dedektöründe olduğu gibidir. Talyumla aktive edilen sodyum iyodür dedektörü bir sintilasyon (küçük bir ışık ışıldaması) üreterek gama ışınına tepki verir. Sintilasyon, fotonun enerjisi ile uyarılan elektronlar uyarılmış durumdan tabanduruma geri döndüğünde ortaya çıkar. Dedektör kristali, ışıldamayı bir elektrik pulsuna çeviren bir foto-çoğaltıcı tüpüne (PMT) monte edilir. Foto katodun ilk sinyali çok küçüktür ve büyük bir sinyal elde etmek için sinyal bir dizi dinot ile güçlendirilir. Deneysel ölçümlerde kullanılan NaI(Tl) sintilasyon dedektörü 3x3 inç boyutlarında olup ORTEC marka 905-4 modeldir. İlgili dedektörün arka kısmına bağlı ORTEC 276 model bir ön yükseltici bulunmaktadır. Ön yükselticiden çıkan sinyal, ORTEC 672 model ana yükselticiye gelmekte ve burada sinyal yükseltilerek ve sinyal şekillendirmesi yapılmaktadır. Yükselticiden çıkan sinyaller analog-dijital sinyal dönüştürücü (ADC) vasıtasıyla bilgisayar içindeki 2048 kanaldan oluşan ara-yüzey kartına gelmekte ve sonrasında ORTEC marka 927 ASPEC MCA model çok-kanallı analizör ekranında bir spektrum olarak gözlenmektedir. Analizör ise, MAESTRO adlı bilgisayar yazılım programı ile kontrol edilmektedir [83]. Dedektör sistemine bağlı olan PMT, digiBASE (Ortec) marka olup, 6,3 cm çapında ve 8,0 cm uzunluğundadır. PMT, NaI(Tl) kristalinden 5 mm kalınlığında bir cam pencere ile ayrılmıştır [41].

Üretilen kompozitlerin düşük, orta ve yüksek enerjili gama ışınlarını zırlama kabiliyetlerinin belirlenebilmesi için Baryum-133 (Ba-133), Sezyum-137 (Cs-137) ve Kobalt-60 (Co-60) olmak üzere üç noktasal radyoaktif kaynak tercih edilmiştir. İlgili radyoaktif kaynaklara ait detaylar aşağıda özetlendiği gibidir:

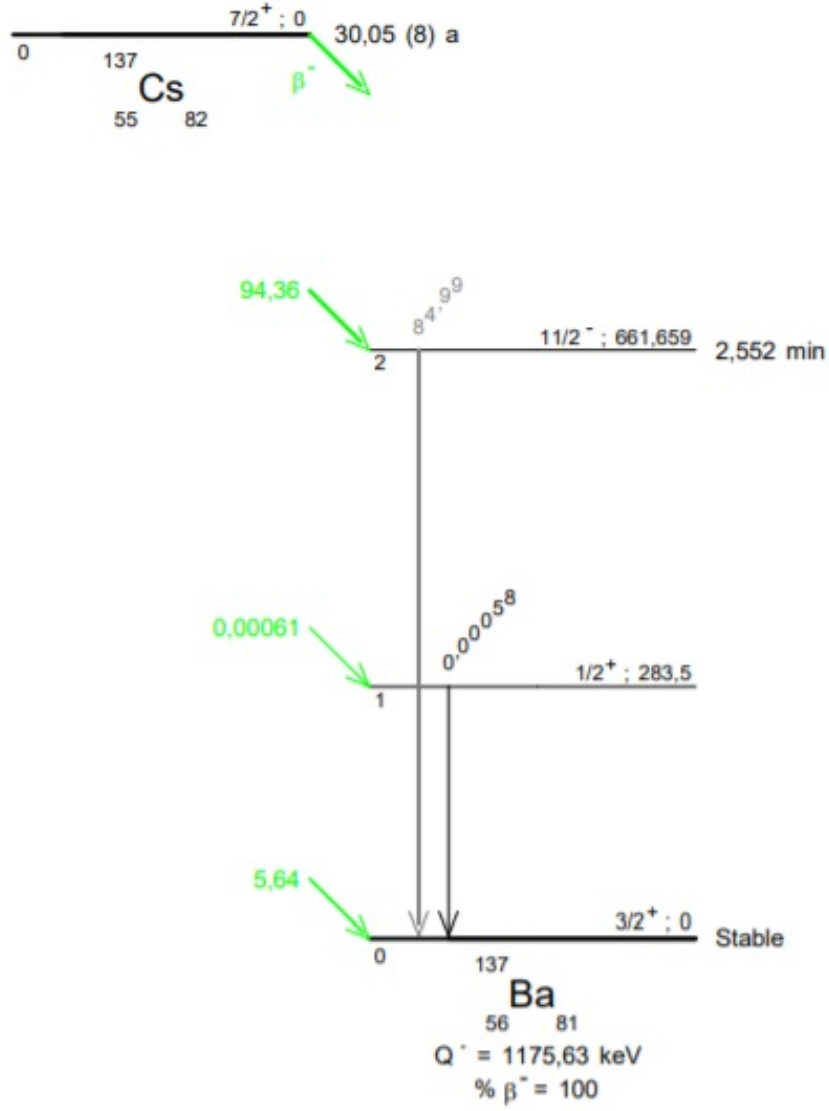
Ba-133 Kaynağı: Deneylerde kullanılan radyoaktif çekirdekler arasında bozunma şeması en karmaşık olanı Ba-133 çekirdeğidir. Ba-133 radyoaktif çekirdeği tamamen elektron yakalama olayıyla Cs-133 radyoizotopunun uyarılmış enerji seviyelerine bozunur. Bozunma sonucunda farklı yayınlanma olasılıklarıyla birlikte yaklaşık 25 keV ile 277 keV arasında enerjiye sahip elektronlar yayınlanır. Yayınlanma olasılığı en yüksek olan gamalar ise 81 keV, 303 keV, 356 keV ve 384 keV enerjilerine sahiptir. Yarı ömrü yaklaşık 10,55 yıl olan Ba-133 çekirdeğinin bozunma şeması Şekil 3.18’de verilmiştir. Deneysel ölçümlerde kullanılan Ba-133 radyoaktif kaynağın aktivitesi 0,1 μCi olup; zırlama ölçümleri için 81 keV ve 356 keV foton zirve enerji değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.18 Ba-133 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [84]

Cs-137 Kaynağı: Cs-137, uranyum ve plütonyum gibi radyoaktif çekirdeklerin nötronları soğurmasıyla ve nükleer fisyon reaksiyonu sonucunda kendiliğinden

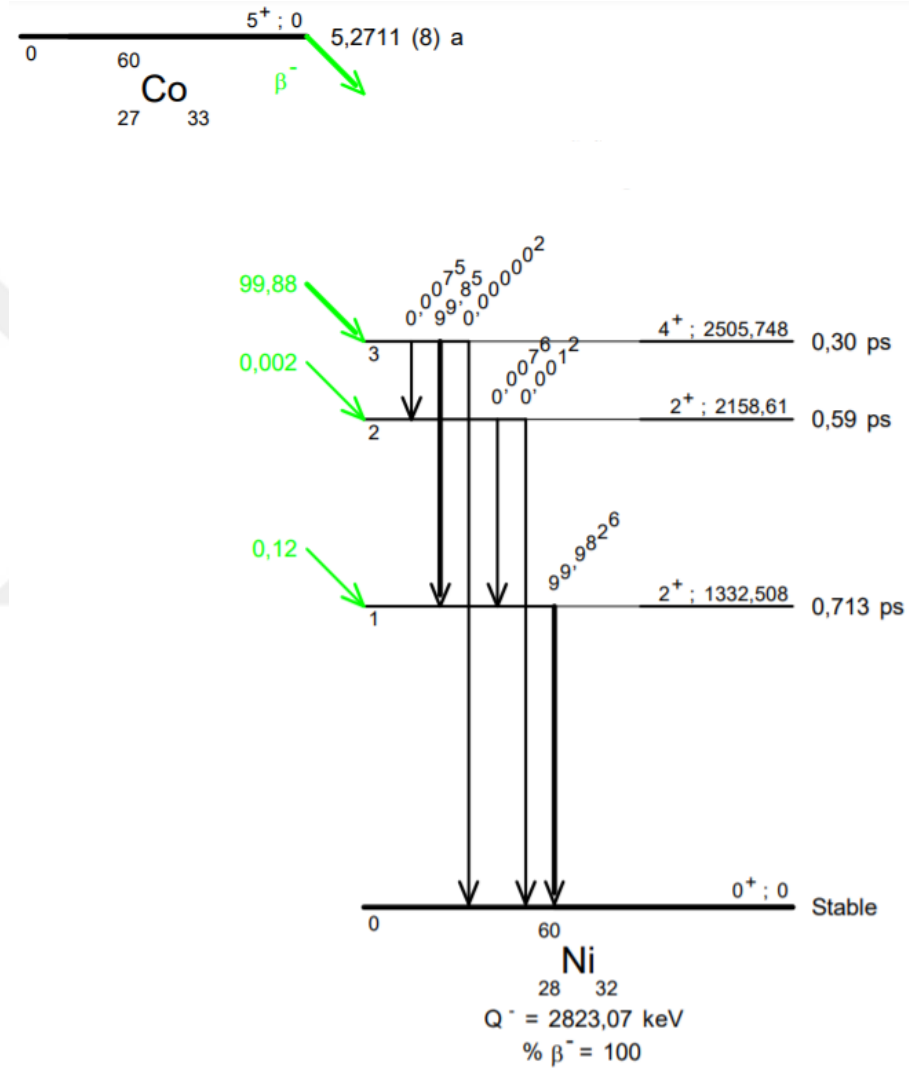
üretilir. Bu sebeple, Cs-137 bir reaktör veya atom bombasında uranyum ve plütonyumun nükleer fisyonu veya bölünmesi meydana geldiğinde ortaya çıkan yaygın bir radyoaktif çekirdektir. Cs-137 radyoaktif çekirdeğinden buğday, baharat, un ve patates gibi gıda ürünlerinin sterilizasyonunda faydalanıldığı gibi, seviye-kalınlık ölçer ve nem yoğunluğu ölçüm cihazları gibi çok farklı endüstriyel aletlerde de Cs-137 kullanılmaktadır. Bunların dışında Cs-137 ayrıca hastanelerde tanı ve tedavi için kalibrasyon kaynağı olarak yaygın olarak kullanılırken; tıbbi ekipman sterilizasyonunda da tercih edilmektedir [85]. Yarı ömrü yaklaşık 30,17 yıl olan Cs-137 çekirdeğinin bozunma şeması Şekil 3.19'da gösterildiği gibidir. Verilen bozunma şeması uyarınca, Cs-137 yaklaşık %95 olasılıkla beta bozunması yaparak Baryum-137 izomerine dönüşür. Bu bozunma sonucunda foton zirve enerjisi 662 keV olan gama radyasyonu salınır. Deneysel ölçümlerde kullanılan Cs-137 radyoaktif kaynağın aktivitesi 0,1 μCi olup; zırhlama ölçümleri için 662 keV foton pik enerji değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.19 Cs-137 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [86]

Co-60 Kaynağı: Radyoaktif olmayan kobalt, çeşitli minerallerde doğal olarak bulunmaktadır. Ayrıca, kobaltın uzun süredir seramik ve camlar için mavi renklendirici olarak kullanıldığı bilinmektedir. Radyoaktif Co-60 ise, bir nükleer reaktörde kararlı kobaltın nötronlarla bombardıman edilmesi suretiyle üretilir ve tıptan endüstrinin pek çok alanına kadar kendine has kullanım alanlarına sahiptir. Tıbbi kullanımı esas olarak kanser radyoterapisi bölümlerindeyken; radyoaktif Co-60 alet sterilizasyonunda ve yiyecekleri ısınlamakta da kullanılmaktadır. Yarı ömrü yaklaşık 5,26 yıl olan Co-60 çekirdeğinin bozunma şeması Şekil 3.20’de verilmiştir. Buna göre Co-60 farklı enerjilerde ve ihtimallerde beta radyasyonu yayınlarak Nikel-60 radyoaktif çekirdeğine dönüşür. Her beta bozunmasının

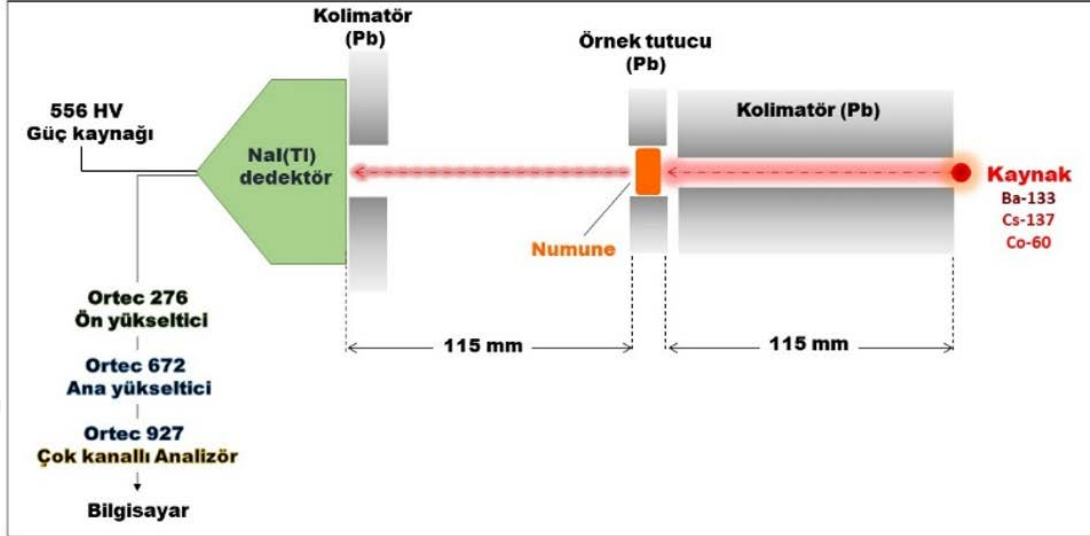
ardından Ni-60'ın uyarılmış enerji düzeylerinden değişik enerjilerde gama radyasyonu salınarak Ni-60 temel enerji düzeyine geçer. Şekil 3.20 incelendiğinde gerçekleşme ihtimali en yüksek olan geçişler 1173 keV ve 1332 keV enerjilerindeki gama salınımlarını içeren geçişlerdir [87]. Deneyisel ölçümlerde kullanılan Ba-133 radyoaktif kaynağın aktivitesi $0,1 \mu Ci$ olup; zırlama ölçümleri için 1173 keV ve 1332 keV foton zirve enerji değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.20 Co-60 radyoaktif kaynağının bozunum şeması [88]

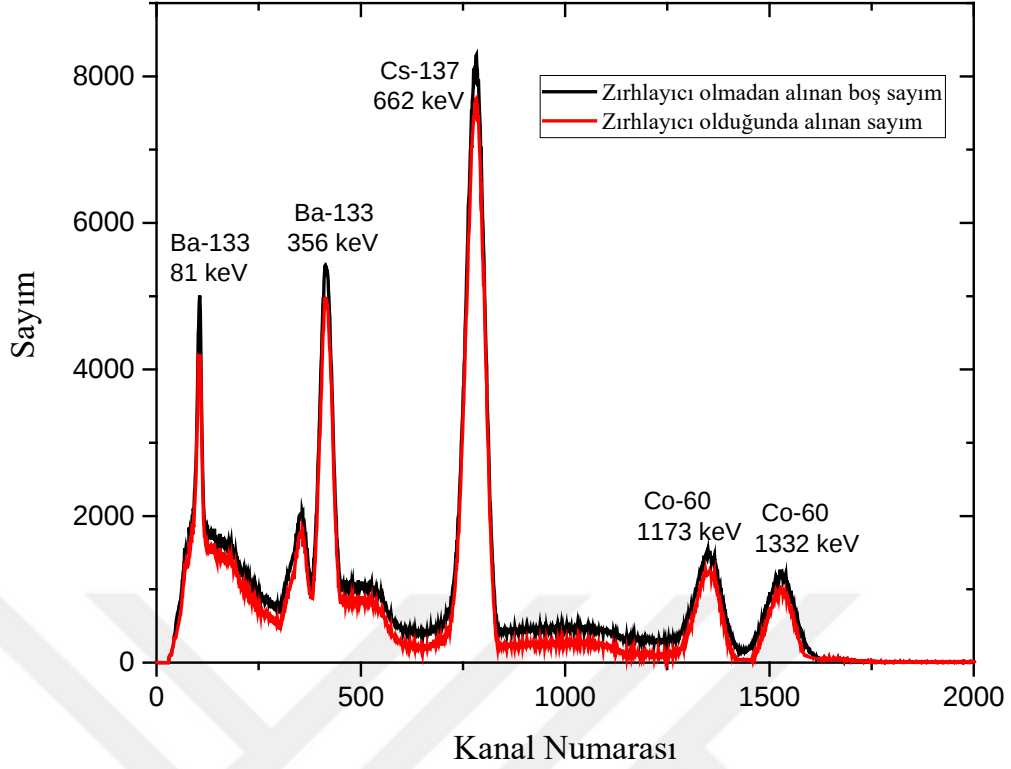
Deneyisel ölçümlerde kullanılan geometriye değinilecek olunursa, ölçümler transmisyon geometrisinde gerçekleştirilmiş olup; aynı eksen üzerinde kaynak-numune-dedektör dizilimiyle hazırlanan bir deney düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi ise Şekil 3.21'de verilmiştir.

Şekilden de görüleceği üzere, radyoaktif kaynak ile numune ve numune ile dedektör arası mesafe 115 mm olarak ayarlanmış ve bu mesafeler arasında kurşun kolimatörler kullanılarak dar demet geometrisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.21 Zırhlama ölçüm geometrisinin şematik gösterimi

Deneysel ölçümler her numune için ölçüm hata değerini azaltmak için üç kez tekrar edilmiş ve her ölçüm 1200 saniye sürmüştür. Ayrıca, örneklerin hazırlanış kısmında da belirtildiği gibi, iki farklı kalınlıktaki aynı takviye parçacığına ve aynı ağırlık yüzdesine sahip örnekler için ölçümler tekrar edilmiştir. Bu noktadan ortalama alınarak, lineer azaltma katsayısı hesabı yapılmıştır. Ölçüme başlamadan önce ortamda radyoaktif kaynak deney sisteminden uzaklaştırılmış ve ortamın kendi boş sayımı alınmıştır. Bu değerler background (art ortam) sayımı olarak kayıt edilmiş; ardından dedektör ve radyasyon kaynağı arasında hiçbir radyasyon perdeleyici malzeme yokken ölçümler alınarak, her bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan gama ışınlarının şiddeti olan I_0 değerleri belirlenmiştir. Ardından sentezlenen saf epoksi ve epoksi temelli kompozitler Şekil 3.21’de gösterildiği gibi kaynak ile dedektör arasına yerleştirilerek sayımlar alınmıştır. Tüm ölçüm işlemleri yapıldıktan sonra başlangıçtaki background sayımının tüm sayımlar üzerindeki düzeltmeleri yapılmıştır. Sentezlenen örneklerden biri için, kaynak ve dedektör arası boş iken ve numune varken yapılan ölçümlere ait spektrum görüntüsü Şekil 3.22’ de verilmiştir.

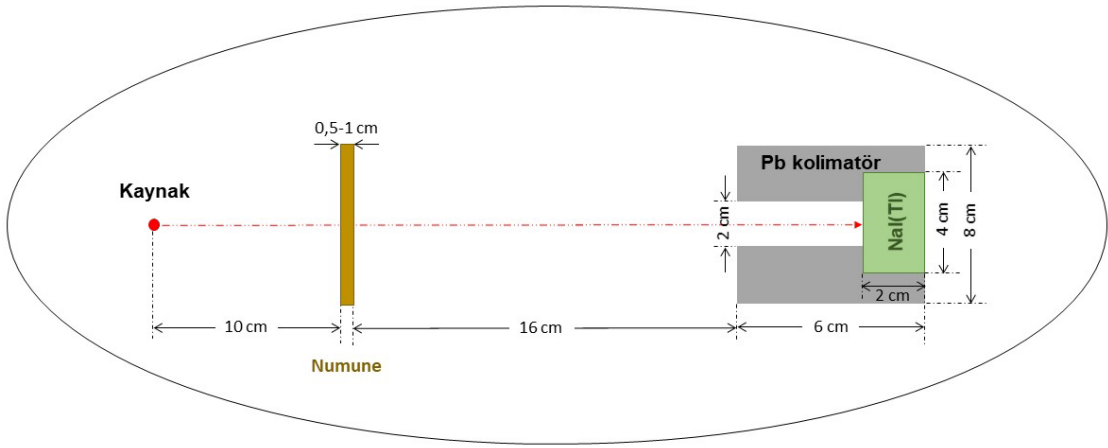


Şekil 3.22 Boş ve zırhlıyıcı varken yapılan ölçümlerin gama spektrum örneği

Yukarıda anlatıldığı üzere, tüm sayım düzeltmeleri yapıldıktan sonra radyoaktif kaynakların foto-zirvelerinin altında kalan net sayımlar hesaplanmıştır. Deneysel olarak numunelerin lineer azaltma katsayılarını belirleyebilmek için bu sayım değerleri Beer-Lambert kanununa uygulanmıştır. Bu aşamada boş alınan sayım değerleri formüldeki I_0 kısmına girilirken numune varken alınan sayım değerleri kısmına yazılmıştır. Bu sonuçlara göre tüm numunelerin lineer azaltma katsayıları deneysel olarak belirlenmiş ve ardından bu parametreye bağlı olarak HVL, TVL ve MFP gibi diğer zırlama parametreleri hesaplanmıştır.

3.3.2 Monte Carlo Simülasyon Yöntemi

İlgili malzemelere ait radyasyon zırlama parametrelerinin hesaplanması için MCNP v6.2© kullanılmıştır. Simülasyon geometrinin oluşturulması için ©Visual Editor v6.1 kullanılmıştır. Oluşturulan örneklerin kütle zayıflatma katsayılarının (μ/ρ) tayini için transmisyon geometrisi kullanılmıştır. Transmisyon geometrisi kaynak, numune ve kolime edilmiş dedektör olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 MNCP6 simülasyon geometrisinin genel görüntüsü

Öncelikli olarak 100 cm yarıçaplı küresel çalışma uzayı oluşturulmuştur. Dış dünyadaki fiziksel etkileşimleri ihmal ederek simülasyon doğruluğunu artırmak, ve hesaplama süresini ise kısaltmak çalışma uzayı oluşturmanın temel hedefidir.

C cell card

1 0 -1 \$ Hücre Kartı

C surface card

1 so 100 \$ Küresel Yüzey Kartı

Kürenin içi çeşitli saçılmaları engellemek ve birincil foton akısını dikkate almak amacı ile vakum olarak seçilmiştir.

Çalışma uzayı içerisinde öncelikli olarak noktasala yakın küresel kaynak tanımlanmıştır. Kaynak çapı 0,2 cm olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak hazırlanmış olan (saf epoksi, Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozit malzemeleri) MCNP simülasyonunda kaynaktan 10 cm uzaklıkta 4 cm yarıçaplı 0,5 cm ve 1 cm kalınlığında silindirik geometrisine ayrı ayrı atanmıştır.

C cell card

2 m* -d* 2 -3 -4 imp:p=1 \$ Hücre Kartı

C surface card

2 px 10

3 px 10.5

4 cx 4 \$ Küresel Yüzey Kartı

m*: her bir kompozite aite materyal içeriğini içeren materyal kodu

d*: ilgili materyalin g/cm^3 cinsinden yoğunluğu

Transmisyon geometrisinde en önemli noktalardan bir tanesinde detektöre yalnızca birincil fotonların ulaştırılmasıdır. Simülasyon şartlarında bunun sağlanması amacı ile dış yarıçapı 4 cm, iç boşluk yarıçapı 1 cm olan silindirik şekilde bir kurşun kolimatör, dedektörün üst kısmına yerleştirilmiştir.

C cell card

3 1 -11.34 8 -6 -4 #4 #5 imp:p=1

C surface card

4 cx 4
5 px 30
6 px 32
7 cx 2
8 px 26

Dedektör geometrisi silindir şeklinde ve Sodyum iyodür (NaI) materyaline sahip olacak şekilde modellenmiş olup kolimatörün alt kısmına yerleştirilmiştir.

C cell card

4 3 -3.67 5 -6 -7 imp:p=1

C surface card

4 cx 4
5 px 30
6 px 32
7 cx 2
8 px 26

Tüm geometrik hacim boyunca akının hesaplanabilmesi için detektöre “F4 tally” ataması yapılmıştır.

