

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇLENDİRİLMİŞ ÜÇLÜ KOMPOZİTLERİN GAMA
RADYASYONU ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Erdal SAĞ

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ferdi AKMAN

BİNGÖL-2023



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇLENDİRİLMİŞ ÜÇLÜ KOMPOZİTLERİN GAMA RADYASYONU
ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Prof. Dr. Ferdi AKMAN danışmanlığında, Erdal SAĞ tarafından hazırlanan bu çalışma .../.../2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan :

İmza :

Üye :

İmza :

Üye :

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

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

Prof. Dr. Zafer ŞİAR

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Prof. Dr. Ferdi AKMAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamda deneysel ölçümlerin alınmasında desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL'a, tezim için gerekli numunelerin hazırlanması hususunda desteklerinden dolayı Öğr. Gör. Hasan POLAT'a ve tezin hazırlanma sürecinde katkılarından dolayı Meryem YILMAZ'a teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Erdal SAĞ
Bingöl 2023

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. KURAMSAL TEMELLER	16
3.1. Radyasyonun Sınıflandırılması	16
3.2. İyonlaştırıcı Radyasyonun Türleri ve Kaynakları	17
3.2.1. X ve Gama Işınları	17
3.2.2. Elektronlar	18
3.2.3. Pozitronlar	18
3.2.4. Nötronlar	18
3.2.5. Ağır Yüklü Parçacıklar.....	19
3.3. Foton-Madde Etkileşim Süreçleri	19
3.3.1. Fotoelektrik Olay.....	20
3.3.2. Compton Saçılması	22
3.3.3. Çift Oluşum	25
3.4. Azaltma Katsayıları.....	26
3.5. İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri.....	31
3.6. Radyasyondan Korunmanın Amaçları	36
3.7. Mesafe, Zaman ve Zırhlama.....	37
3.8. Gama Işını Zırhlaması	37
3.9. Katıların Bant Yapısı.....	38
3.9.1. Yarıiletkenler.....	42
3.10. Yarıiletken Eklemler	46

3.11. Yarıiletken Dedektörler.....	48
4. MATERYAL VE YÖNTEM	54
4.1. Üçlü Kompozitlerin Üretim Süreci	54
4.2. Deneysel Süreç.....	55
4.3. Gama Radyasyonu Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi.....	56
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
5.1. Radyasyon Koruma Verimi ve Radyasyon Geçirme Oranı Araştırma Bulguları ...	61
5.2. Kütle Azaltma Katsayısı Araştırma Bulguları	66
5.3. Lineer Azaltma Katsayısı Araştırma Bulguları.....	70
5.4. Yarı Kalınlık Değeri, Onda-bir Kalınlık Değeri ve Ortalama Serbest Yol Araştırma Bulguları	74
5.5. Moleküler, Atomik ve Elektronik Tesir Kesitleri Araştırma Bulguları	86
5.6. Etkin Atom Numarası, Elektron Yoğunluğu ve İletkenlik Araştırma Bulguları ...	98
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ	125