C Data Card

f4:p 4
e4 0.01 98i 1

Ayrıca kaynak ile ilgili enerji, parçacık tipi, yayılım yönü gibi özellikler “sdef” kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Buna göre kaynak hücresi için “cell”, parçacık tipi için “par”, radyasyon enerjisi için “erg” kodları kullanılmış olup foton yayılım yönü için “vec” ile “axs” kodları kullanılmıştır.

C Data Card

sdef erg*= par=2 rad*= vec=1 0 0 axs= 1 0 0 dir=1

erg*: üretilen monoenerjitik fotonların enerjisi (MeV cinsinden)

rad*: üretilen fotonların saçılım doğrultuları

Simülasyonlar öncelikle numune olmaksızın her bir enerji için ayrı ayrı gerçekleştirilerek başlangıç foton akısı ölçülmüştür. Ardından ilgili numuneler yerleştirilerek yine ayrı ayrı simülasyonlar çalıştırılarak zırhlamaya uğrayan foton akısı belirlenmiştir. Tüm simülasyonlar “nps” kodu kullanılarak tüm istatistiksel testleri geçmesi amacı ile 10^6 kez koşturulmuştur.

C Data Card

nps 1000000

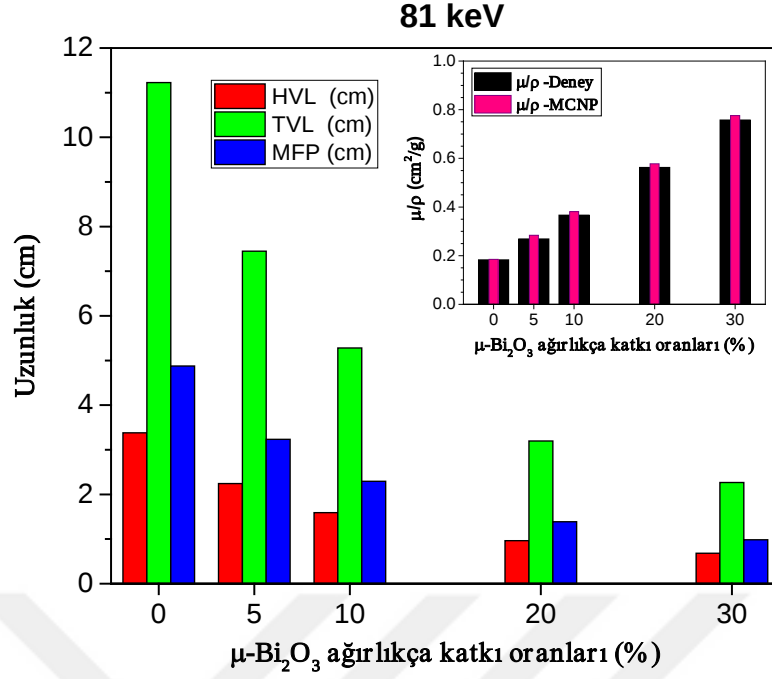
Bu bölümde, üretilen kompozitlerin deneysel ve simülasyona dayalı olarak tespit edilmiş olan radyasyon zırhlama parametreleri sunulmaktadır. Numunelerin zırhlama performansları kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değeri çerçevesinde ele alınmıştır. Bu bağlamda, örneklerin radyasyon zırhlama performanslarına ait bulgular hem deneysel hem de MCNP simülasyon verileri ile birlikte mikro boyutlu parçacık katkı epoksi kompozitler, ticari nano boyutlu parçacık katkı epoksi kompozitler ve sentezlenen nano partiküller ile katkılандırılmış epoksi kompozitler olmak üzere üç ana başlık altında sunulmuştur.

4.1 Mikro Katkılı Kompozitler

Ağırlıkça %5 ile %30 arasında değişen miktarlarda mikro boyutlarda Bi_2O_3 ve WO_3 takviye içeren epoksi temelli kompozitlerin deneysel ve MCNP simülasyonundan elde edilen radyasyon zırhlama parametreleri üç radyoaktif kaynaktan yayınlanan 81 keV, 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar için sırasıyla Kısım 4.1.1 ve 4.1.2’de verilmiştir. Ayrıca, ilgili mikro katkıların epoksi matrisin radyasyon zırhlamasını ne derece iyileştirdiğini belirtmek üzere referans olması açısından, saf epoksi matrisin hem deneysel hem de MCNP simülasyonu sonucu bulunan kütle zayıflatma katsayısı, HVL, TVL ve MFP değerleri de ilgili grafik ve tablolarda %0 katkı olarak gösterilmiştir.

4.1.1 Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitler

81 keV radyasyon enerjisi için saf epoksi ve mikro bizmut oksit katkı epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP simülasyonu ile hesaplanmış radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.1’de verilmiştir. İlgili grafik; deneysel kütle azaltma katsayısı, HVL, TVL ve MFP kritik uzunlukları ile MCNP simülasyonundan elde edilmiş kütle azaltma katsayısı verilerini içermektedir.



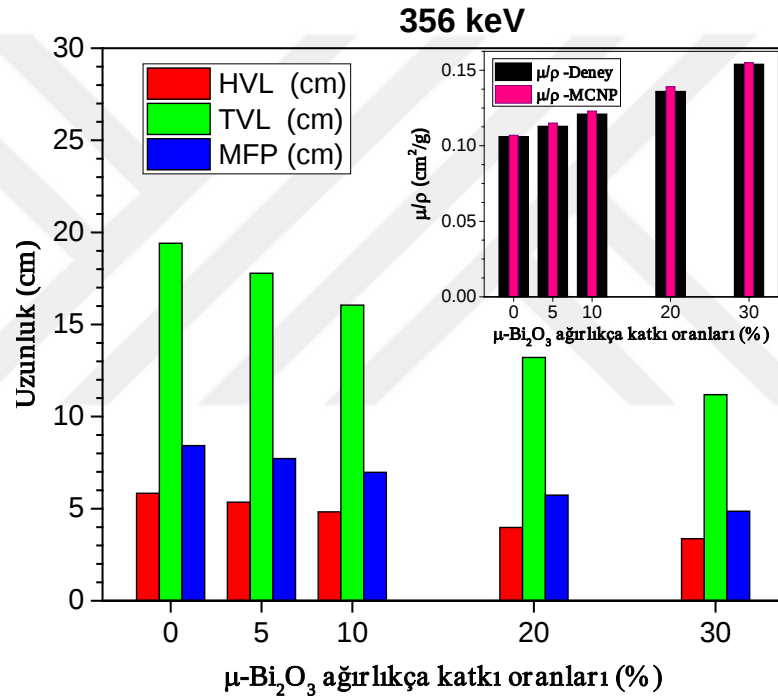
Şekil 4.1 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.1’de verilen 81 keV enerjiye karşılık gelen sonuçlardan, artan mikro bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin hiyerarşik olarak arttığı görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri %47 artarken en yüksek Bi_2O_3 katkısında ise bu artış %310 seviyesindedir. Ayrıca, bu enerjide MCNP simülasyonu sonucu elde edilen kütle azaltma katsayısı değerleriyle deneysel μ/ρ değerlerinin her mikro Bi_2O_3 katkısında büyük ölçüde uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Şöyle ki, deneysel ve MCNP μ/ρ değerleri arasında katkı oranlarına bağlı olarak %1,1-%5,3 arasında fark olduğu belirlenmiştir. μ/ρ değerlerindeki bu % farkların yaklaşık olarak sayısal değeri $\pm 0,018 \text{ cm}^2/\text{g}$ mertebesinde dir.

Şekil 4.1’de verilen diğer zırlama parametreleri incelendiğinde, saf epoksi için HVL değeri 3,379 cm iken; %30 Bi_2O_3 katkısında bu değer 0,682 cm’e kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık %34 azalırken; en yüksek Bi_2O_3 katkısında saf epoksiye göre bu oran %80 seviyelerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, Bi_2O_3 katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde de azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 11,226 cm iken %30 Bi_2O_3 katkılı kompozitin TVL değeri 81

keV için dramatik bir şekilde düşerek 2,266 cm'e gerilemiştir. TVL'de olduğu gibi, kompozitlerin MFP değerleri ise saf epoksiye göre bizmut oksit katkısının artışıyla birlikte kademeli bir azalma göstermiştir. Örneğin %30 Bi₂O₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin MFP değerinin yaklaşık beşte biri kadardır. Tüm bu bulgular, mikro Bi₂O₃ katkısının epoksinin radyasyon zırhlama performansını geliştirdiğine işaret etmektedir.

Gelen foton enerjisi 356 keV'a yükseldiğinde, ilgili saf epoksi ve mikro bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP simülasyonuna dayalı radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.2'de gösterildiği gibi olmuştur.



Şekil 4.2 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.2' de verilen 356 keV enerjiye karşılık gelen sonuçlara göre, artan mikro bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/p değerinin kademeli olarak arttığı görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük Bi₂O₃ katkısında deneysel μ/p değeri yaklaşık olarak %7 artarken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında ise bu artış %45 seviyesindedir. Ayrıca, MCNP simülasyonunun μ/p sonuçlarıyla deneysel sonuçların bu foton enerjisi için de uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Öyle ki, deneysel ve MCNP μ/p değerleri arasında bu kez fark aralığı %0,6-%2,2

olurken, bu farkın karşılık geldiği değer değişimi $\pm 0,003 \text{ cm}^2/\text{g}$ mertebesinde olmuştur.

Şekil 4.2’de gösterilen diğer zırhlama parametreleri de incelendiğinde, saf epoksi için HVL değeri 5,841 cm iken %30 Bi_2O_3 katkısında HVL’nin 3,369 cm’ye düştüğü gözlenmiştir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık %8 azalırken en yüksek Bi_2O_3 katkısında saf epoksiye göre bu oran yaklaşık olarak % 42 seviyesindedir. Benzer şekilde, Bi_2O_3 katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 19,408 cm iken %30 Bi_2O_3 katkılı kompozitin TVL değeri belirgin şekilde düşerek 11,193 cm olarak tespit edilmiştir. Kompozitlerin MFP değerleri ise saf epoksiye göre azalmıştır. Örneğin, %30 Bi_2O_3 katkısıyla birlikte, kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık yarısına inmiştir.

Şekilde 4.1 ve 4.2 ‘de 81 keV ve 356 keV enerjili fotonlar için örneklerin MCNP simülasyonuna dayalı olarak sadece μ/ρ sonuçları verilmiştir. Tablo 4.1’de ise, hem MCNP μ/ρ sonuçları hem de MCNP simülasyonu ile elde edilen HVL, TVL ve MFP değerlerinin tamamı sunulmuştur.

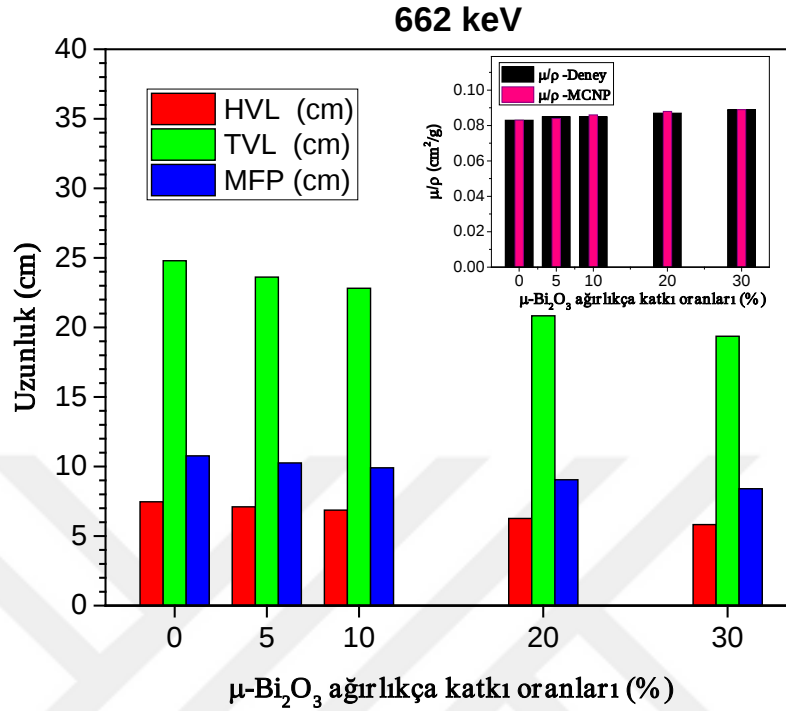
Tablo 4.1 81 ve 356 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri

Malzeme	81 keV				356 keV			
	μ/ρ (cm^2/g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	μ/ρ (cm^2/g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,185	3,332	11,072	4,809	0,107	5,781	19,208	8,342
Ep./ %5 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,284	2,123	7,053	3,063	0,115	5,229	17,375	7,546
Ep./ %10 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,381	1,531	5,088	2,210	0,123	4,752	15,789	6,857
Ep./ %20 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,578	0,937	3,114	1,352	0,139	3,906	12,979	5,637
Ep./ %30 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,776	0,666	2,213	0,961	0,155	3,343	11,106	4,823

Tablo 4.1’deki verilerin artan mikro bizmut oksit katkısıyla değişimi de deneysel verilerde olduğu gibi artan epoksi için Bi_2O_3 katkısıyla güçlenen bir radyasyon zırhlamasını doğrular niteliktedir.

Tez çalışmasında kullanılan bir diğer radyoaktif kaynak olan Cs-137’den yayınlanan 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve mikro bizmut oksit katkılı

epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP yöntemleriyle hesaplanmış radyasyon zırlama parametreleri ise Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

662 keV enerjisi için Şekil 4.3’de verilen sonuçlara istinaden mikro bizmut oksit katkısıyla birlikte epoksinin μ/ρ değerinin arttığı ama bu artışın önceki foton enerjilerine kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri %2,41 artarken; en yüksek Bi_2O_3 katkısında ise bu artış %7,23 seviyesinde kalmıştır. Ayrıca 662 keV enerjisinde de, MCNP simülasyonundan ve deneysel çalışmadan elde edilen μ/ρ sonuçlarının büyük ölçüde uyum içinde olduğu görülmektedir. Deneysel ve MCNP μ/ρ değerleri kıyaslandığında, katkı oranlarına bağlı olarak aralarındaki farkın %0,1-%1,19 arasında kaldığı ve farkın maksimum $\pm 0,001 \text{ cm}^2/\text{g}$ seviyesinde olduğu görülmüştür.

Şekil 4.3’deki diğer zırlama parametrelerine bakıldığında, mikro bizmut oksit katkısının ilgili kritik uzunlukları belli bir oranda kısalttığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 7,464 cm olan HVL değerinin %30 mikro Bi_2O_3 katkısıyla 5,828 cm’ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında

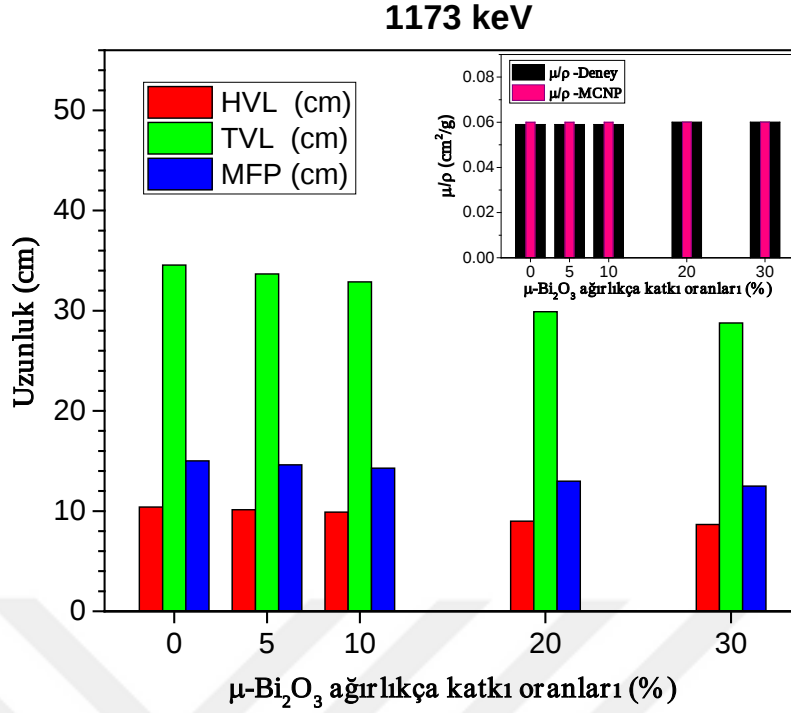
deneysel HVL değeri yaklaşık %4,8 azalırken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran %22 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. Yine mikro Bi₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte, TVL değerlerinde de beklenildiği gibi azalışlar kaydedilmiştir. En büyük azalış %30 Bi₂O₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin 662 keV enerjili fotonlar için TVL değeri 24,801 cm iken; ilgili kompozitin TVL değeri aynı enerjide 19,364 cm olarak ölçülmüştür. Kompozitlerin MFP değerleri ise saf epoksiye göre yine azalma eğilimi göstermiştir. Örneğin, %30 Bi₂O₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,78 katına karşılık gelen 8,41 cm olarak tespit edilmiştir.

Şekilde 4.3'den de görüldüğü üzere, ilgili grafikte 662 keV enerjili fotonlar için örneklerin MCNP simülasyonuna dayalı olarak sadece μ/ρ sonuçları verilmiştir. Tablo 4.2'de ise, MCNP simülasyonundan elde edilen μ/ρ sonuçları diğer radyasyon zırhlama parametreleri (HVL, TVL ve MFP) ile birlikte gösterilmiştir. Tablo 4.2'deki veriler de Şekil 4.3'deki verilerle uyumlu bir şekilde, artan bizmut oksit katkıyla birlikte kütle azaltma katsayısında sınırlı oranda bir artışı ve kritik uzunluklarda da benzer şekilde kısıtlı bir azalışı işaret etmektedir.

Tablo 4.2 662 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ μ -Bi₂O₃ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri

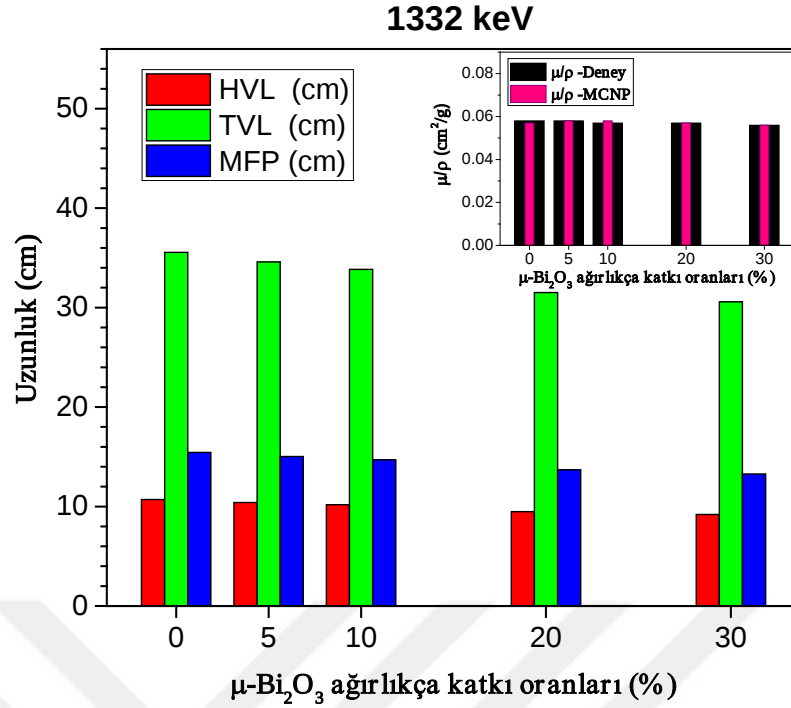
Malzeme	662 keV			
	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,083	7,451	24,757	10,752
Ep./ %5 μ -Bi ₂ O ₃	0,084	7,144	23,737	10,309
Ep./ %10 μ -Bi ₂ O ₃	0,086	6,827	22,685	9,852
Ep./ %20 μ -Bi ₂ O ₃	0,088	6,186	20,554	8,927
Ep./ %30 μ -Bi ₂ O ₃	0,089	5,785	19,220	8,347

Şekil 4.4'de ise Co-60 kaynağından yayınlanan 1173 keV enerjili fotonların saf epoksi ve mikro bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerce ne kadar perdelenebileceğine ilişkin deneysel ve MCNP yöntemleriyle hesaplanmış radyasyon zırhlama parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.4 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

1173 keV enerji için elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; mikro oksit bizmut katkısı %30 olsa bile epoksinin μ/ρ değerinin artışı çok sınırlı kalmaktadır. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri %0,2 artarken; en yüksek Bi_2O_3 katkısında bu artış %1,69 seviyesini geçememiştir. Buna bağlı olarak deneysel HVL, TVL ve MFP değerlerinde de kayda değer azalışlar gözlenememiştir. Radyoaktif Co-60'ın yayınladığı 1332 keV enerjili gama radyasyonu içinse saf epoksi ve mikro Bi_2O_3 katkılı epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP simülasyonu ile hesaplanmış radyasyon zırlama parametreleri Şekil 4.5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.5 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

1332 keV enerjili fotonların saf epoksi ve mikro bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerce ne oranda zayıflatılabildiğini gösteren Şekil 4.5'deki sonuçlar değerlendirildiğinde, 1000 keV üzeri enerjili fotonlar için epoksi matrise yüksek oranda Bi_2O_3 katkısı yapılsa bile, epoksinin radyasyon zırhlama özelliğinde kayda değer bir gelişme elde edilemediği tespit edilmiştir.

Tablo 4.3 1173 ve 1332 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri

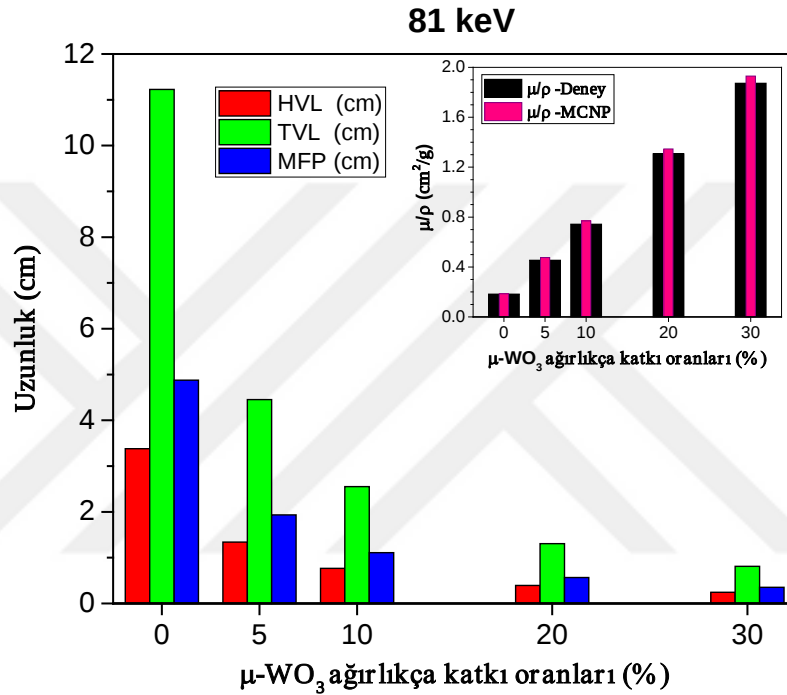
Malzeme	1173 keV				1332 keV			
	μ/ρ (cm²/g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	μ/ρ (cm²/g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,060	10,304	34,238	14,869	0,057	10,795	35,866	15,577
Ep./ %5 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,060	10,044	33,373	14,494	0,058	10,383	34,500	14,983
Ep./ %10 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,060	9,728	32,324	14,038	0,058	10,076	33,479	14,540
Ep./ %20 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,060	9,002	29,910	12,990	0,057	9,542	31,705	13,769
Ep./ %30 $\mu\text{-Bi}_2\text{O}_3$	0,060	8,583	28,519	12,386	0,056	9,160	30,435	13,218

Tablo 4.3'de de MCNP simülasyonu ile elde edilen μ/ρ , HVL, TVL ve MFP değerleri 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar için verilmiştir. Gerek Tablo 4.3 gerekse de

Şekil 4.4 ve 4.5'deki kütle azaltma katsayısı değerleri incelendiğinde, MCNP verileriyle deneysel verilerin uyumlu olduğu görülmektedir.