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μ	: Lineer Azaltma Katsayısı
μ/ρ	: Kütle Azaltma Katsayısı
A	: Atomik Ağırlık
HPGe	: Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörü
I	: Başlangıçtaki foton şiddeti
I_0	: Soğurucudan Geçtikten Sonraki Foton Şiddeti
E_g	: Yasak Enerji Aralığı
Mekp	: Metil Etil Keton Peroksit
N_{etk}	: Etkin Elektron Yoğunluğu
OSY	: Ortalama Serbest Yol
OKD	: Onda bir Kalınlık Değeri
RKV	: Radyasyon Koruma Verimi
RGO	: Radyasyon Geçirme Oranı
x	: Soğurucu Kalınlığı
Z	: Atom Numarası
Z_{etk}	: Etkin Atom Numarası
σ	: Tesir Kesiti
$\sigma_{t,a}$	: Toplam Atomik Tesir Kesiti
$\sigma_{t,m}$	: Toplam Moleküler Tesir Kesiti
σ_{etk}	: Etkin İletkenlik
$\sigma_{t,e}$	: Toplam Elektronik Tesir Kesiti
YKD	: Yarı Kalınlık Değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Radyasyonun sınıflandırılması	16
Şekil 3.2.	(a) Fotoelektrik olayın deneysel gösterimi. (b) Gelen ışığın iki farklı şiddetteki akım değerlerinin potansiyel farka göre değişimlerinin gösterimi (Turner, 1995)	20
Şekil 3.3.	Compton saçılmasının gösterimi.....	23
Şekil 3.4.	Belirli açılarda saçılan fotonların şiddetine bağlı olarak dalga boyunun gösterimi (Turner, 1995)	23
Şekil 3.5.	Compton saçılmasının (a) çarpışmadan önceki ve (b) çarpışmadan sonraki gösterimi.....	24
Şekil 3.6.	Levha üzerine gelen N0 tek foton enerjili fotonların dar huzme gösterimi (Turner, 1995)	27
Şekil 3.7.	Lineer azaltma katsayısını ölçmek için kullanılan deneysel dar ışın geometrisinin gösterimi	28
Şekil 3.8.	Çeşitli elementlerin kütle azaltma katsayısı (Turner, 1995)	39
Şekil 3.9.	Çeşitli malzemelerin kütle azaltma katsayısı	30
Şekil 3.10.	Soğurulan radyasyon enerjisinin fiziksel ve biyolojik etkilerinin gelişim süreci	32
Şekil 3.11.	Radyasyon zararlarının şematik gösterimi	33
Şekil 3.12.	İnsanlar ve çeşitli memeliler için vücutta biriken ^{137}Cs 'un azalması (Grupe, 2010)	35
Şekil 3.13.	μx 'in bir fonksiyonu olarak 0,1-10 MeV arasındaki tek foton enerjili fotonların yığılma faktörünün gösterimi (Turner, 1995)	38
Şekil 3.14.	Katıların bant yapısının gösterimi.....	39
Şekil 3.15.	Mutlak sıcaklıklarda bir iletkenin iletim bandındaki bağlı elektron sayısı (a) $T>0$ ve (b) $T=0$	41
Şekil 3.16.	Valans ve iletkenlik bantlarının bağlı elektron sayısı (a) Yalıtkan $T>0$ ve (b) Yarıiletken $T>0$	42

Şekil 3.17. Oda sıcaklığında içsel bir yarı iletkenin enerji durumlarının gösterimi (Turner, 1995)	43
Şekil 3.18. n-tipi yarıiletkenin gösterimi (Turner, 1995)	44
Şekil 3.19. Arsenik (As) d6n6r atomları i7eren germanyum (Ge) kristali i7in enerji seviyesi diyagramı	45
Şekil 3.20. Galyum (Ga) alıcı atomları i7eren germanyum (Ge) kristali i7in enerji seviyesi diyagramı	45
Şekil 3.21. n-p eklemının enerji seviye diyagramı	46
Şekil 3.22. n-p eklemlerine uygulanan (a) ileri ve (b) ters gerilimin ve akım-voltaj eğrilerinin g6sterimi.....	48
Şekil 3.23. Bir Ge (Li) detekt6r6n6n işleyişinin g6sterimi	49
Şekil 3.24. Ge(Li) ve HPGe dedekt6rlerinin silindirik, dairesel ve yarı dairesel t6rlerinin şematik g6sterimi (Nuttall, 1980)	50
Şekil 4.1. Deney geometrisi	56
Şekil 5.1. FeCrBi kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonu7larının enerji ile değişimi.....	64
Şekil 5.2. FeCrMn kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonu7larının enerji ile değişimi.....	64
Şekil 5.3. FeCrMo kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonu7larının enerji ile değişimi.....	64
Şekil 5.4. FeCrBi kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon ge7irme oranı sonu7larının enerji ile değişimi.....	65
Şekil 5.5. FeCrMn kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon ge7irme oranı sonu7larının enerji ile değişimi.....	65
Şekil 5.6. FeCrMo kodlu 67l6 kompozitlere ait radyasyon ge7irme oranı sonu7larının enerji ile değişimi.....	66
Şekil 5.7. FeCrBi kodlu 67l6 kompozitlere ait k6tle azaltma katsayısı sonu7larının enerji ile değişimi.....	68
Şekil 5.8. FeCrMn kodlu 67l6 kompozitlere ait k6tle azaltma katsayısı sonu7larının enerji ile değişimi.....	69
Şekil 5.9. FeCrMo kodlu 67l6 kompozitlere ait k6tle azaltma katsayısı sonu7larının enerji ile değişimi.....	70