4.1.2 Epoksi/ μ -WO₃ kompozitler

Saf epoksi ve mikro tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin 81 keV radyasyon enerjisi için deneysel ve MCNP simülasyonu ile hesaplanmış radyasyon zırlama parametreleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



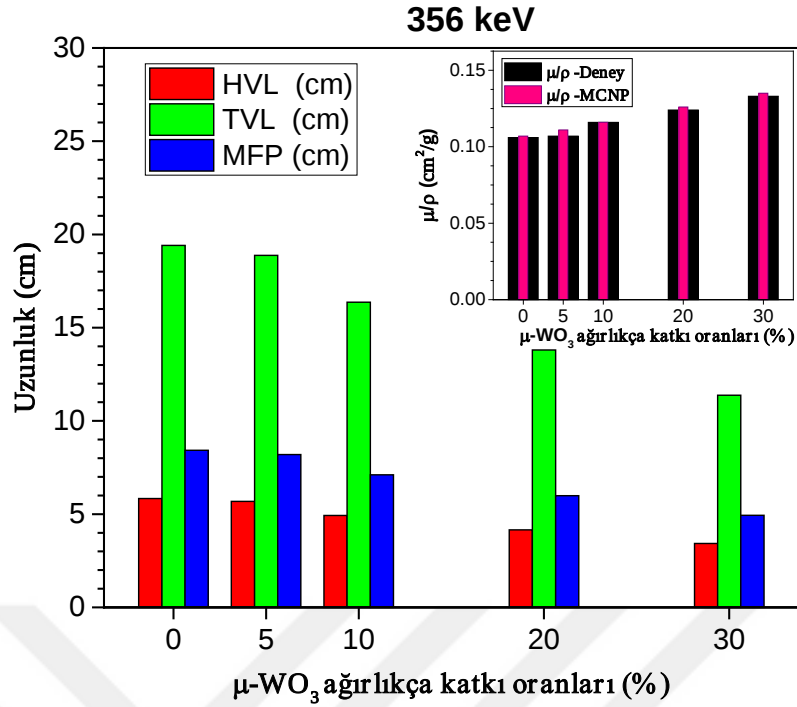
Şekil 4.6 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin mikro WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.6'da verilen 81 keV enerjiye karşılık gelen sonuçlardan, artan mikro tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin hiyerarşik olarak arttığı görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında deneysel μ/ρ değeri %148 artarken en yüksek WO₃ katkısında ise bu artış %923 seviyesindedir. Ayrıca, mikro bizmut oksit katkısında olduğu gibi, bu enerjide ve mikro tungsten oksit katkısı durumunda da, MCNP simülasyonu sonucu hesaplanan μ/ρ değerlerinin deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmektedir. Şöyle ki, deneysel ve MCNP μ/ρ değerleri arasında katkı oranlarına bağlı olarak %1,1-%4,4 arasında fark

olduğu belirlenmiştir. μ/ρ değerlerindeki bu farkların maksimum olarak $\pm 0,057$ cm^2/g 'ye karşılık geldiği görülmüştür.

Şekil 4.6'daki diğer zırlama parametreleri için elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, saf epoksinin 3,379 cm için HVL değerinin % 30 WO_3 katkısıyla birlikte %93 kısalarak 0,244 cm'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. . Ayrıca, saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında bile deneysel HVL değerinin %60 azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, saf epoksinin 81 keV enerjili fotonlar için TVL değeri 11,226 cm iken; epoksi WO_3 mikro parçacıklarla katkılандırıldığında TVL değeri dramatik bir şekilde düşerek 0,811 cm'e kadar gerilemiştir. TVL'de gözlemlendiği gibi, kompozitlerin MFP değerleri ise saf epoksiye göre oldukça düşük değerler alarak, 81 keV enerjili fotonlar için etkin bir radyasyon perdelemeyi işaret etmektedir. Örneğin Epoksi/%30 $\mu\text{-WO}_3$ kompozitin MFP değeri saf epoksinin MFP değerinin yaklaşık %7 değerine kadar inmiştir. Eldeki bu bulgular, mikro WO_3 katkısının da epoksinin radyasyon perdeleme performansını iyileştirdiğini işaret etmektedir.

356 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve mikro tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP simülasyonuna dayalı radyasyon zırlama parametreleri Şekil 4.7'de gösterildiği gibi olmuştur.



Şekil 4.7 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.7'deki hem deneysel hem de MCNP simülasyonundan elde edilen kütle azaltma katsayısına ait veriler, 356 keV enerjili fotonlara karşı artan mikro tungsten oksit katkısıyla birlikte saf epoksinin μ/ρ değerinin özellikle %10 WO₃ katkısından sonra kademeli olarak arttığını göstermektedir. Saf epoksiye göre %5 mikro WO₃ katkısında deneysel μ/ρ değeri yaklaşık olarak %1 artarken en yüksek mikro WO₃ katkısı olan %30'da bu artış %25 seviyesine ulaşmıştır. Ayrıca, Şekil 4.7'deki iç grafikten de görüleceği üzere, MCNP simülasyonunca öngörülen ve deneysel olarak tespit edilen μ/ρ değerleri birbirine son derece yakındır. Öyle ki, deneysel ve MCNP μ/ρ değerleri arasındaki maksimum fark $\pm 0,004$ cm²/g mertebesinde olmuştur.

Şekil 4.7'de gösterilen deneysel HVL, TVL ve MFP zırhlama parametreleri incelendiğinde de, mikro tungsten oksit katkısının saf epoksinin radyasyon perdelemesi üzerine olumlu etkilerini yansıttığı görülmektedir. Öyle ki; saf epoksi için HVL değeri 5,841 cm iken bu değer %30 WO₃ katkısı durumunda %41 oranından azalarak HVL'nin 3,424 cm'ye düştüğü gözlenmiştir. Diğer taraftan, en düşük WO₃ katkısı olan %5 içinse epoksinin HVL'sindeki azalış sadece %3

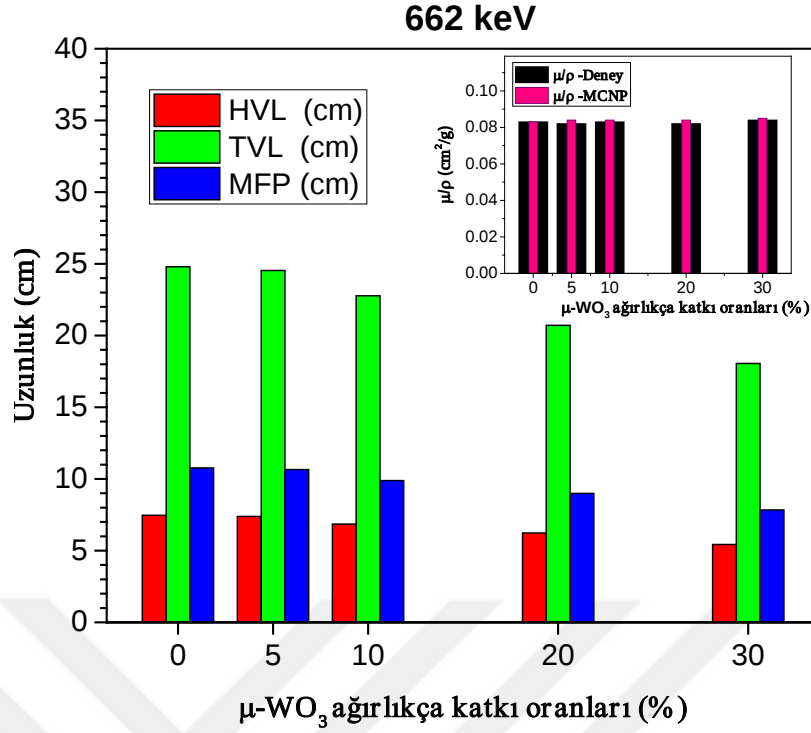
olabilmektedir. HVL’de gözlenen eğiliminin bir benzeri olarak, saf epoksinin TVL değerinin artan mikro WO₃ katkısıyla azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma eğilimi saf epoksi için 19,408 cm olarak kaydedilmiş TVL değerinin %30 mikro WO₃ katkısında 11,376 cm’ye düşmesiyle gözlenmiştir. HVL ve TVL’de gözlenen trendin aynısı kendini artan mikro tungsten oksitle azalan MFP parametresinde de göstermektedir. %30 mikro WO₃ katkısıyla birlikte saf epoksinin MFP değeri %60’ına inmiştir.

Tablo 4.4 81 ve 356 keV enerjide saf epoksi ile Epoks/ μ -WO₃ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri

Malzeme	81 keV				356 keV			
	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,185	3,332	11,072	4,809	0,107	5,781	19,208	8,342
Ep./ %5 μ -WO ₃	0,476	1,276	4,241	1,842	0,111	5,452	18,115	7,867
Ep./ %10 μ -WO ₃	0,770	0,743	2,467	1,071	0,116	4,924	16,361	7,105
Ep./ %20 μ -WO ₃	1,346	0,381	1,265	0,549	0,126	4,076	13,544	5,882
Ep./ %30 μ -WO ₃	1,930	0,237	0,786	0,342	0,135	3,393	11,275	4,897

Şekilde 4.6 ve 4.7’de Ba-133 radyoaktif kaynağından yayınlanan 81 keV ve 356 keV enerjili fotonlar için hazırlanan örneklerin MCNP simülasyonuna dayalı olarak sadece μ/ρ sonuçları verilmiştir. Tablo 4.4’de ise, MCNP simülasyonu aracılığıyla elde edilen tüm radyasyon zırhlama parametrelerinin değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4’de verilen MCNP’ye dayalı kütle azaltma katsayısı, HVL, TVL ve MFP parametreleri de artan mikro tungsten oksit katkısının epoksinin artan radyasyon perdelemesini destekler niteliktedir. Kullanılan bir diğer radyoaktif kaynak olan Cs-137’den yayınlanan 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve mikro tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel ve MCNP yöntemleriyle hesaplanmış radyasyon zırhlama parametreleri ise Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri

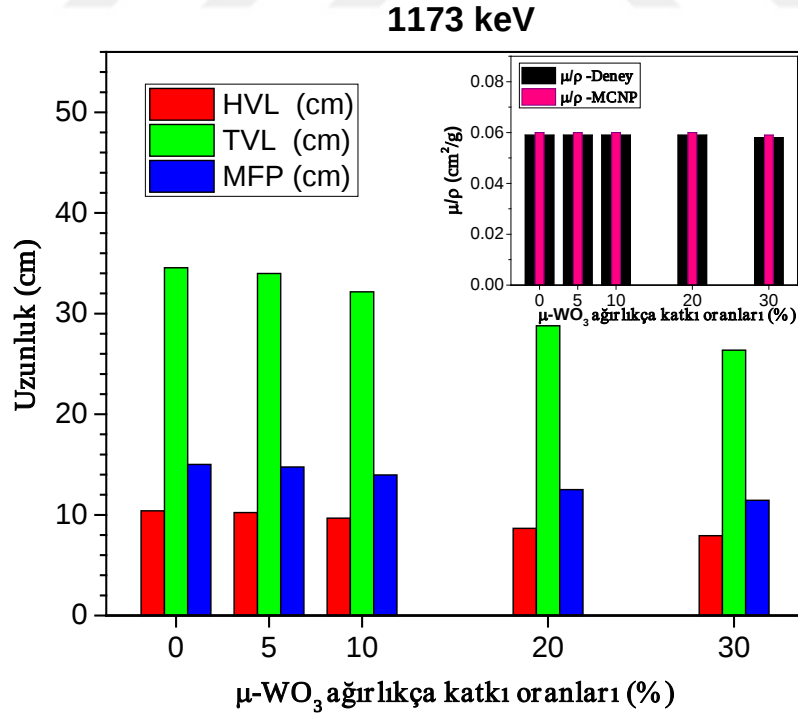
Şekil 4.8’de verilen sonuçlara istinaden mikro tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin hemen hemen hiç artmadığı görülmüştür. Saf epoksiye kütlece hangi oranda katkı yapılırsa yapılsın kütle azaltma katsayısı saf epoksiye göre %1,20 civarında arttırılabilmektedir. Ayrıca bu enerjide, MCNP ile elde edilen μ/ρ sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel ve MCNP μ/ρ değerleri kıyaslandığında, katkı oranlarına bağlı olarak aralarındaki fark %1,18-%2,38 arasında kalmıştır. Şekil 4.8’deki diğer zırhlama parametrelerini kısaca değerlendirmek gerekirse, artan mikro tungsten oksit katkısının ilgili kritik uzunlukları kısıtlı bir şekilde azalttığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 7,464 cm olan HVL değerinin %30 mikro WO_3 katkısıyla 5,434 cm’ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık %1,1 azalırken; en yüksek WO_3 katkısında saf epoksiye göre bu oran %27 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. Yine mikro WO_3 katkı oranındaki artışla birlikte, TVL ve MFP değerlerinde de azalışlar kaydedilmiştir. İlgili uzunluklarda en büyük düşüş %30 WO_3 katkılı kompozitte tespit edilmiştir. 662 keV enerjili fotonlar için MCNP simülasyonundan elde edilen

radasyon zırlama parametreleri ise Tablo 4.5’de gösterilmiştir. Tablo 4.5’deki veriler de Şekil 4.8’deki verilerle uyumlu bir şekilde, artan katkıyla birlikte kütle azaltma katsayısında oldukça sınırlı bir artışı ve kritik uzunluklarda nispeten kayda değer bir azalışı işaret etmektedir.

Tablo 4.5 662 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ μ -WO₃ kompozitlerinin MCNP simülasyonu ile elde edilmiş radasyon zırlama parametreleri

Malzeme	662 keV			
	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,083	7,451	24,757	10,752
Ep./ %5 μ -WO ₃	0,084	7,257	24,113	10,472
Ep./ %10 μ -WO ₃	0,084	6,793	22,570	9,802
Ep./ %20 μ -WO ₃	0,084	6,069	20,165	8,757
Ep./ %30 μ -WO ₃	0,085	5,375	17,860	7,757

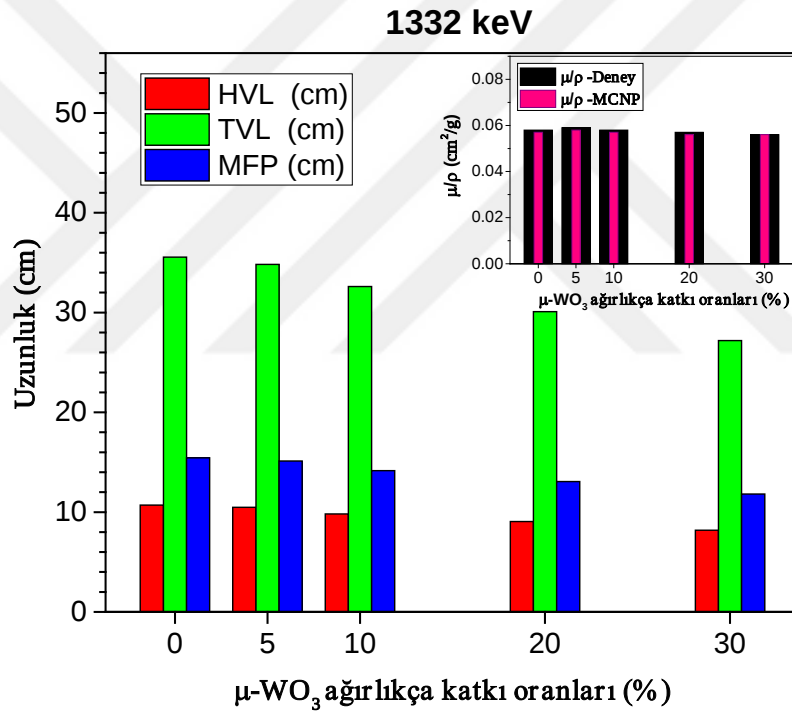
Şekil 4.9’de ise aynı örneklerin Co-60 kaynağından yayınlanan 1173 keV radasyon enerjili fotonlar için deneysel ve MCNP yöntemleriyle hesaplanmış radasyon zırlama parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.9 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radasyon zırlama parametrelerinin mikro WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.9'daki hem deneysel hem de MCNP kütle azaltma katsayı değerleri göstermiştir ki mikro tungsten oksit katkısı %30 olsa bile μ/ρ değerinin artışı çok sınırlı kalmaktadır. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri % 0,1 artarken en yüksek WO_3 katkısında ise artış olmamıştır. Buna bağlı olarak, deneysel HVL, TVL ve MFP değerlerinde de kayda değer azalışlar gözlenememiştir.

Son olarak, Şekil 4.10'da saf epoksi ve mikro WO_3 katkılı epoksi kompozitlerin Co-60 radyoaktif kaynağından yayınlanan 1332 keV enerjili fotonları perdeleme kabiliyetlerini yansıtan deneysel ve MCNP simülasyonu ile hesaplanmış radyasyon zırhlama parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 4.10 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin mikro WO_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.10'da verilen 1332 keV enerjiye karşılık gelen sonuçlar değerlendirildiğinde, 1000 keV üzeri enerjili fotonlar için epoksi matrise yüksek oranda WO_3 katkısı yapılsa bile, epoksinin radyasyon zırhlama özelliğinde kayda değer bir gelişme elde edilmemiştir.

Tablo 4.6 1173 ve 1332 keV enerjide saf epoksi ile Epoksi/ μ -WO₃ kompozitlerinin MCNP ile elde edilmiş radyasyon zırhlama parametreleri

Malzeme	1173 keV				1332 keV			
	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)	μ/ρ (cm ² /g)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
Epoksi (Ep.)	0,060	10,304	34,238	14,869	0,057	10,795	35,866	15,577
Ep./ %5 μ -WO ₃	0,060	10,102	33,564	14,577	0,058	10,460	34,755	15,094
Ep./ %10 μ -WO ₃	0,060	9,569	31,793	13,808	0,057	9,959	33,090	14,371
Ep./ %20 μ -WO ₃	0,060	8,542	28,381	12,326	0,056	9,098	30,231	13,129
Ep./ %30 μ -WO ₃	0,059	7,789	25,880	11,239	0,056	8,156	27,100	11,769

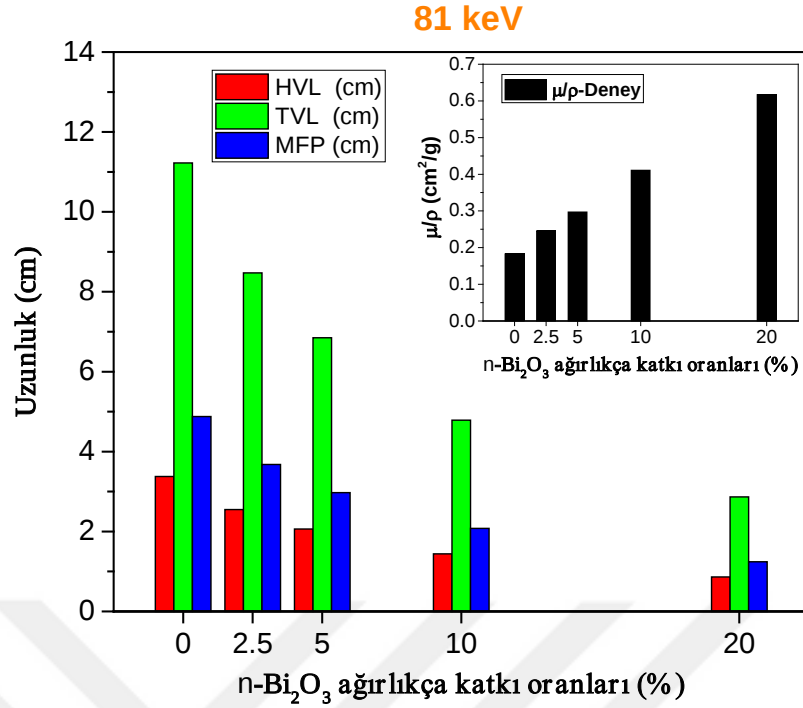
Tablo 4.6’da MCNP simülasyonu ile elde edilen μ/ρ , HVL, TVL ve MFP değerleri 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar için birlikte verilmiştir. Gerek Tablo 4.6 gerekse de Şekil 4.9 ve 4.10’daki kütle azaltma katsayısı değerleri incelendiğinde, MCNP verileri ile deneysel verilerin uyumlu olduğu görülmektedir.

4.2 Ticari Nano Katkılı Kompozitler

Ticari olarak temin edilen nano boyutlardaki Bi₂O₃ ve WO₃ metal oksitler epoksi matrisine ağırlıkça %5 ile %20 arasında değişen oranlarda katkılандırılmıştır. Hazırlanan kompozitlerin gama spektroskopisiyle ölçülen ve MCNP ile simüle edilen zırhlama parametreleri Kısım 4.2.1 ve 4.2.2’de verilmiştir. İlgili çalışmalarda üç radyoaktif kaynaktan yayınlanan 81 keV, 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar kullanılmıştır.

4.2.1 Epoksi/n-Bi₂O₃ kompozitler

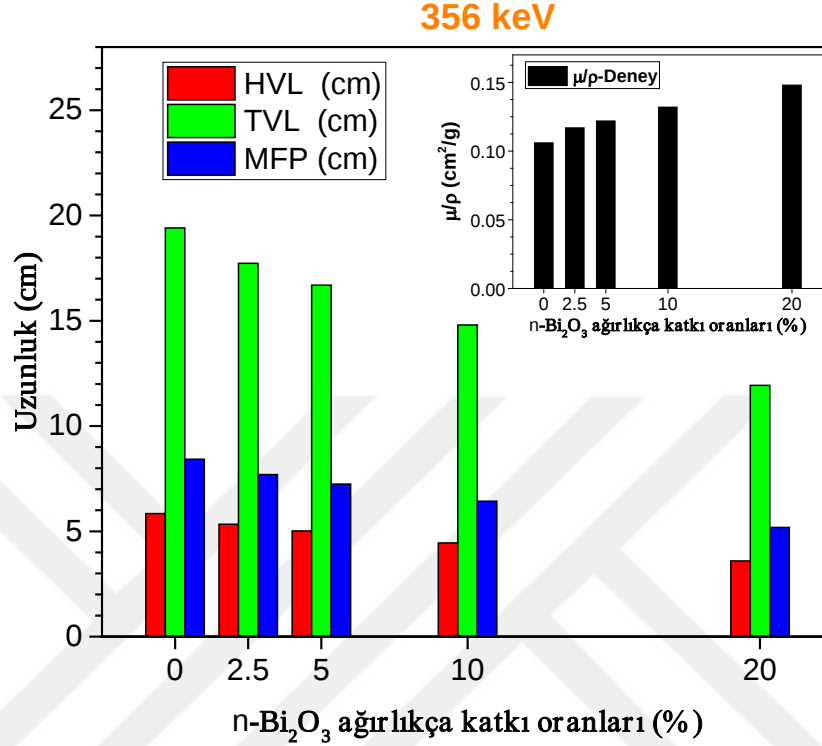
81 keV radyasyon enerjisi için saf epoksi ve ticari nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Bu parametreler; deneysel kütle azaltma katsayısı, HVL, TVL ve MFP kritik uzunluklarıdır.



Şekil 4.11 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.11’de verilen 81 keV enerjiye karşılık gelen sonuçlar, artan ticari nano bizmut oksit katkısıyla birlikte saf epoksi matrisin μ/ρ değerinin hiyerarşik olarak arttığını göstermiştir. Saf epoksiye göre en düşük Bi₂O₃ katkılı kompozitin deneysel μ/ρ değeri yaklaşık %35 artarken, en yüksek Bi₂O₃ katkısında ise bu artış %237 seviyesindedir. Şekil 4.11’deki diğer zırhlama parametreleri incelendiğinde, saf epoksi için HVL değeri 3,379 cm değerindeyken, %20 nano Bi₂O₃ katkısında bu değer 0,862 cm’e kadar düşmüştür. Saf epoksiye göre en düşük Bi₂O₃ katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık %25 azalırken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında bu oran %75 seviyelerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, Bi₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde de azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 11,226 cm iken %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitin TVL değeri 81 keV için dramatik bir şekilde düşerek 2,865 cm’e gerilemiştir. TVL’de olduğu gibi, kompozitlerin MFP değerleri de saf epoksiye göre azalma göstermiştir. Örneğin, %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık dörtte biri değerine inmiştir. Tüm bu bulgular, nano Bi₂O₃ katkısının epoksinin radyasyon zırhlama performansını geliştirdiğine işaret etmektedir.

Gelen foton enerjisi 356 keV'a yükseldiğinde, saf epoksi ve ticari nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.12' de verildiği gibidir.

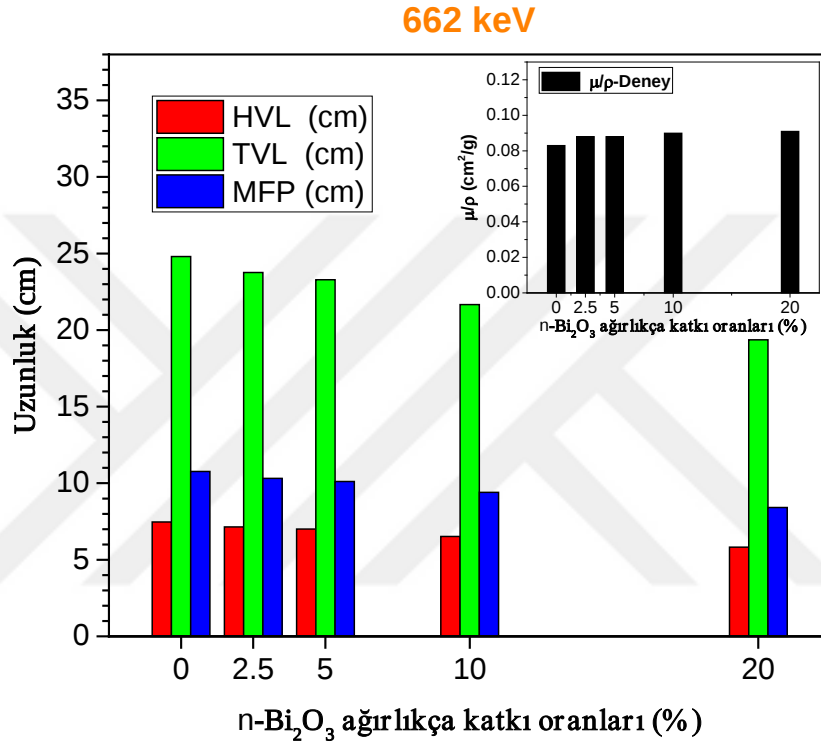


Şekil 4.12 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.12'de 356 keV enerjili fotonlar için elde edilen radyasyon zırlama parametrelerine göre, artan nano bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değeri 81 keV 'da olduğu gibi kademeli olarak artmış ama artış 81 keV'a nazaran daha az olmuştur. Öyle ki; saf epoksiye göre en düşük ticari nano Bi₂O₃ katkısında μ/ρ değeri yaklaşık olarak %10 artarken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında ise bu artış %40 olmuştur. Şekil 4.12'de gösterilen diğer zırlama parametreleri (HVL, TVL ve MFP) de artan Bi₂O₃ katkısıyla epoksinin güçlenen zırlama kabiliyetini işaret edererek azalma trendi sergilemektedir. Örneğin, saf epoksi için HVL değeri 5,841 cm iken %20 nano Bi₂O₃ katkısında HVL'nin 3,593 cm'ye düştüğü gözlenmiştir. Saf epoksiye göre en düşük nano Bi₂O₃ katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık % 9 azalırken en yüksek Bi₂O₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran yaklaşık olarak % 38 seviyesindedir. Diğer yandan, saf epoksinin TVL değeri 19,408 cm iken %20

ticari nano Bi_2O_3 katkılı kompozitin TVL değeri belirgin şekilde düşerek 11,937 cm olarak tespit edilmiştir. Son olarak, %20 nano Bi_2O_3 katkısıyla birlikte, MFP değerinde %40 azalma kaydedilmiştir.

Cs-137'den yayımlanan 662 keV enerjili fotonlar için ayn deneyler tekrar edildiğinde, saf epoksi ve ticari nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitler için elde edilen radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.13'de verildiği gibi olmuştur.

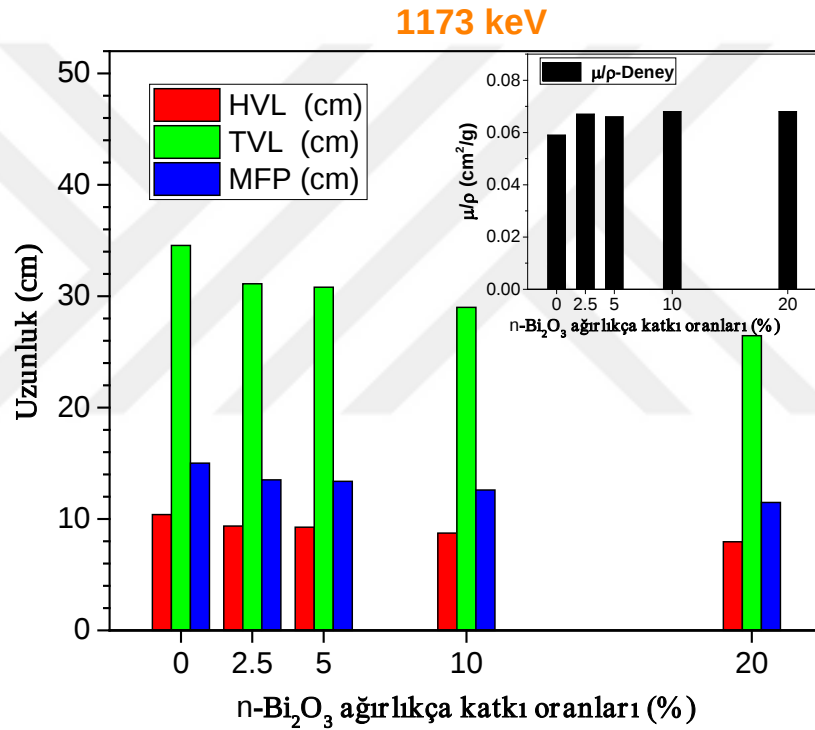


Şekil 4.13 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.13 ticari nano bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin diğer iki foton enerjisiyle kıyaslandığında daha yavaşça arttığını işaret etmekle birlikte; HVL, TVL ve MFP'de de yavaşlayan bir azalışı göstermektedir. μ/ρ değerindeki yavaşlayan artış kendisini saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında %6 ve en yüksek Bi_2O_3 katkısında ise %10 artış ile göstermektedir. Kütle zayıflatmadaki yavaş artışa paralel olarak, HVL ve TVL'deki kısıtlı azalış kendini saf epoksinin sırasıyla 7,464 cm ve 24,801 cm olan HVL ve TVL değerlerinin %20 ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla 5,829 cm ve 19,368 cm'ye düşmesi ile belli etmektedir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında HVL değeri yaklaşık %4 azalırken; en yüksek Bi_2O_3 katkısında saf

epoksiye göre bu oran %22 seviyelerinde olmuştur. Ayrıca kompozitlerin içerisinde bulunan Bi_2O_3 oranı arttıkça MFP değerlerinin düştüğü de açık bir şekilde görülmüştür. Örneğin, %20 Bi_2O_3 katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,78 katına karşılık gelen 8,41 cm olarak tespit edilmiştir. %20 ticari nano Bi_2O_3 katkısındaki bu MFP değerinin %30 mikro Bi_2O_3 katkısıyla elde edilen MFP değerine eşit olması dikkat çekici bir sonuçtur.

Şekil 4.14’de ise 1173 keV radyasyon enerjisine sahip Co-60 kaynağına ait saf epoksi ve ticari nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırlama parametreleri görülmektedir.

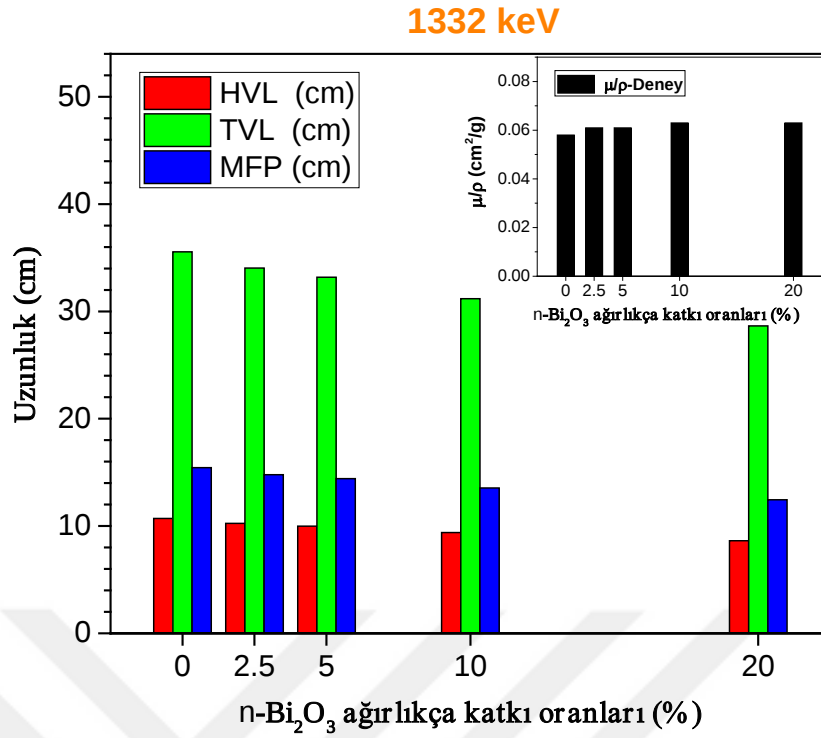


Şekil 4.14 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.14’de 1173 keV enerjiye karşılık gelen kütle azaltma katsayısı sonuçları göstermiştir ki; saf epoksiye yapılan ticari nano bizmut oksit katkısıyla kütle azaltma katsayısında az da olsa bir artış elde edilmiştir. Ancak katkı oranlarının artışıyla birlikte düzenli bir artma eğilimide elde edilememiştir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri %14 artarken en yüksek Bi_2O_3 katkısında bu artış %15 seviyesinde olmuştur. Şekil 4.14’deki diğer zırlama

parametrelerine bakıldığında, nano Bi_2O_3 katkısının kritik uzunlukları belli bir oranda azalttığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,401 cm olan HVL değerinin %20 ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla 7,961 cm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında HVL değeri yaklaşık %10 azalırken; en yüksek Bi_2O_3 katkısında saf epoksiye göre bu oran %23 seviyelerinde olmuştur. Yine nano Bi_2O_3 katkı oranındaki artışla birlikte, TVL değerlerinde de azalışlar kaydedilmiştir. En büyük azalış ise beklenildiği üzere %20 Bi_2O_3 katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 1173 keV için 34,559 cm iken ilgili kompozitin TVL değeri aynı enerjide 26,451 cm olarak ölçülmüştür. Kompozitlerin MFP değerleri de diğer iki kritik uzunlukta olduğu gibi saf epoksiye göre azalma davranışı sergilemiştir. Örneğin, %20 Bi_2O_3 katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,77 katına karşılık gelen 9,67 cm olarak tespit edilmiştir.

Co-60 radyoaktif kaynağından yayınladığı 1332 keV enerjili fotonlar içinse saf epoksi ve ticari nano Bi_2O_3 katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.15'de gösterildiği gibidir.



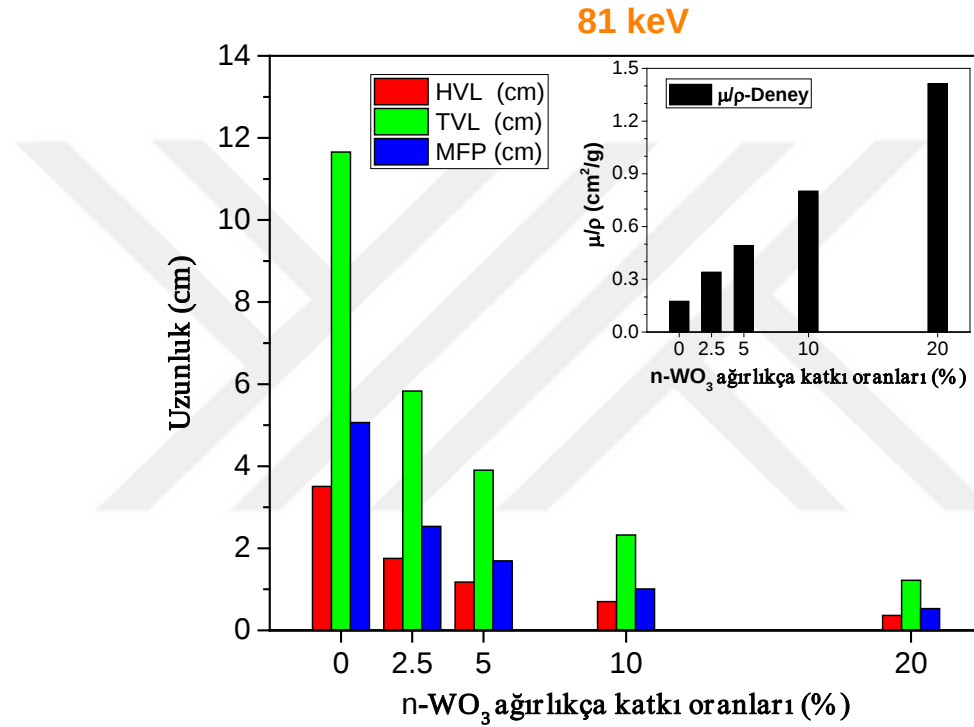
Şekil 4.15 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.15’den görüleceği üzere, 1173 keV enerjisinde gözlenen davranışlara benzer olarak 1332 keV enerjili fotonlar da ilgili kompozitlerce etkin bir biçimde zırlanamamıştır. Saf epoksiye göre nano bizmut katkılı kompozitler daha yüksek kütle azaltma katsayısı değerlerine sahip olsalar da farklı nano Bi₂O₃ katkı oranları arasında saf epoksiye kıyasla kayda değer farklar elde edilemiştir. En düşük Bi₂O₃ katkısında deneysel μ/ρ değeri %5,2 artarken en yüksek Bi₂O₃ katkısında bu artış %6,9 seviyesinde olmuştur. Şekil 4.15’deki diğer parametreler ele alındığında; ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla HVL, TVL ve MFP değerlerinin belli bir oranda azaldığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,701 cm olan HVL değerinin %20 ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla 8,624 cm’ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük Bi₂O₃ katkısında HVL değeri yaklaşık % 4 azalırken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran %19 seviyelerine kadar yükselebilmıştır. Yine nano Bi₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte, TVL değerlerinde azalışlar kaydedilmiştir. En büyük düşüş %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 1332 keV için 35,556 cm iken %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitin TVL değeri aynı enerjide 28,654 cm olarak ölçülmüştür. Kompozitlerin MFP değer

değişimleri benzer oranlarda gerçekleşmiştir. Örneğin, %20 Bi_2O_3 katkıli kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,8 katına karşılık gelerek 12,444 cm olmuştur.

4.2.2 Epoksi/n- WO_3 kompozitler

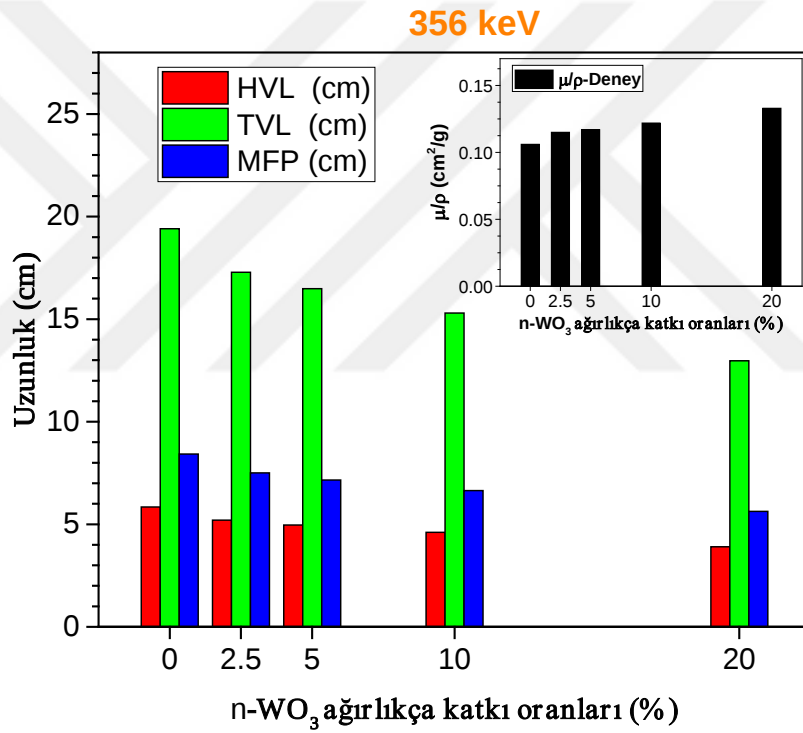
Ba-133 radyoaktif kayanğından yayınlanan 81 keV ve 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve ticari nano tungsten oksit katkıli epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırlama parametreleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.16 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.16’da verilen sonuçlar, artan ticari nano tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin hiyerarşik olarak arttığına işaret etmiştir. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında μ/ρ değeri %86 artarken en yüksek nano WO_3 katkısında ise bu artış %672 gibi son derece yüksek bir değerde olmuştur. Benzer şekilde, %20 nano WO_3 katkısı sonucu saf epoksi için tespit edilen 3,379 cm’lik HVL değerinin 0,366 cm gibi bir değere gerileyerek ciddi oranda düştüğü gözlenmiştir. HVL değeri için saf epoksiyle kıyasla en düşük nano WO_3 katkısında azalış %48 olurken; en yüksek nano WO_3 katkısında azalma % 89 gibi yüksek bir değere

ulaşmıştır. Aynı şekilde, nano WO_3 katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde de anlamlı düşüşler meydana gelmiştir. Zira saf epoksinin TVL değeri 11,226 cm iken %20 WO_3 katkılı kompozitin TVL değeri 1,218 cm'e kadar düşmüştür. Diğer kritik uzunluk parametrelerinde olduğu gibi, kompozitlerin MFP değerleri de saf epoksiye göre daha düşük kalarak etkin radyasyon zırhlamayla uyumlu bir karakteristik sergilemiştir. Özellikle örneklemek gerekirse, %20 ticari nano WO_3 katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin MFP değerinin yaklaşık %10'u kadar olmuştur. Tüm bu bulgular, ticari nano WO_3 katkısının epoksinin radyasyon perdeleme performansını büyük ölçüde geliştirdiğinin birer göstergesidir.

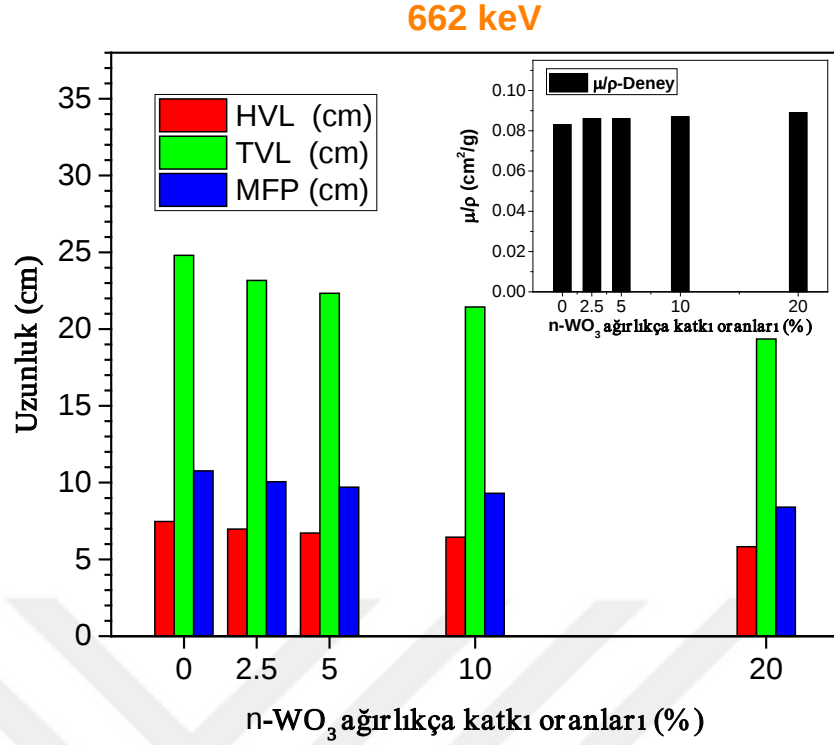


Şekil 4.17 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri

Ba-133 radyasyon kaynağından yayınlanan 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve ticari nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin radyasyon perdeleme kabiliyetleri Şekil 4.17'de verilen parametreler bağlamında değerlendirildiğinde, artan ticari nano tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin yine arttığı ancak bu artışın bir önceki foton enerjisine kıyasla daha yavaş olduğu görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında μ/ρ değeri yaklaşık olarak %8 artarken en

yüksek WO_3 katkısında ise bu artış %25 seviyesindedir. Bu artış oranları aynı örnekler içi 81 keV'da %2,5 ve %20 nano WO_3 katılarından deneysel olarak belirlenmiş %86 ve %672'nin yanında oldukça düşüktür. Şekil 4.17'de gösterilen HVL, TVL ve MFP zırhlama parametrelerinin artan WO_3 katkısına karşı segiledikleri davranışlar da hiyerarşik bir azalışı ifade etmektedir. Mesela, saf epoksi için HVL değeri 5,841 cm iken %20 WO_3 katkısında HVL değeri %33 azalarak 3,904 cm'ye düşmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında ise HVL değeri yaklaşık %11 azalmıştır. HVL'de gözlenen eğilimin bir benzeri kendini TVL'de de göstermiştir. Öyle ki; Saf epoksinin 19,408 cm olan TVL değeri epoksi matris %20 ticari WO_3 nano parçacık ile kuvvetlendirildiğinde belirgin şekilde düşerek 12,970 cm'e gerilemiştir. Ayrıca, Örneğin, %20 nano WO_3 katkısıyla birlikte, kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık %67 MFP değerine karşılık gelmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan bir diğer radyoaktif kaynak olan Cs-137'den yayınlanan 662 keV enerjili fotonların saf epoksi ve ticari nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerce ne kadar perdelendiğini gösteren deneysel radyasyon zırhlama parametreleri ise Şekil 4.18'de verilmiştir.

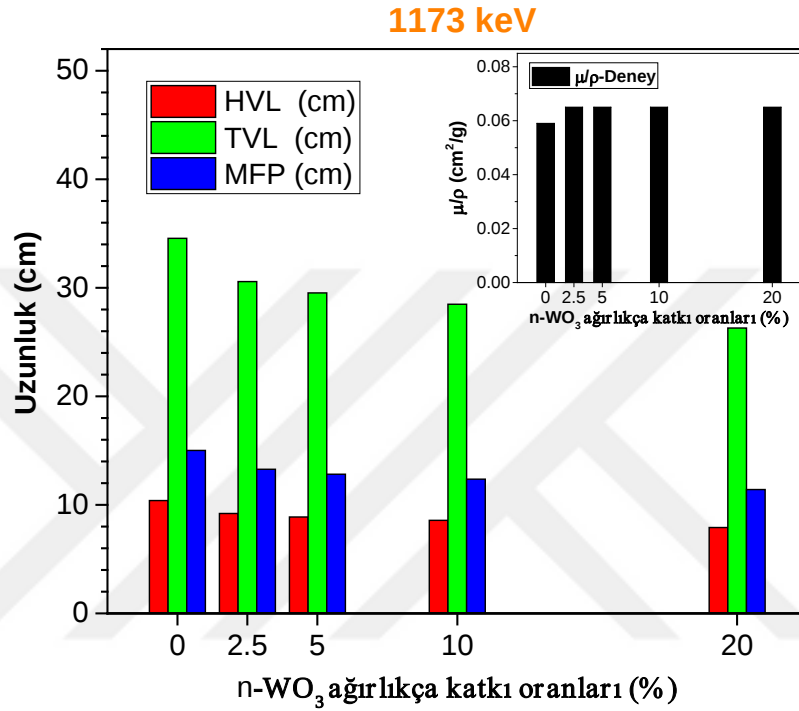


Şekil 4.18 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin ticari nano WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.18'den de görüldüğü gibi, tüm kompozitlerin μ/ρ değerleri saf epoksiden yüksek olmakla birlikte, kompozitlerin μ/ρ değerlerinin saf epoksinin μ/ρ değerinden farkı çok büyük değildir. Ayrıca, artan nano tungsten oksitle birlikte kademeli ama az bir artış gözlenmektedir. 81 keV ve 356 keV'a nazaran az olarak nitelendirilebilecek bu artış kendini Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında μ/ρ değerinin %4 ve en yüksek WO₃ katkısında %7 artmasıyla kendini göstermektedir. Nano tungsten oksit katkısının diğer radyasyon perdeleme parametreleri üzerine de azaltıcı bir etkisi olmuştur. Zira saf epoksinin 7,464 cm olan HVL değerinin %20 ticari nano WO₃ katkısıyla 5,825 cm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %7 azalırken; en yüksek WO₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran %22 seviyelerindedir. TVL'deki en büyük düşüş ise %20 WO₃ katkılı kompozitte TVL'nin 24,801 cm'den 19,354 cm'ye düşmesiyle elde edilmiştir. Benzer şekilde, %20 WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0.78 katına karşılık gelen 8,406 cm olarak tespit edilmiştir. %20 ticari nano WO₃ katkılı kompozitin MFP

değerinin dikkat çekici biçimde %20 ticari nano Bi_2O_3 katkısıyla elde edilen MFP değerine eşit olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.19'da da Co-60 kaynağına ait 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve ticari nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel sonuçları gösterilmiştir.