Şekil 5.10. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	72
Şekil 5.11. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	73
Şekil 5.12. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	74
Şekil 5.13. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının	
enerji ile değişimi.....	76
Şekil 5.14. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının	
enerji ile değişimi.....	77
Şekil 5.15. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının	
enerji ile değişimi.....	78
Şekil 5.16. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	80
Şekil 5.17. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	81
Şekil 5.18. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	82
Şekil 5.19. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol sonuçlarının	
enerji ile değişimi.....	84
Şekil 5.20. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	85
Şekil 5.21. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	86
Şekil 5.22. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	89
Şekil 5.23. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	90
Şekil 5.24. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti	
sonuçlarının enerji ile değişimi.....	91
Şekil 5.25. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının	
enerji ile değişimi.....	93

Şekil 5.26. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi.....	94
Şekil 5.27. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi.....	95
Şekil 5.28. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi.....	96
Şekil 5.29. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi.....	97
Şekil 5.30. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi.....	97
Şekil 5.31. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi.....	100
Şekil 5.32. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi.....	101
Şekil 5.33. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi.....	102
Şekil 5.34. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi.....	104
Şekil 5.35. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi.....	105
Şekil 5.36. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi.....	106
Şekil 5.37. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi.....	108
Şekil 5.38. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi.....	109
Şekil 5.39. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi.....	110

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Bazı malzemelerin kütle azaltma katsayıları	30
Tablo 4.1. Üçlü kompozitlerin üretiminde kullanılan malzeme miktarları	55
Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan radyoaktif kaynaklara ait bilgiler	56
Tablo 5.1. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)	61
Tablo 5.2. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)	62
Tablo 5.3. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)	62
Tablo 5.4. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçları (%)	62
Tablo 5.5. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçları (%)	63
Tablo 5.6. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçları (%)	63
Tablo 5.7. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm ² /g)	67
Tablo 5.8. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm ² /g)	67
Tablo 5.9. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm ² /g)	68
Tablo 5.10. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm ⁻¹)	71
Tablo 5.11. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm ⁻¹)	71
Tablo 5.12. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm ⁻¹)	72

Tablo 5.13. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)	75
Tablo 5.14. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)	75
Tablo 5.15. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)	76
Tablo 5.16. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)	78
Tablo 5.17. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)	79
Tablo 5.18. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)	79
Tablo 5.19. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)	82
Tablo 5.20. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)	83
Tablo 5.21. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)	83
Tablo 5.22. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları (x10-19) (molekül/cm ²)	87
Tablo 5.23. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları (x10-19) (molekül/cm ²)	88
Tablo 5.24. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları (x10-19) (molekül/cm ²)	88
Tablo 5.25. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları (x10-24) (atom/cm ²)	91
Tablo 5.26. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları (x10-24) (atom/cm ²)	92
Tablo 5.27. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları (x10-24) (atom/cm ²)	92
Tablo 5.28. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları (x10-25) (elektron/cm ²)	95

Tablo 5.29. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları (x10 ⁻²⁵) (elektron/cm ²)	96
Tablo 5.30. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları (x10 ⁻²⁵) (elektron/cm ²)	96
Tablo 5.31. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları ..	98
Tablo 5.32. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları.	99
Tablo 5.33. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları.	99
Tablo 5.34. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları (x10 ²⁷) (elektron/g)	102
Tablo 5.35. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları (x10 ²⁷) (elektron/g)	103
Tablo 5.36. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları (x10 ²⁷) (elektron/g)	103
Tablo 5.37. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları (x10 ¹⁰) (S/m)	106
Tablo 5.38. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları (x10 ¹⁰) (S/m)	107
Tablo 5.39. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları (x10 ¹⁰) (S/m)	107