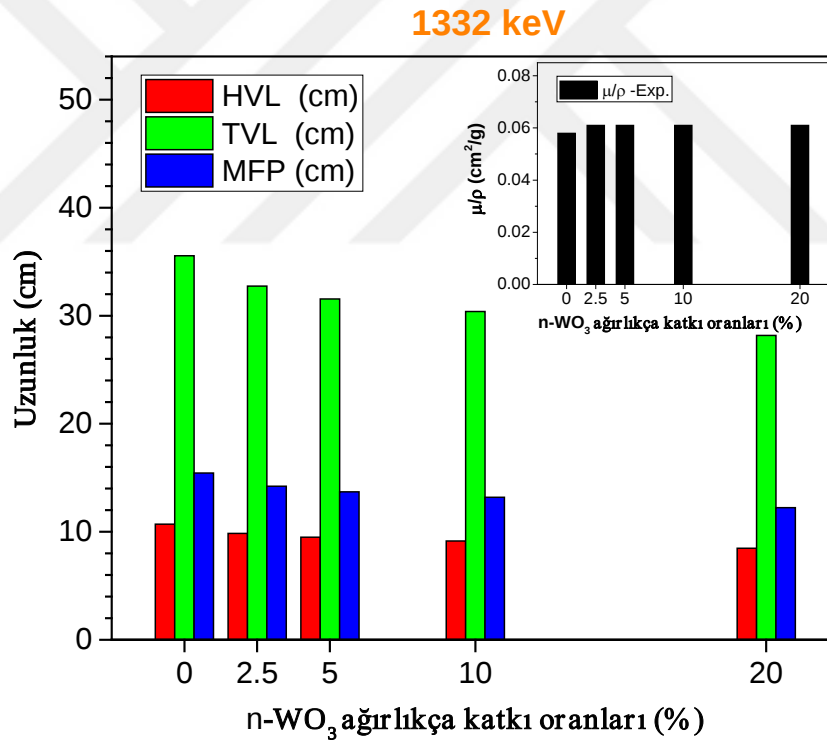


Şekil 4.19 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano WO_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.19'da verilen 1173 keV enerji için verilen kütle azaltma katsayısı değerleri saf epoksi ve ticari nano tungsten oksit katkılı kompozitlerin μ/ρ değerleri arasında az bir fark olmakla birlikte, kompozitler kendi aralarında karşılaştırıldığında μ/ρ değerlerinin benzerlik gösterdiği ve katkı oranlarıyla birlikte etkili bir artışın olmadığı tespit edilmiştir. Saf epoksiye göre %2,5 WO_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri %10,1 artarken en yüksek WO_3 katkısı olan %20'de bu artış sadece % 10,2 olmuştur. Ayrıca, diğer zırlama parametrelerine bakıldığında; kütle azaltmalardan farklı olarak nano WO_3 katkısıyla birlikte kritik uzunlukların daha yüksek bir oranda azaldığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,401 cm olan HVL değerinin % 20 ticari nano WO_3 katkısıyla 7,912 cm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla, saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında HVL

değeri yaklaşık %12 azalırken; en yüksek WO₃ katkısında bu oran %24 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. Yine nano WO₃ katkı oranındaki artışla birlikte, TVL değerlerinde de azalma gözlenmiştir. HVL’de olduğu gibi, TVL için de en büyük düşüş %20 WO₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL’si 1173 keV için 34,559 cm değerindeyken ilgili kompozitin TVL değeri aynı enerjide 8,269 cm azalarak 26,290 cm olarak ölçülmüştür. Kompozitlerin MFP değerleri ise saf epoksiye göre yine azalmıştır. Örneğin, %20 WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,76 katına karşılık gelen 11,418 cm seviyesindedir.

Co-60’ın yayınladığı 1332 keV enerjili ikinci gama radyasyonu için saf epoksi ve ticari nano WO₃ katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.20’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.20 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin ticari nano WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.20’de verilen sonuçlar incelendiğinde μ/ρ parametresindeki değişim 1173 keV enerjisiyle büyük oranda benzerlik göstermektedir. Şöyle ki; saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında deneysel μ/ρ değeri %5 artarken en yüksek WO₃

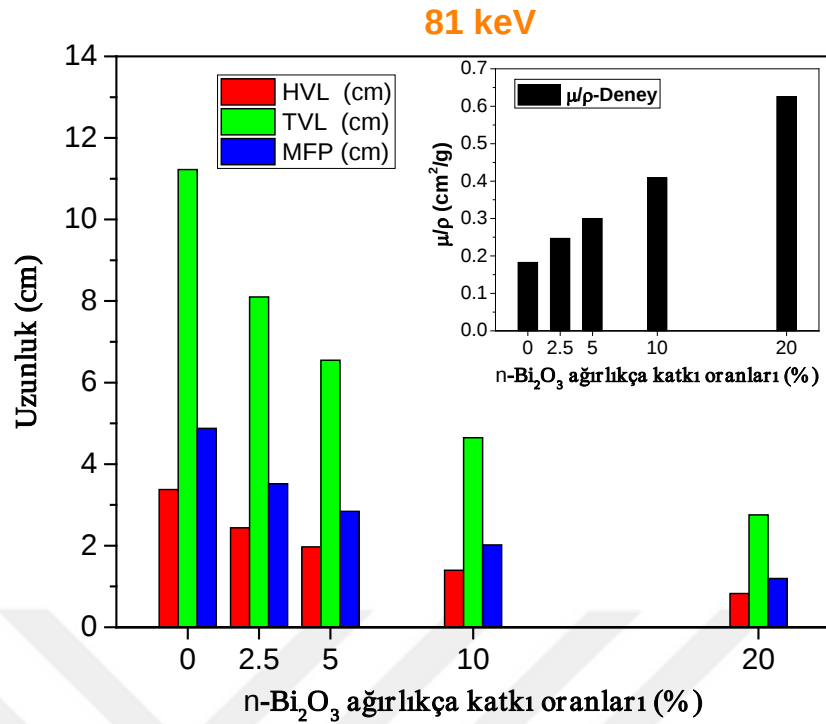
katkısında bu artış %6 seviyesinde kalmıştır. Şekil 4.20'deki diğer zırhlama parametrelerine bakıldığında; nano WO_3 katkısıyla kritik uzunlukların az bir oranda azaldığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,701 cm olan HVL değeri %20 ticari nano WO_3 katkısında 8,480 cm'ye kadar düşmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkılı kompozitin HVL değeri yaklaşık %8 azalırken; en yüksek WO_3 katkılı kompozit için bu oran %21 seviyelerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, nano WO_3 katkı oranındaki artışla birlikte, TVL ve MFP değerlerinde de düşüşler tespit edilmiştir. HVL, TVL ve MFP'de en büyük düşüş %20 WO_3 katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin 1332 keV için TVL' si 35,556 cm değerindeyken %20 WO_3 katkılı kompozittin TVL değeri 28,175 cm olarak ölçülürken; ilgili kompozitin MFP değeri de saf epoksinin 0,79 katına karşılık gelmiştir.

4.3 Sentezlenen Nano Katkılı Kompozitler

Bu son başlıkta ise sırasıyla ST ve HT metotlarıyla sentezlenen nano boyutlardaki Bi_2O_3 ve WO_3 metal oksitlerin epoksi matrisine ağırlıkça %5 ile %20 arasında değişen miktarlarda sentezlenmesiyle üretilmiş nano kompozitlerin gama spektroskopisiyle ölçülen zırhlama parametreleri verilmektedir. Kısım 4.3.1 nano boyutlardaki Bi_2O_3 ve 4.3.2 ise nano boyutlardaki WO_3 parçacıklarla kuvvetlendirilmiş kompozitlerin ilgili özelliklerinin verilmesine ayrılmıştır. Bu kompozitler için de yine Ba-133, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynaklarından yayınlanan 81 keV, 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV enerjili fotonlar için deneysel çalışma yürütülmüştür

4.3.1 Epoksi/Sentez n- Bi_2O_3 kompozitler

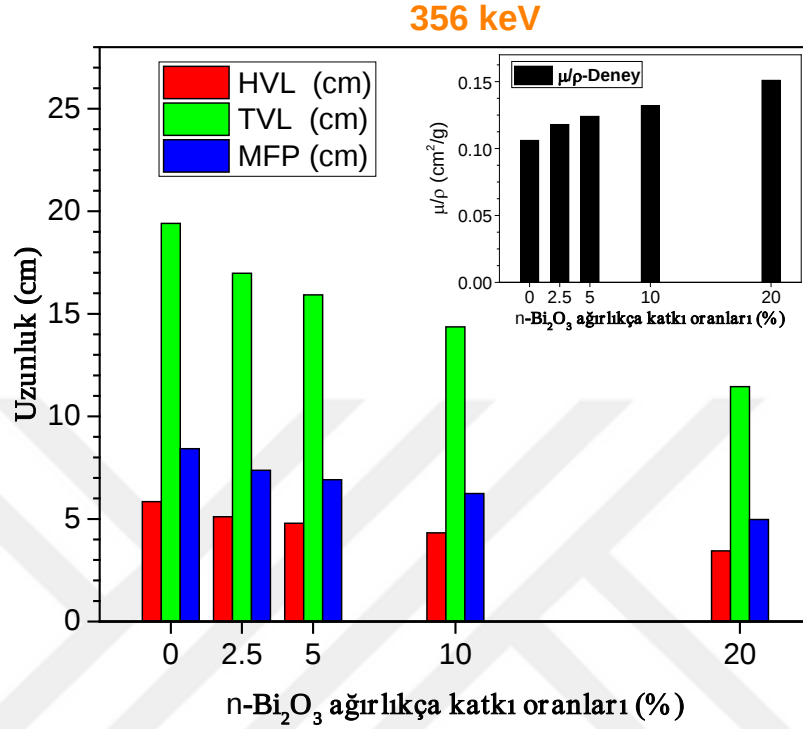
Ba-133 radyasyon kaynağından yayınlanan 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve sentezlenen nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlere ait deneysel radyasyon zırhlama sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.21’de verilen sonuçlardan, artan ST nano bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin etkin biçimde arttığı görülmektedir. Saf epoksiyle kıyaslandığında en düşük Bi₂O₃ katkılı kompozitin μ/ρ değeri yaklaşık %35 artarken, en yüksek Bi₂O₃ katkılı kompozitte bu artış %242 seviyesindedir. Şekil 4.21’deki diğer zırhlama parametreleri incelendiğinde, saf epoksinin HVL’si 3,379 cm değerindeyken %20 nano Bi₂O₃ katkısında bu değer 0,829 cm’e kadar düşmüştür. Saf epoksiyle kıyaslandığında en düşük Bi₂O₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %28 azalırken; en yüksek Bi₂O₃ katkısında bu oran %75 seviyelerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, Bi₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 11,226 cm iken %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitin TVL değeri 81 keV için dramatik bir şekilde düşerek 2,754 cm’e gerilemiştir. TVL’de olduğu gibi, kompozitlerin MFP değerlerinde saf epoksiye kıyasla azalma görülmüştür. Örneğin %20 Bi₂O₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık dörtte biri değerine inmiştir. Tüm bu bulgular, sentezlenen nano Bi₂O₃ katkısının epoksinin radyasyon perdeleme performansını en az ticari mikro ve nano katkılar kadar geliştirdiğine işaret etmektedir.

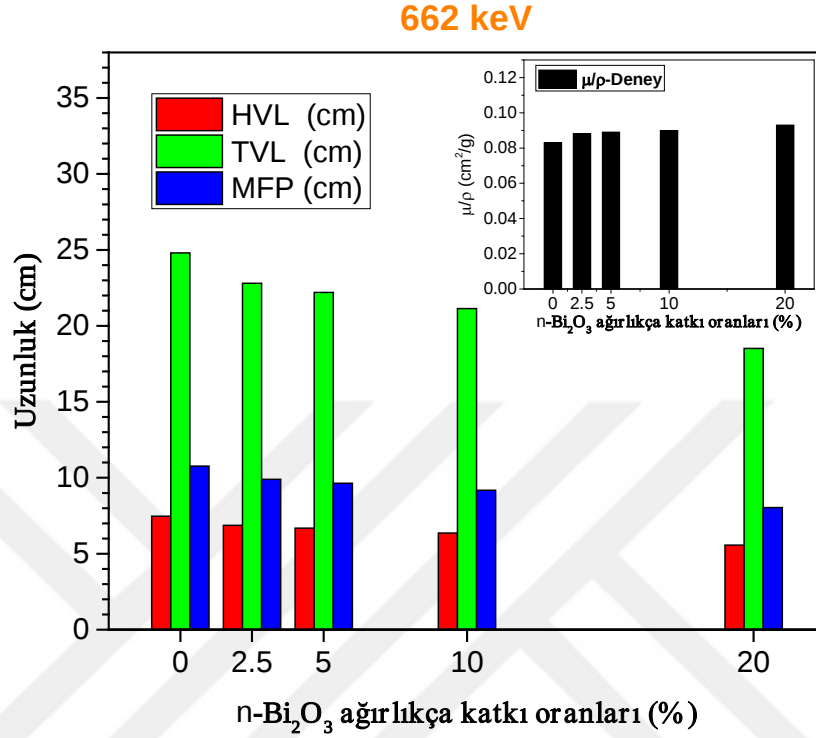
Gelen foton enerjisi 356 keV'a yükseldiğinde, ilgili saf epoksi ve sentezlenen nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.22' de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.22' de verilen sonuçlar; artan ST nano bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin kademeli olarak yükseldiği göstermektedir. Saf epoksiyle kıyaslandığında en düşük ST nano Bi_2O_3 katkısında deneysel μ/ρ değeri yaklaşık olarak %11 artarken en yüksek Bi_2O_3 katkısında bu artış %42 seviyesindedir. Kütle azaltma katssyının işaret ettiği artan perdelem kabiliyeti doğrultusunda saf epoksinin 5,841 cm olan HVLdeğerinin %20 ST nano Bi_2O_3 katkısında 3,446 cm'ye düştüğü gözlenmiştir. Saf epoksiye göre en düşük Bi_2O_3 katkısında deneysel HVL değeri yaklaşık %13 azalırken en yüksek Bi_2O_3 katkısında bu oran yaklaşık olarak %41 seviyesinde düşüş göstermiştir. Benzer şekilde, nano Bi_2O_3 katkı oranındaki artışla birlikte TVL ve MFP değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 19,408 cm iken %20 ST nano Bi_2O_3 katkılı kompozitin TVL değeri yaklaşık 8 cm düşerek 11,449 cm olmuştur. Ayrıca, aynı kompozitin MFP değeri ise saf epoksinin MFP değerinin yaklaşık 0,59'una karşılık gelmiştir.

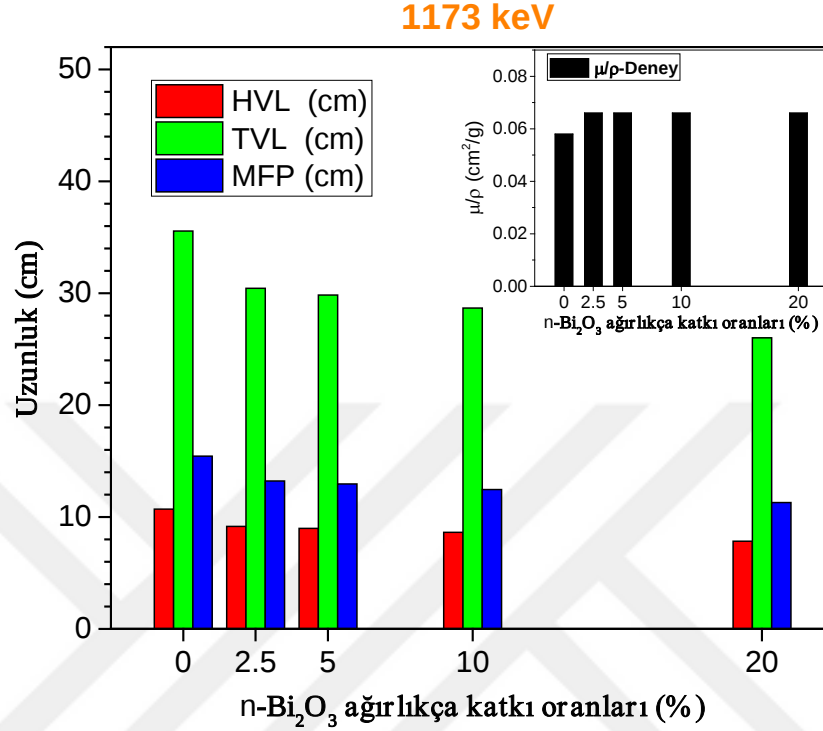
Cs-137'den yayınlanan 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve sentez nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel sonuçları ve radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.23'de gösterildiği gibi olmuştur.



Şekil 4.23 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.23' de verilen sonuçlara istinaden, sentezlenen nano bizmut oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin yavaşça arttığı söylenebilir. Saf epoksiye göre en düşük ST nano Bi₂O₃ katkısında μ/ρ değeri %6 artarken, en yüksek Bi₂O₃ katkısında bu artış %12 seviyesinde olmuştur. ST nano bizmut oksit katkısıyla ilgili kritik uzunlukların da belli bir oranda kısıldığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 7,464 cm olan HVL değerinin, %20 ST nano Bi₂O₃ katkılı kompozitte yaklaşık %25 azalarak 5,571 cm'ye düştüğü görülmüştür. Yine ST nano Bi₂O₃ katkı oranındaki artışla birlikte, TVL ve MFP değerlerinde de azalışlar raporlanmıştır. TVL ve MFP'de en büyük azalış %20 ST nano Bi₂O₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir (Bakınız Şekil 4.23) . Bir diğer önemli nokta ise, %20 ST nano Bi₂O₃ katkısında elde edilen MFP değerinin %20 ticari nano Bi₂O₃ katkısıyla elde edilen MFP değerinden daha düşük oluşudur.

Şekil 4.24’de ise Co-60 kaynağına ait 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve sentezlenen nano bizmut oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırlama parametreleri verilmiştir.

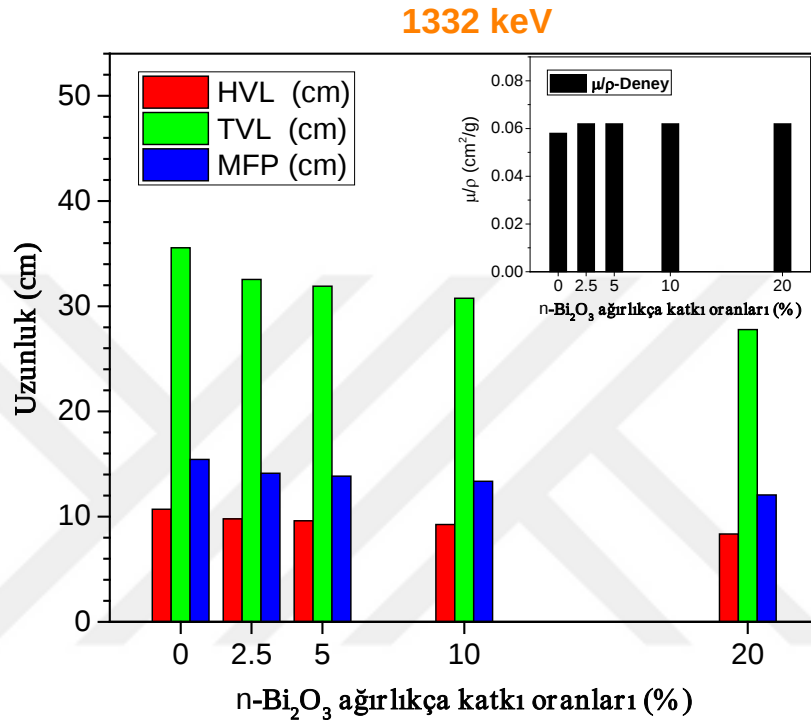


Şekil 4.24 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin sentez nano Bi₂O₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.24’de 1173 keV enerjiye karşılık gelen deneysel sonuçlar göstermiştir ki; saf epoksiye ve ST nano bizmut oksit katkılı kompozitlerin μ/ρ değerleri arasında belirgin bir fark yoktur. Saf epoksiye göre en düşük ST nano Bi₂O₃ katkısında μ/ρ değeri %11,8 artarken en yüksek ST nano Bi₂O₃ katkısında bu artış %12 seviyesini olmuştur. Şekil 4.24’de verilen diğer zırlama parametrelerine bakıldığında; μ/ρ değişimindeki karakteristiktan farklı olarak nano Bi₂O₃ katkı oranı artışıyla birlikte kritik uzunlukların daha bariz şekilde azaldığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,401 cm olan HVL değerinin %20 ST nano Bi₂O₃ katkısıyla 7,832 cm’ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük ST nano Bi₂O₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %12 azalırken, en yüksek ST nano Bi₂O₃ katkısında bu oran %25 seviyesine kadar yükselebilmektedir. Saf epoksinin TVL’si 1173 keV için 34,559 cm değerindeyken ilgili kompozitin TVL değeri 26,021 cm olarak belirlenmiştir. Kompozitlerin MFP değerleride saf epoksiye göre azalmıştır. Örneğin, %20 ST

nano Bi_2O_3 katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,75 katına karşılık gelen 11,301 cm seviyesindedir.

Co-60 kaynağının bozunmasıyla yayınlanan 1332 keV enerjili ikinci gama radyasyonu için saf epoksi ve sentez nano Bi_2O_3 katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.25’de gösterildiği gibidir.



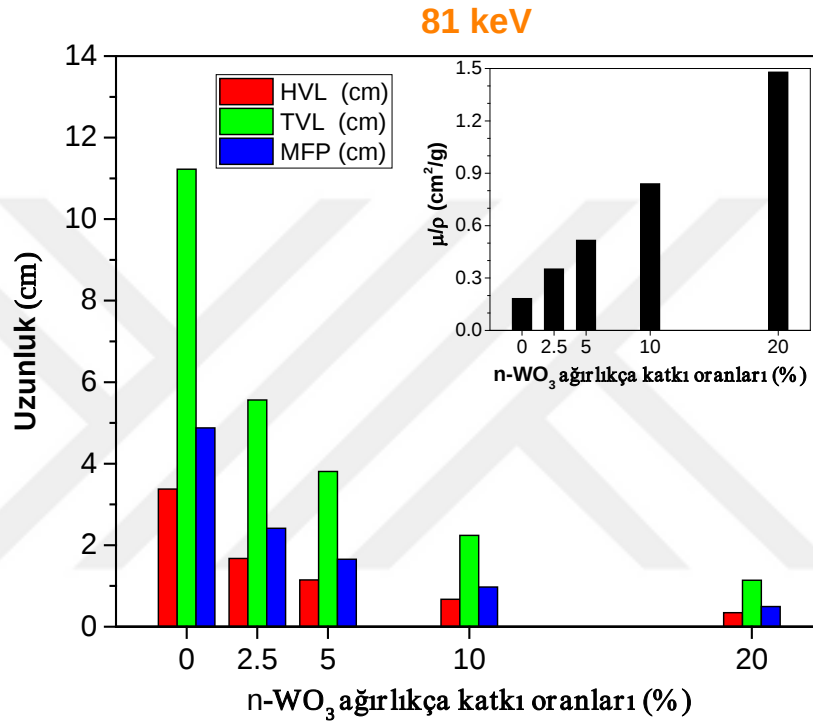
Şekil 4.25 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano Bi_2O_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.25’de verilen sonuçlar incelendiğinde kütle azaltma katsayılarındaki değişim 1173 keV enerjisindeki değerlerle benzerlik göstermektedir. ST nano Bi_2O_3 katkılı kompozitlerin μ/ρ değerleri arasında etkili bir artış tespit edilememiştir. En düşük Bi_2O_3 katkısında μ/ρ parametresi %6,8 artarken, en yüksek Bi_2O_3 katkısında bu artış % 7 seviyesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca, Şekil 4.25’de katkıyla değişimleri verilen HVL, TVL ve MFP parametreleri de ST nano Bi_2O_3 katkı oranıyla birlikte ilgili kritik uzunlukların belli bir oranda azaldığını işaret etmektedir. Örneğin, saf epoksinin 10,701 cm ve 35,556 cm olan HVL ve TVL değerlerinin % 20 ST nano Bi_2O_3 katkısıyla sırasıyla 8,360 cm ve 27,778 cm’ye kadar düştüğü görülmüştür.

Benzer biçimde, %20 ST nano Bi_2O_3 katkısıyla saf epoksinin MFP değerini de %22 oranında azaltılabilmektedir.

4.3.2 Epoksi/Sentez n- WO_3 kompozitler

Ba-133 radyasyon kaynağından yayınlanan 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve HT metotla sentezlenen tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel sonuçları Şekil 4.26’de verilmiştir.

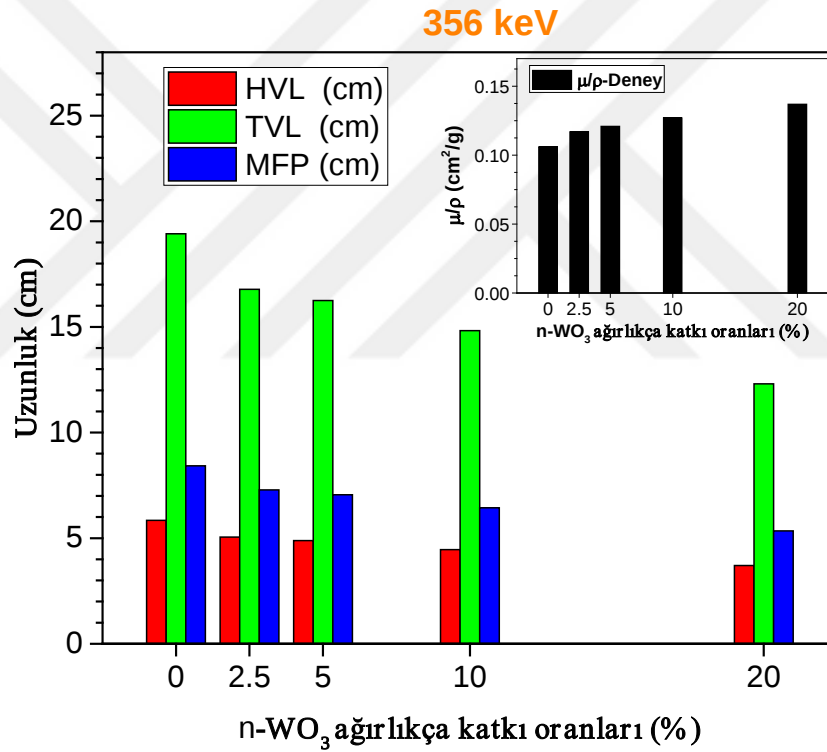


Şekil 4.26 81 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin sentez nano WO_3 katkısıyla değişimleri

Şekil 4.26’da verilen sonuçlar; artan HT nano tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin etkili biçimde arttığını işaret etmiştir. Saf epoksiye göre en düşük HT nano WO_3 katkısında μ/ρ değeri %92 artarken, en yüksek HT nano WO_3 katkısında bu artış %709 seviyesindedir. Şekil 4.26’daki diğer zırlama parametreleri incelendiğinde; saf epoksinin HVL değeri 3,379 cm iken %20 HT nano WO_3 katkısında bu değer 0,343 cm’e kadar düşmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO_3 katkısında HVL değeri yaklaşık %50 azalırken; en yüksek WO_3 katkısında bu oran %90 seviyelerine ulaşmıştır. Benzer şekilde, WO_3 katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL

değeri 11,226 cm iken %20 HT nano WO₃ katkılı kompozitin TVL değeri 81 keV için dramatik bir şekilde düşerek 1,140 cm'e gerilemiştir. TVL'de olduğu gibi, kompozitlerin MFP değerleride saf epoksiye göre azalma göstermiştir. Örneğin %20 HT nano WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin MFP'sinin yaklaşık %10 değerine kadar inmiştir. Tüm bu bulgular, HT metotla sentezlenen nano WO₃ katkısının epoksinin radyasyon perdeleme performansını en az ticari mikro ve nano WO₃ katkıları kadar geliştirdiğine işaret etmektedir.

Gelen foton enerjisi 356 keV'a yükseldiğinde, ilgili saf epoksi ve HT metotla sentezlenen nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon perdeleme parametreleri Şekil 4.27'de gösterildiği gibi olmuştur.

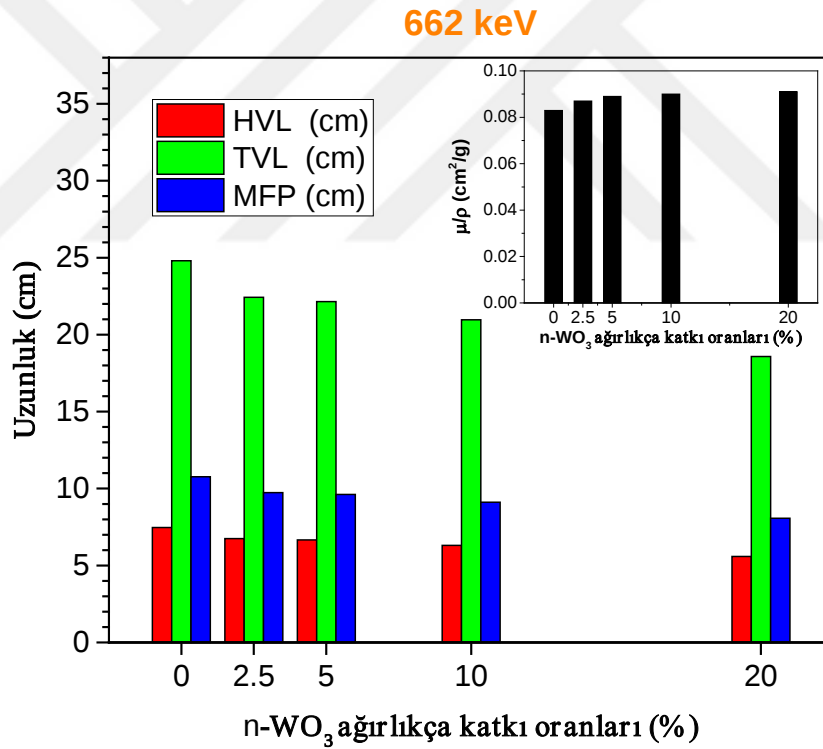


Şekil 4.27 356 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin sentez nano WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.27' de verilen kütle azaltma katsayısı-katkı grafiğinden, artan HT nano WO₃ oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin yavaşça yükseldiği görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında μ/ρ değeri yaklaşık olarak %10 artarken en yüksek WO₃ katkısında ise bu artış %29 seviyesindedir. Öte yandan, yine Şekil 4.27'ye göre, saf epoksi için HVL değeri 5,841 cm iken %20 HT nano WO₃

katkısında HVL'nin 3,703 cm'ye düştüğü gözlenmiştir. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %14 azalırken en yüksek WO₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran yaklaşık olarak %37 seviyesindedir. Benzer şekilde, WO₃ katkı oranındaki artışla birlikte TVL değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Saf epoksinin TVL'si 19,408 cm iken %20 WO₃ katkılı kompozitin TVL değeri belirgin şekilde azalarak 12,303 cm olduğu belirlenmiştir. Kompozitlerin MFP değerleride saf epoksiye göre azalmıştır. Örneğin, %20 HT nano WO₃ katkısıyla birlikte, kompozitin MFP değeri saf epoksinin MFP'sinin yaklaşık %63'üne karşılık gelerek düşüş göstermiştir.

Cs-137'den yayınlanan 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve sentezlenen nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel sonuçları ve radyasyon zırhlama parametreleri Şekil 4.28' de verilmiştir.

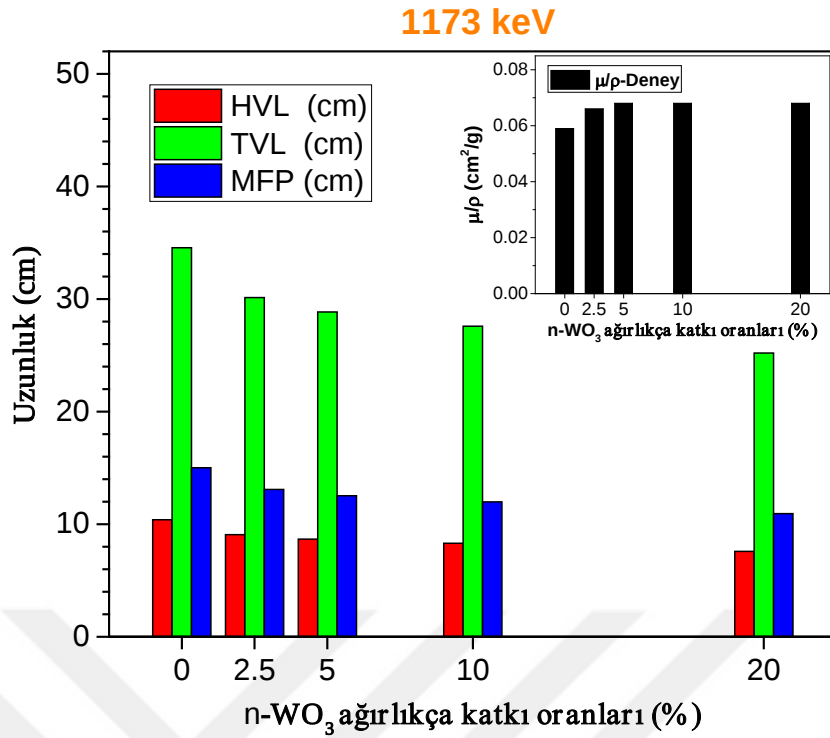


Şekil 4.28 662 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırhlama parametrelerinin sentez nano WO₃ katkısıyla değişimleri

662 keV enerjisi için Şekil 4.28' de verilen sonuçlara göre, sentezlenen HT nano tungsten oksit katkısıyla birlikte μ/ρ değerinin yavaşça arttığı görülmektedir. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında μ/ρ değeri %5 artarken en yüksek WO₃

katkısında ise bu artış %10 seviyesinde olmuştur. Şekil 4.28'deki diğer zırhlama parametrelerine bakıldığında, HT nano tungsten oksit katkısının ilgili kritik uzunlukları belli bir oranda kısalttığı gözlenmiştir. Örneğin, saf epoksinin 7,464 cm olan HVL değerinin %20 ticari nano WO₃ katkısıyla 5,593 cm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %10 azalırken; en yüksek WO₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran %25 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. Benzer biçimde, HT nano WO₃ katkı oranındaki artışla birlikte, TVL değerlerinde düşüşler kaydedilmiştir. En büyük düşüş %20 HT nano WO₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 662 keV için 24,801 cm iken ilgili kompozitin TVL değeri aynı enerjide 18,585 cm olarak tespit edilmiştir. Kompozitlerin MFP değerleride saf epoksiye kıyaslandığında düşüş göstermiştir. Örneğin, %20 WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,75 katına karşılık gelen 8,071 cm değerindedir. %20 HT nano WO₃ katkısındaki bu MFP değerinin %20 ticari nano WO₃ katkısıyla elde edilen MFP değerinden daha düşük olması dikkat çekici olan bir başka bulgudur.

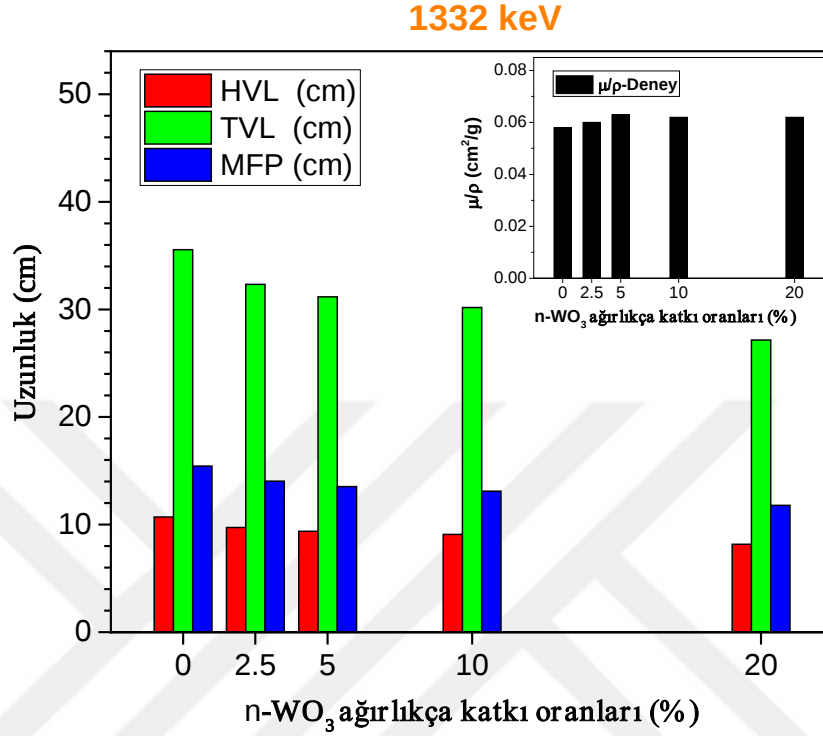
Şekil 4.29'da ise Co-60 kaynağına ait 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksi ve sentezlenen HT nano tungsten oksit katkılı epoksi kompozitlerin deneysel sonuçları ve hesaplanmış radyasyon zırhlama parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.29 1173 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin sentez nano WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.29'de verilen μ/ρ -katkı değişim grafiği, saf epoksiyle ve ST nano bizmut oksit katkılı kompozitlerin μ/ρ değerleri arasında az bir fark olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kompozitlerin μ/ρ değerleri kendi aralarında karşılaştırıldığında bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu ve katkı oranlarıyla birlikte etkili bir değişimin gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Saf epoksiyle kıyaslandığında; en düşük HT nano WO₃ katkısında μ/ρ değeri %12 artarken, en yüksek HT nano WO₃ katkısında bu artış %15 seviyesinde olmuştur. HT nano WO₃ katkı oranıyla birlikte kritik uzunluklarda da değişen oranlarda azalmalar tespit edilmiştir. Örneğin, saf epoksinin 10,401 cm olan HVL değerinin %20 HT nano WO₃ katkısıyla 7,585 cm'ye kadar düştüğü görülmüştür. Saf epoksiye göre en düşük WO₃ katkısında HVL değeri yaklaşık %13 azalırken; en yüksek WO₃ katkısında saf epoksiye göre bu oran %27 seviyelerine kadar yükselebilmektedir. TVL'deki en büyük azalış ise %20 WO₃ katkılı kompozitte tespit edilmiştir. Saf epoksinin TVL değeri 1173 keV için 34,559 cm iken ilgili kompozitin TVL değeri aynı enerjide 25,201 cm olarak belirlenmiştir. %20 WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri ise saf epoksinin yaklaşık 0,73 katına karşılık gelen 10,944 cm olmuştur.

Son olarak 1332 keV enerjili gama radyasyonu için saf epoksi ve sentezlenen HT nano WO₃ katkılı epoksi kompozitlerin deneysel radyasyon zırlama parametreleri Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30 1332 keV enerjili fotonlar için saf epoksinin radyasyon zırlama parametrelerinin sentez nano WO₃ katkısıyla değişimleri

Şekil 4.30'da verilen kütle azaltma katsayısı değişimleri ele alındığında, 1173 keV foton enerjisi için HT nano tungsten oksit katkısının epoksinin μ/ρ değerlerini kayda değer bir şekilde arttırmadığını göstermiştir. Saf epoksiye göre en düşük HT nano WO₃ katkısında μ/ρ değeri %4 artarken en yüksek HT nano WO₃ katkısında bu artış %7 seviyesinde olmuştur. Ayrıca, Şekil 4.30 saf epoksinin 10,701 cm olan HVL değerinin %20 HT nano WO₃ katkısıyla 8,171 cm'ye kadar düştüğünü göstermektedir. Yine, saf epoksinin TVL değeri 1332 keV için 35,556 cm iken % 20 WO₃ katkılı kompozittin TVL değeri aynı enerjide 27,149 cm olarak tespit edilmiştir. Kompozitlerin MFP değerleride saf epoksiye göre azalmıştır. Örneğin, %20 HT nano WO₃ katkılı kompozitin MFP değeri saf epoksinin yaklaşık 0,76 katına karşılık gelen 11,791 cm seviyesindedir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde hazırlanan kompozitlerin radyasyon zırhlama sonuçları üç kısımda tartışılmıştır. İlk kısımda ticari mikro, ticari nano ve ST/HT nano katkılı Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin zırhlama parametrelerindeki değişimler değerlendirilmiştir. Özellikle kompozitlerin kütle azaltma katsayıları ve yarı değer kalınlıkları literatürdeki farklı kompozitlerde kıyaslanmıştır. İkinci kısımda tüm enerjiler için en iyi sonuçları veren kompozitler belirlenmiş ve birbirleriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Son kısımda ise parçacık boyutu değişimleriyle kütle azaltma katsayılarındaki farklılıklar irdelenmiştir. Ayrıca, mikro ve nano boyutlu katkı içeren kompozitlerde katkıların radyasyon zırhlamasını ne derece etkilediği ifade edilmiştir.

5.1 Kompozitlerin Zırhlama Özellikleri

Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitler üç farklı boyut dağılımına sahip takviye elemanlarıyla ayrı ayrı katkılanarak sentezlenmiştir. Bu katkılar ticari mikro, ticari nano, ST/HT nano olarak sıralanabilir. Bu kompozitlere ait μ/ρ ve HVL değerleri 81 keV için Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 81 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri

81 keV										
Numune	MİKRO					NANO				
	MAC-t Deneyssel	HVL-t Deneyssel	MAC-t MCNP	HVL-t MCNP		MAC-t Deneyssel	HVL-t Deneyssel	MAC-HT Deneyssel	HVL-HT Deneyssel	
Epoksi (Ep.)	0,183	3,379	0,185	3,332						
Ep./ %2,5 Bi ₂ O ₃						0,246	2,550	0,247	2,438	
Ep./ %5 Bi ₂ O ₃	0,269	2,242	0,284	2,123		0,297	2,062	0,300	1,971	
Ep./ %10 Bi ₂ O ₃	0,367	1,590	0,381	1,531		0,411	1,440	0,409	1,399	
Ep./ %20 Bi ₂ O ₃	0,563	0,963	0,578	0,937		0,617	0,862	0,626	0,829	
Ep./ %30 Bi ₂ O ₃	0,758	0,682	0,776	0,666						
Ep./ %2,5 WO ₃						0,341	1,755	0,352	1,674	
Ep./ %5 WO ₃	0,455	1,340	0,476	1,276		0,493	1,175	0,517	1,147	
Ep./ %10 WO ₃	0,744	0,768	0,770	0,743		0,802	0,699	0,840	0,675	
Ep./ %20 WO ₃	1,308	0,393	1,346	0,381		1,413	0,366	1,480	0,343	
Ep./ %30 WO ₃	1,873	0,244	1,930	0,237						

Tablo 5.1' e göre saf epoksinin en düşük μ/ρ ve en yüksek HVL değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi epoksinin büyük oranda C, H ve O gibi düşük atom numaralı elementlerden oluşmasıdır. Diğer taraftan epoksiye yapılan Bi_2O_3 ve WO_3 katkıları μ/ρ değerlerinde hızlı bir artışa neden olmuştur. Bunun en önemli sebebi ise kompozitlerin yüksek atom numaralı bizmut veya tungsten element içermesidir. Bu elementler, kompozitlerin düşük enerjili radyasyonla fotoelektrik etkileşme yapma ihtimalini artırır. 81 keV enerjide epoksiye mikro boyutlarda yüzde %30 oranında katkılanan Bi_2O_3 ve WO_3 kompozitleri en yüksek μ/ρ ve en düşük HVL değerlerine sahiptir. Kendi aralarında kıyasladığımızda ise %30 mikro WO_3 katkılı kompozitin μ/ρ değeri %30 mikro Bi_2O_3 katkılı kompozitin μ/ρ değerinin 2,5 katına karşılık gelmektedir. Bu enerjide ST ve HT yöntemleriyle sentezlediğimiz nano katkıların performansı ticari nanolara göre kısmen daha iyi gözükmemektedir. Mikro katkılarla nano katkılı kompozitler kıyaslandığında ise nano katkılı kompozitlerin bu enerjide mikro katkılara göre belirgin biçimde daha iyi zırhladığı belirlenmiştir. Özellikle nano boyutlardaki katkıların mikro katkılara göre daha geniş yüzey alanına sahip olması fotoelektrik etkileşme olasılığını arttıran en etkili faktördür. Ba-133 kaynağının yayımladığı 356 keV enerjili ikinci radyasyon için kompozitlerin sahip olduğu μ/ρ ve HVL değerleri Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.2 356 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri

356 keV										
Numune	MİKRO					NANO				
	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-t MCNP	HVL-t MCNP	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel
Epoksi (Ep.)	0,106	5,841	0,107	5,781						
Ep./ %2,5 Bi ₂ O ₃					0,117	5,335	0,118	5,110		
Ep./ %5 Bi ₂ O ₃	0,113	5,352	0,115	5,229	0,122	5,024	0,124	4,792		
Ep./ %10 Bi ₂ O ₃	0,121	4,830	0,123	4,752	0,132	4,454	0,132	4,324		
Ep./ %20 Bi ₂ O ₃	0,136	3,976	0,139	3,906	0,148	3,593	0,151	3,446		
Ep./ %30 Bi ₂ O ₃	0,154	3,369	0,155	3,343						
Ep./ %2,5 WO ₃					0,115	5,203	0,117	5,051		
Ep./ %5 WO ₃	0,107	5,681	0,111	5,452	0,117	4,961	0,121	4,889		
Ep./ %10 WO ₃	0,116	4,926	0,116	4,924	0,122	4,605	0,127	4,461		
Ep./ %20 WO ₃	0,124	4,154	0,126	4,076	0,133	3,904	0,137	3,703		
Ep./ %30 WO ₃	0,133	3,424	0,135	3,393						

Tablo 5.2' e göre katkı oranlarıyla birlikte 81 keV enerjideki gibi olmasa da 356 keV enerjinin μ/ρ değerlerindedeki artışlar görülmektedir. Benzer biçimde HVL değerleride aynı oranlarda düşmüştür. Ayrıca 356 keV fotonlara karşı kompozitlerin μ/ρ değerlerinde daha farklı bir durum gözlemlenmiştir. WO_3 katkısı epoksinin radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirmedeki üstünlüğünü yitirmiş ve Bi_2O_3 katkısı epoksiye daha yüksek radyasyon zırhlama kabiliyeti kazandırmıştır. Bu bulgular Bizmut (90,5 keV) ve Tungstenin (69,5 keV) farklı K-kenarı süreksizlik enerjileri ile açıklanabilir [89]. Çünkü bizmut 40-90,5 keV arasında azalan μ/ρ değerleri sergilerken, tungstenin μ/ρ değeri 69,5 keV enerjinin üzerinde çıkmaya başlar. Dolayısıyla 69,5-90,5 keV arasındaki enerjilerde tungstenin μ/ρ değeri bizmuta göre daha yüksektir. Radyasyonun enerjisi 90,5 keV olan eşik değerini aştığında, bizmutun μ/ρ 'sı daha yüksek değerler alır [90, 91]. Bu noktadan hareketle, benzer katkı oranlarındaki takviye elemanları eklendiğinde, Bi_2O_3 katkılı epoksi kompozitler 356 keV foton enerjisinde WO_3 katkılı kompozitlere göre daha yüksek μ/ρ değerlerine sahip olmuştur. μ/ρ değerleri foton-madde etkileşimleri açısından ele alındığında, artan foton enerjisi ile μ/ρ değerlerinin düştüğü ve madde-foton arasındaki etkileşim mekanizmalarının değiştiğini göstermektedir. 81 keV' de belirlenen yüksek μ/ρ değerleri, foton demeti şiddetini azaltmak için etkili bir fotoelektrik etkileşim mekanizmasını işaret ederken, 356 keV'e karşı gözlemlenen daha düşük μ/ρ değerleri, radyasyon-zırhlayıcı arasındaki baskın bir Compton saçılma etkileşimini belirtir. Bilindiği gibi düşük foton enerjilerinde ($E < 81$ keV) fotoelektrik etkileşimin meydana gelme olasılığı yüksektir, çünkü tesir kesiti gelen foton enerjisinin küpüyle ters orantılıdır [92]. Öte yandan, fotoelektrik etkinin baskınlığı azalırken, tesir kesitinin foton enerjisinin tersiyle doğru orantılı olduğu Compton saçılması, orta enerji bölgesi için baskın etkileşim mekanizması olarak ortaya çıkmaktadır [93]. Bu enerjiler için Bi_2O_3 ve WO_3 katkılarıyla güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin μ/ρ değerleri literatürdeki sonuçlar karşılaştırılabilir. Örneğin, Hou ve arkadaşları Epoksi/Bazalt fiber/Tungsten kompozitlerinin radyasyon zırhlama kabiliyetini araştırmış ve %22,47 epoksi, %44,43 bazalt fiber ve %33,1 tungsten içeren kompozitin 81 ve 356 keV için 1,25 ve 0,14 cm^2/g μ/ρ

değerlerine sahip olduğunu göstermişlerdir [94]. Hou ve arkadaşları tarafından bildirilen her iki μ/ρ değeri bu tez çalışmasında üretilen Epoksi/%30 WO₃ ve Epoksi/%30 Bi₂O₃ kompozitlerinin μ/ρ değerlerinden daha düşüktür. Öte yandan, farklı bir çalışmada SS304L çeliğinin 81 keV ve 356 keV enerjileri için sırasıyla 0,587 cm²/g ve 0,099 cm²/g μ/ρ değerlerine sahip olduğu bildirilmiştir [95]. Tez çalışmasındaki %10 WO₃ ve %5 Bi₂O₃ mikro katkı içeren düşük katkı oranlı epoksi kompozitler bile daha yüksek μ/ρ değerlerine sahiptir. HVL değerlerine göre literatürdeki çalışmalarla kıyaslayacak olursak; 81 keV enerjide Epoksi/%30 WO₃ kompozitinin HVL değeri (0,244), yüksek yoğunluklu polietilen/%40 mikro CdO'nun (0,4759 cm) [96], Polipropilen kopolimer/Demir oksit (1,766 cm) kompozitin [97], PVA/Fe₃O₄ kompozitlerin (>1cm) [98] ve silikon bazlı %40 WO₃ katkılı nanokompozitin (yaklaşık 0,7 cm) [99] HVL değerlerinden daha düşüktür. Hem μ/ρ hem de HVL değerleri göz önüne alındığında, 81 ve 356 keV için mikro ve nano yapıli epoksi kompozitler bilimsel literatürdeki benzerleriyle kıyaslandığında daha yüksek radyasyon zırlama kabiliyetine sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Cs-137 kaynağının yayımladığı 662 keV enerjili radyasyon için kompozitlerin sahip olduğu μ/ρ ve HVL değerleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 662 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri

662 keV										
Numune	MİKRO				NANO					
	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-t MCNP	HVL-t MCNP	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-t Deneysel	HVL-t Deneysel	MAC-HT Deneysel	HVL-HT Deneysel
Epoksi (Ep.)	0,083	7,464	0,083	7,451						
Ep./ %2,5 Bi ₂ O ₃					0,088	7,151	0,088			6,862
Ep./ %5 Bi ₂ O ₃	0,085	7,109	0,084	7,144	0,087	7,008	0,089			6,682
Ep./ %10 Bi ₂ O ₃	0,085	6,866	0,086	6,827	0,090	6,519	0,090			6,363
Ep./ %20 Bi ₂ O ₃	0,087	6,272	0,088	6,186	0,091	5,829	0,093			5,571
Ep./ %30 Bi ₂ O ₃	0,089	5,828	0,089	5,785						
Ep./ %2,5 WO ₃					0,086	6,973	0,087			6,749
Ep./ %5 WO ₃	0,082	7,386	0,084	7,257	0,086	6,722	0,089			6,665
Ep./ %10 WO ₃	0,083	6,853	0,084	6,793	0,087	6,451	0,090			6,312
Ep./ %20 WO ₃	0,082	6,233	0,084	6,069	0,089	5,825	0,091			5,593
Ep./ %30 WO ₃	0,084	5,434	0,085	5,375						

Tabloya göre 662 keV için artan mikro ve nano partikül ilavesi ile μ/ρ ve HVL değişimi 81 ve 356 keV'e oranla daha düşüktür. Hazırlanan kompozitler 662 keV enerjili fotonlara karşı 356 keV'e göre daha düşük μ/ρ ve daha yüksek HVL değerlerine sahiptir. Bu, foton enerjisi arttıkça kompozitlerin radyasyon zırhlama yeteneklerinin düştüğünü gösterir. Hazırlanan kompozitlerin 662 keV'de sahip olduğu değerleri bilimsel literatürlede karşılaştırabiliriz. Literatür bulunan Epoksi/ %15 Al₂O₃ ve epoksi/ %6 Fe₂O₃ kompozitleri 662 keV'de 0,0827 cm²/g μ/ρ değerine sahipken [100], tez çalışmasında mikro katkılarla yapılan Epoksi / %10 Bi₂O₃ ve Epoksi / %10 WO₃ kompozitleri, sırasıyla 0,085 cm²/g ve 0,083 cm²/g değerlerindedir. Öte yandan, toksik Pb₃O₄ kullanan Eid ve arkadaşları epoksinin radyasyon zırhlama performansını geliştirmeye denemiş ve 662 keV fotonlara karşı HVL değerinin 7,6 cm olduğunu göstermiştir [101]. Tez çalışmasında sentezlenen Epoksi/%30 Bi₂O₃ (HVL=5,828 cm) ve Epoksi/%30 WO₃ (HVL=5,434 cm) kompozitler için hem deneysel hem de MCNP simülasyonuna dayalı HVL değerleri toksik epoksi kompozitten çok daha düşüktür. Ayrıca, Kazemi ve arkadaşlarının PVA/%50 WO₃ mikro yapılı kompozitin μ/ρ değerlerini tahmin etmiş ve 662 keV için 0,0532 cm²/g ilan etmiştir [102]. %50 WO₃ mikro partikülü kullanmalarına rağmen 662 keV'de tez çalışmasında sentezlenen %30 mikro WO₃ katkılı epoksi kompozitin radyasyon zırhlama başarısını ulaşamamışlardır. Dolayısıyla bu çalışmada 662 keV'e karşı en yüksek mikro partikül ilavesine sahip kompozitler için bildirilen radyasyon zırhlama performansının benzer içerikli kompozitlerle rekabet edebileceği ifade edilebilir. Co-60 kaynağının yayımladığı 1173 ve 1332 keV enerjili radyasyonları için kompozitlerin sahip olduğu μ/ρ ve HVL değerleri Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.4 1173 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri

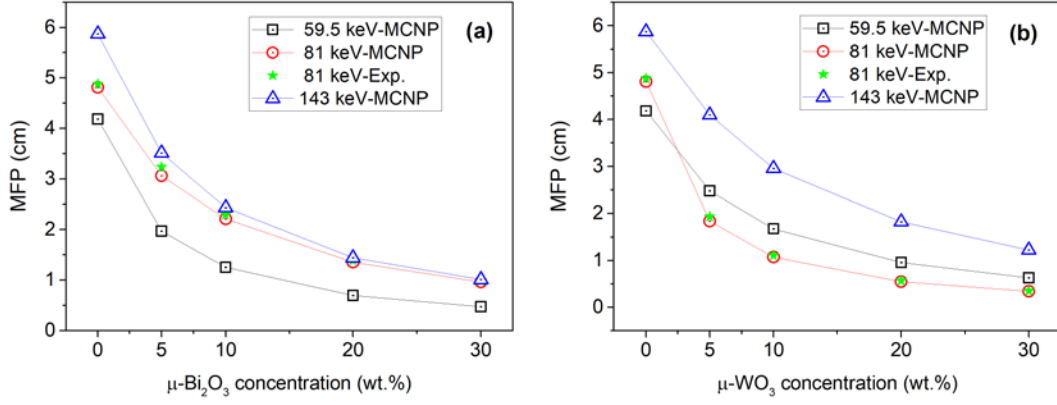
1173 keV										
Numune	MİKRO				NANO					
	MAC-t DeneySEL	HVL-t DeneySEL	MAC-t MCNP	HVL-t MCNP	MAC-t DeneySEL	HVL-t DeneySEL	MAC-HT DeneySEL	HVL-HT DeneySEL		
Epoksi (Ep.)	0,059	10,401	0,060	10,304						
Ep./ %2,5 Bi ₂ O ₃					0,067	9,366	0,066	9,160		
Ep./ %5 Bi ₂ O ₃	0,059	10,134	0,060	10,044	0,066	9,272	0,066	8,978		
Ep./ %10 Bi ₂ O ₃	0,059	9,894	0,060	9,728	0,068	8,730	0,066	8,632		
Ep./ %20 Bi ₂ O ₃	0,060	9,001	0,060	9,002	0,067	7,961	0,066	7,832		
Ep./ %30 Bi ₂ O ₃	0,060	8,663	0,060	8,583						
Ep./ %2,5 WO ₃					0,065	9,202	0,065	9,069		
Ep./ %5 WO ₃	0,059	10,228	0,060	10,102	0,065	8,889	0,068	8,683		
Ep./ %10 WO ₃	0,059	9,679	0,060	9,569	0,065	8,573	0,068	8,304		
Ep./ %20 WO ₃	0,059	8,666	0,060	8,542	0,065	7,912	0,067	7,585		
Ep./ %30 WO ₃	0,058	7,935	0,059	7,789						

Tablo 5.5 1332 keV radyasyon enerjisinde Epoksi/Bi₂O₃ ve Epoksi/WO₃ kompozitlerin her bir katkı oranı için μ/ρ ve HVL değerleri

1332 keV										
Numune	MİKRO				NANO					
	MAC-t DeneySEL	HVL-t DeneySEL	MAC-t MCNP	HVL-t MCNP	MAC-t DeneySEL	HVL-t DeneySEL	MAC-t DeneySEL	HVL-t DeneySEL	MAC-HT DeneySEL	HVL-HT DeneySEL
Epoksi (Ep.)	0,058	10,701	0,057	10,795						
Ep./ %2,5 Bi ₂ O ₃					0,061	10,246	0,062			9,794
Ep./ %5 Bi ₂ O ₃	0,058	10,411	0,058	10,383	0,061	9,989	0,062			9,601
Ep./ %10 Bi ₂ O ₃	0,057	10,184	0,058	10,076	0,063	9,386	0,062			9,256
Ep./ %20 Bi ₂ O ₃	0,057	9,484	0,057	9,542	0,062	8,624	0,062			8,360
Ep./ %30 Bi ₂ O ₃	0,056	9,203	0,056	9,160						
Ep./ %2,5 WO ₃					0,061	9,856	0,060			9,730
Ep./ %5 WO ₃	0,059	10,482	0,058	10,460	0,061	9,494	0,063			9,382
Ep./ %10 WO ₃	0,058	9,816	0,057	9,959	0,061	9,147	0,062			9,083
Ep./ %20 WO ₃	0,057	9,056	0,056	9,098	0,061	8,480	0,062			8,171
Ep./ %30 WO ₃	0,056	8,184	0,056	8,156						

Her iki tabloda incelendiğinde hem Bi_2O_3 hem de WO_3 katkıları epoksinin μ/ρ değerini kayda değer biçimde arttıramamıştır. En belirgin artışlar nano takviyelerde görülmüştür. Bu bağlamda, söz konusu kompozitlerin bu kadar yüksek enerjili gama ışınlarının korunması için uygun olmayacağı düşünülmektedir. Benzer değişimler HVL değerleri içinde geçerlidir. Nano katkıların bu enerjilerde daha parlak sonuçlar vermesinin en önemli nedeni malzemenin yoğunluğuna daha fazla katkı yapması ve artan yüzey alanıyla daha fazla etkileşme gerçekleştirebilmesidir. Tüm tablolar ele alındığında sentezlenen kompozitler özellikle tıpta kullanılan düşük enerjili gama kaynaklarını zırlamak için daha avantajlıdır. Bu noktayı daha detaylı inceleyebilmek için, mikro yapıli kompozitler için düşük enerjileri kapsayan MCNP6 simülasyonu yapılmıştır. Mikro yapıli kompozitlerin 59,5 keV ve 140,5 keV'e sahip fotonlara karşı radyasyon zırlama özellikleri simüle edilmiştir. Bu enerjilerin seçilmesinin nedeni Am-241 (59,5 keV) ve Tc-99 (140,5 keV) radyoaktif kaynaklarının tıpta yaygın biçimde kullanılmasıdır. Örneğin tiroidlerin fonksiyon testleri için Am-241 radyoaktif kaynağının gama ışınları kullanılırken, Tc-99m kaynağı tüm nükleer tıp görüntüleme uygulamalarının neredeyse %85'inde kullanılmaktadır [103]. Bu radyoaktif kaynakların tıpta yüksek oranda kullanılması nedeniyle özellikle sağlık çalışanlarının bu kaynakların yaydığı fotonlardan korunması önemlidir.

Bu aşamada mikro katkıli kompozitlerin radyasyon zırlama performansları, ortalama serbest yol bağlamında değerlendirilmiştir. Sonuçlar, MCNP6 ve 81 keV için deneysel değerler ile birlikte Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Düşük enerjilerde MCNP simülasyonu ve deneysel olarak elde edilen MFP sonuçları a)Bi₂O₃ katkısı b)WO₃ katkısı

Şekil incelendiğinde, 59,5 keV ve 140,5 keV fotonlara karşı en yüksek radyasyon zırlama kabiliyeti ve en düşük MFP (0,474 cm ve 1,012 cm) sonuçları Epoksi/%30 Bi₂O₃ kompoziti sağlamaktadır. Ayrıca Bi₂O₃ katkılı kompozitlerde foton enerjisi arttıkça ortalama serbest yol değerlerinde hiyerarşik bir artış gözlemlenirken, WO₃ katkılı kompozitlerde W'nin 69,4 keV'deki K-kenar süreksizliği nedeniyle aynı eğilim elde edilememiştir. Bu nedenle, WO₃ katkılı kompozitlerin 81 keV foton enerjisindeki ortalama serbest yol değerleri, 59,5 keV enerji için öngörülen değerlerden daha düşüktür.

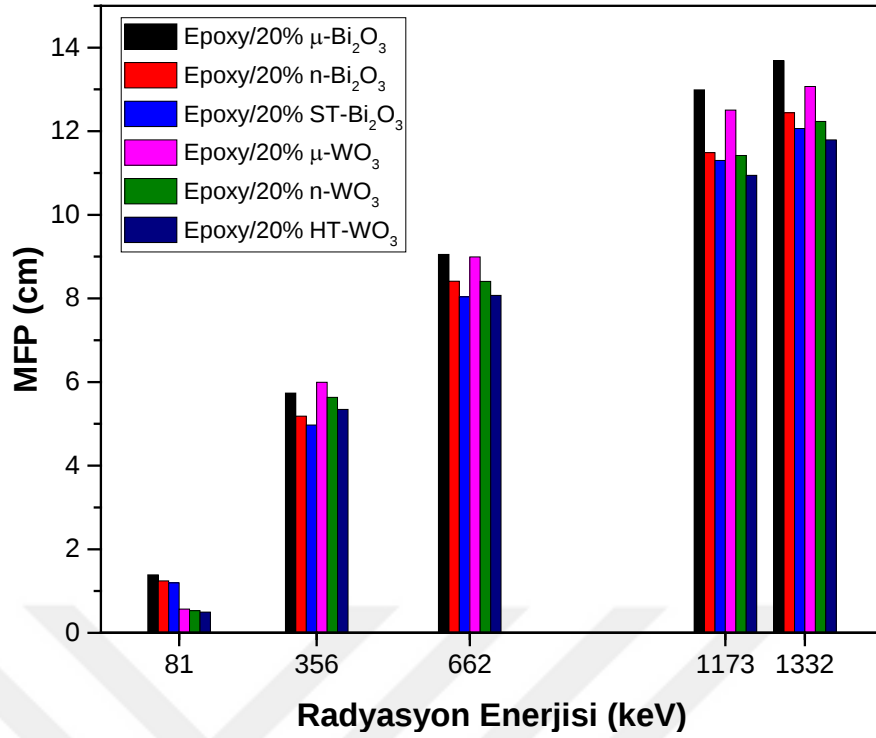
Bi₂O₃ ve WO₃ katkılar sadece mikro değil nano boyutlarda katılmıştır. Bu noktada hem nanoparçacıkların epoksi matris içinde topaklamasını önlemek hem de daha düşük katkı oranlarında takviye edici parçacığın kullanılmasının epoksinin radyasyon azaltma özelliği üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için nanoparçacık katkı yüzdesi daha düşük bir yüzdeden (%2,5) başlatılmış ve en fazla %20 oranında katılanmıştır. Nanokompozitlerin μ/ρ ve HVL değişimleri mikro katkılara benzer eğilimler sergilemişlerdir. Literatürdeki nanokompozitler ile epoksi kompozitlerin zırlama performansını μ/ρ değerleri üzerinden kıyaslanabilir. 81 keV için Epoksi / %20 n-WO₃ kompozitinin μ/ρ değerleri 1,413 cm²/g iken 356 keV için Epoksi / %20 n-Bi₂O₃'ün μ/ρ değeri 0,148 cm²/g'dir. Literatür yapılan ve ölçülen Epoksi/ %20 nano Gd₂O₃ kompoziti, sırasıyla 81 keV ve 356 keV fotonlar için 1 cm²/g ve 0,125 cm²/g μ/ρ değerlerine sahiptir [13]. Ayrıca El-Khatib ve arkadaşları HDPE/%40 nano CdO kompozitleri için 81 keV'de 1,165 cm²/g ve 356 keV'de 0,132 cm²/g μ/ρ değerlerine sahip olduğunu

bildirmiştir [96]. Bir diğer çalışmada, Malekzadeh ve arkadaşları silikon kauçuk/ %40 nano WO₃ kompozitinin 81 keV için 0,8 cm²/g ve 356 keV için 0,15 cm²/g μ/ρ değerlerine sahip olduğunu raporlamıştır [99]. Görüldüğü gibi, bu μ/ρ değerleri, 81 keV için Epoksi / %20 n-WO₃ ve 356 keV foton için Epoksi / %20 n-Bi₂O₃ μ/ρ değerlerimize göre ya daha düşüktür ya da hemen hemen eşittir. Bu nedenle, yüksek nanoparçacık katkılı epoksi kompozitlerin, nükleer tıpta kullanılan radyoaktif kaynakların zırhlamasında umut verici bir potansiyele sahip olduğu önerilebilir.

Cs-137 radyoaktif kaynağından yayılan fotonlar için epoksi nanokompozitler mikrolarla benzer zırhlama performansı göstermiştir. Ancak Epoksi / %20 n-WO₃ (0,089 cm²/g) ve Epoksi / %20 n-Bi₂O₃ (0,091 cm²/g) nanokompozitlerin 662 keV fotonlara karşı μ/ρ değerleri bilimsel literatürde bildirilen bazı nanokompozitlerden hala daha yüksektir. Örneğin, sıradan betonun 662 keV'deki (0,07812 cm²/g) μ/ρ değeri tez çalışmasında sunulan bu değerlerden daha düşüktür [104]. Öte yandan, PVA/nano %50 WO₃ kompozitin μ/ρ değeri 0,06 cm²/g [102] iken %20 nano WO₃ ve %20 nano Bi₂O₃ katkılı epoksi nanokompozitlerimiz çok daha iyi radyasyon zırhlama performansı sergiledi.

5.2 Kompozitlerin Radyasyon Zırhlamalarının Kıyaslanması

Bu bölümde en yüksek katkılı takviye elemanı ile sentezlenmiş kompozitlerin elde edilen MFP sonuçları Şekil 5.1' de verilmiştir. MFP parametresi radyasyonun malzeme içerisinde radyasyon etkileşmesi yaparak alacağı yolun bir ifadesi olduğu için iyi bir zırhlayıcının düşük MFP değerlerine sahip olmasını bekleriz.



Şekil 5.2 %20 katkılı tüm kompozitlerin deneysel MFP sonuçları

Şekilde görüldüğü gibi, seçilen altı kompozit arasından %20 HT-WO₃ katkısı, 81 keV'e sahip fotonlar için diğerlerine kıyasla son derece kısa bir MFP uzunluğu sağladı. Ayrıca 356 keV radyasyon zırhlamada %20 ST-Bi₂O₃ katkısının diğer numunelere göre daha avantajlı olduğu ortaya konmuştur. Öte yandan 662 keV, 1117 keV ve 1332 keV gibi daha yüksek enerjili fotonlar için %20 HT WO₃ katkısının daha başarılı olduğu görülmektedir. En yüksek mikro ve nanoparçacık katkı yüzdelere sahip kompozitlerin radyasyon kalkanlama yetenekleri, bazı geleneksel radyasyon zırhlayıcı malzemelerle karşılaştırılarak ikinci bir karşılaştırma da yapılmıştır.

Tablo 5.6 Farklı radyasyon enerjileri için en yüksek mikro ve nanoparçacık katkılı kompozitlerin ve bazı konvansiyonel zırhlayıcı malzemelerin μ/ρ değerleri

Enerji	81 keV	356 keV	662 keV	1173 keV	1333 keV
Malzeme					
Alüminyum	0,222		0,091	0,075	0,064
Bakır	0,795		0,089	0,054	0,081
Tuğla		0,105	0,080	0,062	0,051
Çimento		0,104	0,075	0,059	0,052
Beton		0,102	0,080	0,062	0,053
Ep./30% μ -Bi ₂ O ₃	0,758	0,154	0,089	0,060	0,056
Ep./30% μ -WO ₃	1,873	0,133	0,084	0,058	0,056
Ep./20% n-Bi ₂ O ₃	0,617	0,148	0,091	0,067	0,062
Ep./20% n-WO ₃	1,413	0,133	0,089	0,065	0,061

Tabloya göre, en yüksek takviye oranıyla sentezlenen tüm kompozitlerin, hemen hemen belirlenen bütün foton enerjilerinde, seçilen konvansiyonel radyasyon zırhlayıcılardan daha iyi radyasyon zırhlama performansına sahip olduğu görülmektedir. Konvansiyonel malzemeler, bazı yüksek foton enerjilerinde kompozitlerden biraz daha iyi radyasyon kalkanı yapıyor gibi görünse de, kompozitin şeffaflık ve düşük ağırlık özellikleri onları daha avantajlı kılmaktadır. Bu bağlamda hazırlanan numunelerin kalınlıkları biraz daha artırılarak bu dezavantaj ortadan kaldırılabilir.

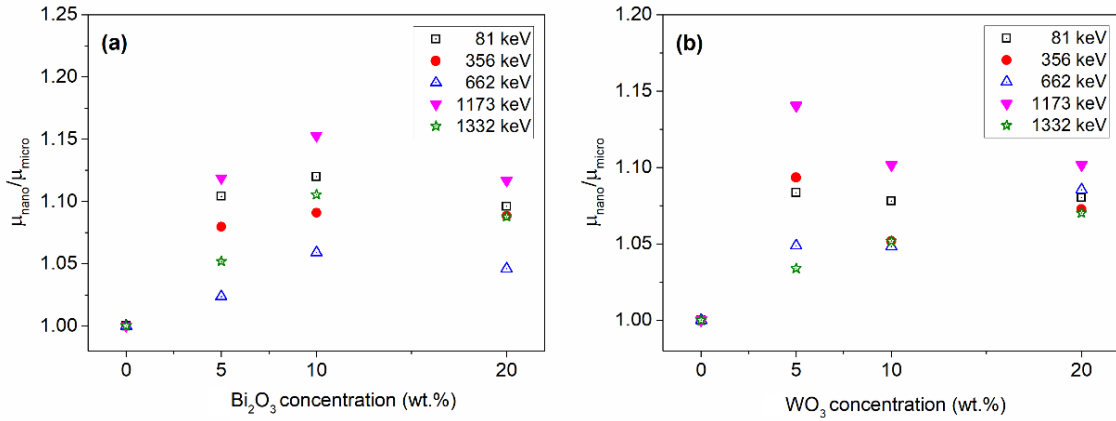
5.3 Parçacık Boyutu ve Radyasyon Zırhlama İlişkisi

Takviye parçacıklarının boyutlarının radyasyon zırhlamada üzerine etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla PSE faktörü olarak isimlendirilen parametre;

$$PSE = \frac{\mu_{nano}}{\mu_{mikro}} \quad (5.1)$$

formülü kullanılarak hesaplanır. Belirli katkı yüzdesi için PSE faktör değeri 1'den büyükse, bu yüzdedeki nanoparçacık takviyesinin aynı yüzdedeki mikro boyutlu takviyeden daha başarılı radyasyon zırhlaması sağladığı anlaşılır. Bu noktadan itibaren PSE'yi araştırmak için, Bi₂O₃ ve WO₃ partikülleri için PSE'nin ağırlıkça %0-

%20 katkılarındaki değerleri sırasıyla Şekil 14 (a) ve (b)'de 81 keV, 356 keV, 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV foton enerjileri için gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Farklı radyasyon enerjilerinde artan katkı oranıyla PSE faktörünün değişimi a) Bi₂O₃ katkısı b) WO₃ katkısı

Şekilde görüldüğü gibi, PSE faktörünün değişimi, epoksi matrisinde artan takviye edici parçacık oranıyla farklı eğilimler göstermiştir. İncelenen her bir foton enerjisine karşı %5 WO₃ parçacık ilavesi için en yüksek PSE faktörü değerleri gözlemlenmiştir ve daha sonra artan WO₃ parçacık katkısı ile azalma eğilimi göstermiştir. Öte yandan, %10 oranına kadar Bi₂O₃ katkısı PSE faktörünü arttırmış ve ardından her foton enerjisi için neredeyse sabit bir PSE değeri sergilemiştir. Daha da önemlisi, PSE faktörü, hem Bi₂O₃ hem de WO₃ için her katkı yüzdesi için ve tüm foton enerjilerine karşı her zaman 1'den büyük değerlere sahip olmuştur. Bu, epoksi matris, aynı katkı yüzdesine sahip aynı tip parçacıktan daha küçük boyutta (nanometre boyutunda) takviye edildiğinde, gelen fotonun kompozit ile etkileşime girme olasılığının arttığı anlamına gelir [105]. Polimer matrisindeki nano boyutlu takviye parçacıkların foton-madde etkileşiminin gerçekleştiği daha geniş bir yüzey alanı üzerinde düzgün bir dağılımı ile mümkündür. Özellikle nano boyutlu Bi₂O₃ ve WO₃ parçacıklarının eklenmesi, gelen radyasyon demetinin güçlü bir şekilde zayıflamasına ve fotonların daha fazla saçılmasına neden olur. Bu şekilde, nanoparçacık katkılı radyasyon koruyucu malzeme, Compton saçılımını gerçekleştirerek gelen foton enerjisini fotoelektrik mekanizma yoluyla emileceği 200 keV'nin altına düşürmeyi başarır [96]. Bu açıdan, Şekilde gösterildiği gibi, her

iki katkı maddesinin de nanoparçacık katkısı, 1173 keV'lik yüksek bir foton enerjisi için daha önemlidir.

Sonuç olarak, en yüksek Bi_2O_3 ve WO_3 mikro ve nanoparçacık içeriğine sahip epoksi tabanlı kompozitlerin nükleer tıpta kullanılan düşük enerjili gama ışınları için uygun bir radyasyon zırhlaması sunduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca ST ve HT metotlarıyla sentezlenen nanoparçacıklarında zırhlama çalışmalarında kullanılabileceği görülmüştür. Bu tez çalışması ışığında epoksi katkılı farklı metal oksitlerinde zırhlama çalışmalarında kullanılabileceği ve önemli bir alternatif oluşturabileceği söylenebilir. İleride farklı nano metal oksitler kullanılarak özellikle yüksek enerjilerde de olumlu sonuç verecek kompozitlerin üretimi hedeflenmektedir.

- [1] M. M. Abdel-Aziz, S. E. Gwaily, A. S. Makarious, and A.E.-S. Abdo, "Ethylene-propylene diene rubber/low density polyethylene/boron carbide composites as neutron shields," *Polymer degradation and stability*, vol. 50(2), pp. 235–240, 1995.
- [2] S. Nambiar, E. K. Osei, and J. T. W. Yeow, "Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays," *Journal of applied polymer science*, vol. 127(6), pp. 4939–4946, 2013.
- [3] E. E. Belgin, G. A. Aycik, A. Kalemteş, A. Pelit, D.A. Dilek, and M.T. Kavak, "Preparation and characterization of a novel ionizing electromagnetic radiation shielding material: hematite filled polyester based composites.," *Radiation Physics and Chemistry*. vol. 115, pp. 43–48, 2015.
- [4] K. S. Mann, A. Rani, and M. S. Heer, "Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays," *Radiation physics and chemistry*, vol. 106, pp. 247–254, 2015.
- [5] M. Afshar, J. Morshedian, and S. Ahmadi, "Radiation attenuation capability and flow characteristics of HDPE composite loaded with W, MoS₂, and B₄C," *Polymer Composites*. vol. 40(1), pp. 149–158, 2019.
- [6] D. Cao, G. Yang, M. Bourham, and D. Moneghan, "Gamma radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate)/Bi₂O₃ composites," *Nuclear engineering and technology*, vol. 52(11), pp. 2613–2619, 2020.
- [7] Y. Afkham, A. Mesbahi, A. Alemi, F. Zolfagharpour, and N. Jabbari, "Design and fabrication of a Nano-based neutron shield for fast neutrons from medical linear accelerators in radiation therapy," *Radiation Oncology*, vol. 15, pp. 1–13, 2020.
- [8] J. Kim, D. Seo, B. C. Lee, Y. S. Seo, and W. H. Miller, "Nano-W Dispersed Gamma Radiation Shielding Materials," *Advanced engineering materials*, vol. 16(9), pp. 1083–1089, 2014.
- [9] M. Z. Botelho, R. Künzel, E. Okuno, R. S. Levenhagen, T. Basegio, and C. P. Bergmann, "X-ray transmission through nanostructured and microstructured CuO materials," *Applied radiation and isotopes*, vol. 69(2), pp. 527–530, 2011.
- [10] T. Korkut, O. Gencel, E. Kam, and W. Brostow, "X-ray, gamma, and neutron radiation tests on epoxy-ferrochromium slag composites by experiments and Monte Carlo simulations," *International journal of polymer analysis and characterization*, vol. 18(3), pp. 224–231, 2013.
- [11] N. Z. N. Azman, S. A. Siddiqui, R. Hart, and I. M. Low, "Effect of particle size, filler loadings and x-ray tube voltage on the transmitted x-ray

- transmission in tungsten oxide-epoxy composites,” *Applied radiation and isotopes*, vol. 71, pp. 62–67, 2013.
- [12] L. Chang, Y. Zhang, Y. Liu, J. Fang, W. Luan, X. Yang, and W. Zhang, “Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding,” *Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms*, vol. 356, pp. 88–93, 2015.
- [13] R. Li, Y. Gu, Y. Wang, Z. Yang, M. Li, and Z. Zhang, “Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite,” *Materials research express*, vol. 4(3), p. 35035, 2017.
- [14] R. Li, Y. Gu, G. Zhang, Z. Yang, M. Li, and Z. Zhang, “Radiation shielding property of structural polymer composite: continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide,” *Composites science and technology*, vol. 143, pp. 67–74, 2017.
- [15] A. Canel, H. Korkut, and T. Korkut, “Improving neutron and gamma flexible shielding by adding medium-heavy metal powder to epoxy based composite materials,” *Radiation physics and chemistry*, vol. 158, pp. 13–16, 2019.
- [16] <http://ch302.cm.utexas.edu/nuclear/radioactivity/selector.php?name=b> and - stability, Erişim tarihi: 27.07.2021
- [17] E. Al-Sarray, “Investigation of radiation shielding properties of some composite materials,” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2016.
- [18] H. Cember, T. E. Johnson, and P. Alaei, “Introduction to health physics,” *Medical physics*. vol. 35(12), pp. 5959, 2008.
- [19] A. F. A. Abdlhamed, “Radiation shielding properties for some composite materials,” Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.
- [20] S. Asal, “Seramik matrisli radyasyon zırh malzemelerinin hazırlanması ve zırhlama performanslarının araştırılması,” İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [21] J. K. Shultis and R.E. Faw, *Fundamentals of nuclear science and engineering*. CRC press, 2016.
- [22] N. Tsoulfanidis, *Measurement and detection of radiation*. CRC press, 2010.
- [23] M. A. Ibrahim, “Attenuation of fission neutrons by some hydrogenous shield materials and the exponential dependence of the attenuated total neutron dose rate on the shield thickness,” *Applied radiation and isotopes*, vol. 52, pp. 47–53, 2000.
- [24] G. Gilmore, *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2011.

- [25] J. E. Martin, Radyasyon ve radyasyondan korunma fiziği. Palme Yayıncılık, 2013.
- [26] Y. Karabul, "Bazalt numunelerde EABF ve EBF parametrelerinin yeni bir metot ile tayini," İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [27] K. S. Krane, Nükleer Fizik 1. Palme Yayıncılık, 2001.
- [28] F. H. Attix, Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. John Wiley & Sons, 2008.
- [29] M. G. Stabin, Fundamentals of nuclear medicine dosimetry. Springer Science & Business Media, 2008.
- [30] S. V Musolino, J. DeFranco, and R. Schlueck, "The ALARA principle in the context of a radiological or nuclear emergency," Health physics. vol. 94(2), pp. 109–111, 2008.
- [31] Ö. Vural, "Antimon (cevheri ve konsantresi) ve demir konsantresi katkılı silikon kauçuk malzemelerin diagnostik x-ışınlarını zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi," İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [32] Z. I. Karadoğan, "Ni, Fe, Co tabanlı süper alaşımların radyasyon zırhlama kabiliyetlerinin karşılaştırılması," Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2019.
- [33] Alara Prensibi Görseli, https://hsgm.saglik.gov.tr/depo/birimler/kanser-db/yayinlar/sunular/mamografi_cekim_teknikleri_20.11.2019/Radyasyon_Guvenligi_ve_Radyasyondan_Korunma_Is_Guvenligi_Uzmani_Mustafa_Al.pdf, Erişim tarihi: 27.07.2021
- [34] B. Aygün and A. Karabulut, "Development and Production of High Heat Resistant Heavy Concrete Shielding Materials for Neutron and Gamma Radiation," Eastern anatolian journal of science, vol. 4(2), pp. 24–30, 2018.
- [35] I. M. Nikbin, A. Rafiee, S. Dezhampanah, S. Mehdipour, R. Mohebbi, H. H. Moghadam, A. Sadrmomtazi, "Effect of high temperature on the radiation shielding properties of cementitious composites containing nano-Bi₂O₃," Journal of Materials Research and Technology, vol. 9(5), pp. 11135–11153, 2020.
- [36] A. M. Sukegawaa and Y. Anayamab, "Flexible heat-resistant neutron and gamma-ray shielding resins," Progress in nuclear science and technology, vol. 4, pp. 627–630, 2014.
- [37] N. Metropolis, "The beginning of the Monte Carlo Method," Los Alamos Science Special Issue, vol. 15, pp. 125–130, 1987.
- [38] R. Eckhardt, S. Ulam, and J. Von Neumann, "The Monte Carlo method," Los Alamos Science Special Issue, vol. 15, pp. 131–143, 1987.
- [39] M. Licata, "Combined Fast Neutron-Gamma Ray Computed Tomography and Radiography," Lancaster University, Lancaster, 2020.

- [40] C. Zhu and Q. Liu, "Review of Monte Carlo modeling of light transport in tissues," *Journal of biomedical optics*, vol. 18(5), pp. 50902, 2013.
- [41] M. Çağlar, "Tıbbi Radyasyon Zırhlamalarında Kullanılabilecek Çok Fonksiyonlu Mikro/Nano Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi," Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2021.
- [42] W. R. Nelson, H. Hirayama, and D. W. O. Rogers, "EGS4 code system," Stanford Linear Accelerator Center Technical Report, 1985.
- [43] H. Neuenschwander, T. R. Mackie, and P. J. Reckwerdt, "MMC-a high-performance Monte Carlo code for electron beam treatment planning," *Physics in medicine & biology*, vol. 40(4), pp. 543, 1995.
- [44] I. Kawrakow, E. Mainegra-Hing, D. W. O. Rogers, F. Tessier, B. R. B. Walters, "The EGSnrc code system: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport," NRC Report PIRS-701, 2021.
- [45] F. Salvat, J. M. Fernandez-Varea, J. Baro, and J. Sempau, "PENELOPE, and algorithm and computer code for Monte Carlo simulation of electron-photon showers," Report CIEMAT-799, 1996.
- [46] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al., "GEANT4—a simulation toolkit," *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 506(3), pp. 250–303, 2003.
- [47] J. F. Briesmeister, "MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code Version 4C," LA-13709-M Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [48] T. Goorley, M. James, T. Booth, et al., "Initial MCNP6 release overview," *Nuclear Technology*, vol. 180(3), pp. 298–315, 2012.
- [49] T. Goorley, "MCNPTM6.1.1-Beta Release Notes," LA-UR-14-24680 Los Alamos National Laboratory, 2014.
- [50] İ. Aral, "Alumina ve zirkonya esaslı seramiklerin nükleer zırhlama kabiliyetlerinin MCNP-X kodu ile araştırılması," Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı, 2019.
- [51] <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>, Erişim tarihi: 27.07.2021
- [52] V. Akıllı, "Bizmut oksit-kurşun klorür-tellür oksit sisteminin ısı, optik ve yapısal açıdan incelenerek camlaşma davranışlarının belirlenmesi ve camların radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi," Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [53] G. P. Glasgow, "Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities," *Medical physics*, vol. 33(9), pp. 3578, 2006.
- [54] N. J. Abualroos, N. A. B. Amin, and R. Zainon, "Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear

medicine: A review,” Radiation physics and chemistry, vol. 165, 108439, 2019.

- [55] M.M. Movahedi, A. Abdi, A. Mehdizadeh, et al., “Novel paint design based on nanopowder to protection against X and gamma rays,” Indian journal of nuclear medicine, vol. 29(1), pp. 18-21, 2014.
- [56] C. Fenga, S. Gangemi, V. Di Salvatore, L. Falzone, and M. Libra, “Immunological effects of occupational exposure to lead,” Molecular medicine reports, vol. 15(5), pp. 3355–3360, 2017.
- [57] H. H. Aygün, “Bizmut içeren polimerik malzemelerle X-ışını radyasyonuna karşı koruyucu yüzeylerin üretimi ve karakterizasyonu,” Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2018.
- [58] A. Araz, “Radyasyon zırhlama için yeni, hafif, kompozit malzemeler,” Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2020.
- [59] A. Kumar, “Gamma ray shielding properties of PbO-Li₂O-B₂O₃ glasses,” Radiation physics and chemistry, vol. 136, pp. 50–53, 2017.
- [60] V. Akıllı, “Bizmut oksit-kurşun klorür-tellür oksit sisteminin ısı, optik ve yapısal açıdan incelenerek camlaşma davranışlarının belirlenmesi ve camların radyasyon zırhlama özelliklerinin incelenmesi,” Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [61] Ö. Can, “İyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonun tutulması için polimer esaslı tungsten(volfram) tuzları katkılı yeni kompozit madde sentezi, karakterizasyonu ve deneme çalışmaları,” Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2016.
- [62] P. Kaur, “Scope Of Phosphate Glasses In Gamma Rays Shielding And Detection,” Sri Guru Granth Sahib World University, Punjab, 2019.
- [63] R. Ramamoorthi, “Investigations of mechanical properties of glass fiber modified epoxy nanocomposites,” Anna University, Tamil Nadu, 2015.
- [64] Z. Avcı, “Epoksi kompozit malzemelerde uçucu kül kullanımı,” Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2021.
- [65] M. Atagür “Farklı Yapıya Sahip Kil Mineralleri ile Termoplastik Poliüretan Kullanılarak Polimer Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu,” Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2016.
- [66] C. Gouri, C.P. Reghunadhan Nair, and R. Ramaswamy, “Adhesive and thermal characteristics of maleimide-functional novolac resins.,” Journal of applied polymer science. vol. 73, no. 5, pp. 695–705, 1999.
- [67] R. Rajasekaran, “Studies on development and Characterization of bismaleimide Modified polysulfone epoxy matrices and nanocomposites,” Anna University, Tamil Nadu, 2006.
- [68] S. A. Hashemi, S. M. Mousavi, R. Faghihi, M. Arjmand, S. Sina, and A. M. Amani, “Lead oxide-decorated graphene oxide/epoxy composite towards X-

- Ray radiation shielding,” *Radiation physics and chemistry*, vol. 146, pp. 77–85, 2018.
- [69] Y. Karabul and O. İçelli, “The Assessment of Usage of Epoxy Based Micro and Nano-Structured Composites Enriched with Bi_2O_3 and WO_3 Particles for Radiation Shielding,” *Results in physics*, vol. 26, 104423, 2021.
 - [70] N. Z. N. Azman, S. A. Siddiqui, and I. M. Low, “Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays,” *Materials science and engineering: C*, vol. 33(8), pp. 4952–4957, 2013.
 - [71] D. Yu, C. Shu-Quan, Z. Hong-Xu, et al., “Effects of WO_3 particle size in WO_3 /epoxy resin radiation shielding material,” *Chinese Physics Letters*, vol. 29(10), pp. 108102, 2012.
 - [72] N. Z. N. Azman, S. A. Siddiqui, R. Hart, and I. M. Low, “Microstructural design of lead oxide-epoxy composites for radiation shielding purposes,” *Journal of applied polymer science*, vol. 128(5), pp. 3213–3219, 2013.
 - [73] S. Malekie and N. Hajiloo, “Comparative study of micro and nano size WO_3 /E44 epoxy composite as gamma radiation shielding using MCNP and experiment,” *Chinese physics letters*, vol. 34(10), p. 108102, 2017.
 - [74] M. A. Zazouli, Y. Mahdavi, E. Bazrafshan, and D. Balarak, “Phytodegradation potential of bisphenolA from aqueous solution by *Azolla Filiculoides*,” *Journal of environmental health science and engineering*, vol. 12, pp. 1–5, 2014.
 - [75] N. W. Manthey, F. Cardona, G. Francucci, and T. Aravinthan, “Thermo-mechanical properties of epoxidized hemp oil-based bioresins and biocomposites,” *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 32(19), pp. 1444–1456, 2013.
 - [76] X. Liu, W. Bian, and C. Tian, “Morphology, structure and optical properties of 3D Bi_2O_3 hierarchical architectures,” *Materials letters*, vol. 112, pp. 1–4, 2013.
 - [77] L. Yin, D. Chen, M. Hu, et al., “Microwave-assisted growth of In_2O_3 nanoparticles on WO_3 nanoplates to improve H_2S -sensing performance,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 2(44), pp. 18867–18874, 2014.
 - [78] M. B. Nayan, “Hydrothermal processing of Photocatalytic Nanomaterials for wastewater treatment,” *University of Mysore, Karnataka*, 2019.
 - [79] A. B. Djuricic, Y. Y. Xi, Y. F. Hsu, and W. K. Chan, “Hydrothermal synthesis of nanostructures,” *Recent patents on nanotechnology*, vol. 1(2), pp. 121–128, 2007.
 - [80] Y.X. Gan, A.H. Jayatissa, Z. Yu, X. Chen, and M. Li, “Hydrothermal synthesis of nanomaterials,” vol. 2020, 8917013, 2020.

- [81] J. Jabeen Fatima, V. Niveditha, and S. Sindhu, “ α -Bi₂O₃ photoanode in DSSC and study of the electrode–electrolyte interface,” *RSC advances*, vol. 5, pp. 78299–78305, 2015.
- [82] D. D. Nguyen, D. V. Dang, and D. C. Nguyen, “Hydrothermal synthesis and NH₃ gas sensing property of WO₃ nanorods at low temperature,” *Advances in natural sciences: nanoscience and nanotechnology*, vol. 6(3), p. 35006, 2015.
- [83] M. Yıldırım “Karadeniz bölgesi, rize ili toprak ve çay numunelerinde doğal radyasyon ölçümleri,” Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [84] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Ba-133_tables.pdf. Erişim tarihi: 27.07.2021
- [85] <https://semspub.epa.gov/work/HQ/176308.pdf>. Erişim tarihi: 27.07.2021
- [86] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf. Erişim tarihi: 27.07.2021
- [87] B. J. Parsons, “Sterilisation of healthcare products by ionising radiation: principles and standards,” *Biotextiles as Medical Implants*, Elsevier, 2013.
- [88] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf, Erişim tarihi: 27.07.2021
- [89] K.C. Ma, T.W. Holmes, and A. Pourmorteza, “K-edge imaging visualization of multi-material decomposition in CT using virtual mono-energetic images,” 15th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, 110722H. 2019.
- [90] J. Kim, D. Bar-Ness, S. Si-Mohamed, et al., “Assessment of candidate elements for development of spectral photon-counting CT specific contrast agents,” *Scientific reports*, vol. 8(1), pp. 1–12, 2018.
- [91] M. Algethami, A. Blencowe, B. Feltis, and M. Geso, “Bismuth Sulfide Nanoparticles as a Complement to Traditional Iodinated Contrast Agents at Various X-Ray Computed Tomography Tube Potentials,” *Journal of nanomaterials & molecular nanotechnology*, vol. 6(4), pp. 25–28, 2017.
- [92] K. A. Mahmoud, M. I. Sayyed, and O. L. Tashlykov, “Comparative studies between the shielding parameters of concretes with different additive aggregates using MCNP-5 simulation code,” *Radiation physics and chemistry*, vol. 165, pp. 108426, 2019.
- [93] F. I. El-Agawany, K. A. Mahmoud, E. Kavaz, R. El-Mallawany, and Y. S. Rammah, “Evaluation of nuclear radiation shielding competence for ternary Ge–Sb–S chalcogenide glasses,” *Applied physics A*, vol. 126(4), pp. 1–11, 2020.
- [94] Y. Hou, M. Li, Y. Gu, Z. Yang, R. Li, and Z. Zhang, “Gamma ray shielding property of tungsten powder modified continuous basalt Fiber reinforced epoxy matrix composites,” *Polymer composites*, vol. 39, pp. E2106–E2115, 2018.

- [95] V. P. Singh, M. E. Medhat, and S. P. Shirmardi, "Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimental results," *Radiation physics and chemistry*, vol. 106, pp. 255–260, 2015.
- [96] A. M. El-Khatib, M. I. Abbas, M. Abd Elzaher, et al., "Gamma attenuation coefficients of nano cadmium oxide/high density polyethylene composites," *Scientific reports*, vol. 9(1), pp. 1–11, 2019.
- [97] M. Büyükyıldız, M. A. Taşdelen, Y. Karabul, M. Çağlar, O. İçelli, and E. Boydaş, "Measurement of photon interaction parameters of high-performance polymers and their composites," *Radiation effects and defects in solids*, vol. 173, pp. 474–488, 2018.
- [98] K. Srinivasan and E. J. J. Samuel, "Evaluation of radiation shielding properties of the polyvinyl alcohol/iron oxide polymer composite," *Journal of medical physics*, vol. 42(4), pp. 273, 2017.
- [99] R. Malekzadeh, V. Sadeghi Zali, O. Jahanbakhsh, M. Okutan, and A. Mesbahi, "The preparation and characterization of silicon-based composites doped with BaSO₄, WO₃, and PbO nanoparticles for shielding applications in PET and nuclear medicine facilities," *Nanomedicine journal*, vol. 7(4), pp. 324–334, 2020.
- [100] M. J. R. Aldhuhaibat, M. S. Amana, N. J. Jubier, and A. A. Salim, "Improved gamma radiation shielding traits of epoxy composites: Evaluation of mass attenuation coefficient, effective atomic and electron number," *Radiation physics and chemistry*, vol. 179, pp. 109183, 2021.
- [101] G. A. Eid, A. I. Kany, M. M. El-Toony, I. I. Bashter, and F. A. Gaber, "Application of epoxy/Pb3O₄ composite for gamma ray shielding," *Arab. J. Nucl. Sci. Appl.* vol. 46(2), pp. 226–233, 2013.
- [102] F. Kazemi and S. Malekie, "A Monte Carlo study on the shielding properties of a novel polyvinyl alcohol (PVA)/WO₃ composite, against gamma rays, using the MCNPX code," *Journal of biomedical physics & engineering*, vol. 9(4), pp. 465-472, 2019.
- [103] B. Costa, D. Ilem-Özdemir, and R. Santos-Oliveira, "Technetium-99m metastable radiochemistry for pharmaceutical applications: old chemistry for new products," *Journal of coordination chemistry*, vol. 72(11), pp. 1759–1784, 2019.
- [104] H. O. Tekin, V. P. Singh, and T. Manici, "Effects of micro-sized and nano-sized WO₃ on mass attenuation coefficients of concrete by using MCNPX code," *Applied radiation and isotopes*, vol. 121, pp. 122–125, 2017.
- [105] H. E. Hassan, H. M. Badran, A. Aydarous, and T. Sharshar, "Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for γ -rays," *Nuclear instruments and methods in physics research section B: beam interactions with materials and atoms*, vol. 360, pp. 81–89, 2015.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Karabul Yaşar, İçelli Orhan (2021). The assessment of usage of epoxy based micro and nano-structured composites enriched with Bi_2O_3 and WO_3 particles for radiation shielding. Results in Physics, 26(104423).

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü FDK-2019-3182 numaralı Doktora projesi-Araştırmacı. Radyasyon Zırhlıyıcı Polimerik Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Fiziksel Parametrelerinin Optimizasyonu.
2. 2228-B Doktora Burs Programı, TÜBİTAK.