GÜÇLENDİRİLMİŞ ÜÇLÜ KOMPOZİTLERİN GAMA RADYASYONU ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada; radyasyon zırhlama özelliklerini geliştirmek amacıyla doymamış polyester tabanlı ve inorganik bileşikler ile katkılanmış polimer kompozitler hazırlanmış ve bunların gama radyasyonu zırhlama özellikleri incelenmiştir. Bağlayıcı olarak doymamış polyester reçinenin, dolgu malzemesi olarak da ferro-krom ve manganez (Mn), molibden disülfür (MoS_2) veya bizmut oksiklorür'ün (BiOCl) kullanıldığı üçlü kompozitler üretilmiştir. Doymamış polyester reçine, kobalt oktoat (%6) ve metil etil keton peroksit kullanılarak polimer matriks elde edilmiştir ve dolgu malzemeleri belirli oranlarda bu polimer matrikse katkılanmıştır. Üretilen kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimi, radyasyon geçirme oranı, kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol, moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametreleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar 276,4 keV ile 1332,5 keV foton enerjisi aralığında ^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarından yayımlanan dokuz farklı enerjide ve HPGe detektörü yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, WinXCOM kullanılarak oluşturulan teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Radyasyon zırhlama parametreleri orta ve yüksek enerji bölgelerinde incelendiğinde, FeCrBi50 ile kodlanmış polimer kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu yapılan çalışmalar sonucunda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama; HPGe detektör; WinXCOM; Polimer kompozit; manganez; molibden disülfür; bizmut oksiklorür.

DETERMINATION OF GAMMA RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF REINFORCED TERNARY COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, in order to improve radiation shielding properties, unsaturated polyester-based polymer composites doped with inorganic compounds were prepared and their gamma radiation shielding properties were investigated. Ternary composites have been produced using unsaturated polyester resin as binder and ferro-chromium and manganese (Mn), molybdenum disulfide (MoS_2) or bismuth oxychloride (BiOCl) as filler materials. A polymer matrix was obtained by using unsaturated polyester resin, cobalt octoate (6%) and methyl ethyl ketone peroxide, and filling materials were added to this polymer matrix in certain proportions. To investigate the radiation shielding properties of the produced composites, radiation shielding efficiency, radiation transmission rate, mass and linear attenuation coefficients, half value layer, tenth value layer, mean free path, molecular, atomic, and electronic cross-sections, effective atomic number, effective electron density, and effective conductivity parameters were determined. Experimental studies were carried out at nine different energies emitted from ^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba and ^{137}Cs radioactive sources in the photon energy range between 276.4 keV and 1332.5 keV and with the help of an HPGe detector. The obtained experimental results were compared with the theoretical results created using WinXCOM. When radiation shielding parameters were examined in medium and high energy regions, it was found that polymer composite coded as FeCrBi50 were better radiation shielding materials than others.

Keywords: Radiation shielding; HPGe detector; WinXCOM; Polymer composite; manganese; molybdenum disulfide; bismuth oxychloride.

1. GİRİŞ

Radyasyon, madde tarafından ışınlar (dalga) ve/veya yüksek hızlı parçacıklar şeklinde yayımlanan enerjidir. Radyasyon, etkileşime girdiği atomlardan elektron koparmak için yeterli enerjiye sahip olup olmamasına ve ayrıca moleküllerdeki kimyasal bağları kırmak gibi daha düşük enerjili hasar verebilmesine bağlı olarak genellikle iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırılabilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, bir moleküldeki atomları hareket ettirme veya titreştirme için yeterli enerjiye sahiptir, ancak atomun elektronlarını uyaracak veya atomdan dışarıya çıkarabilecek (iyonizasyon) enerjiye sahip değildir. Bu tür radyasyona örnek olarak radyo dalgaları, mikrodalgalar ve görünür ışık verebilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon, yalnızca çarptığı malzemeye aktardığı ısı enerjisi miktarı kadar zararlı kabul edilir. İyonlaştırıcı radyasyon, sahip olduğu yüksek enerji ile elektronları atomdan uzaklaştırabilir. İyonlaştırıcı radyasyon canlılardaki atomları etkileyebildiğinden dolayı doku ve DNA'ya zarar vererek sağlık açısından risk oluşturur. Bu tür radyasyonlar, X-ışını tüplerinden, uzaydan gelen kozmik parçacıklardan ve radyoaktif elementlerden üretilebilir. Radyoaktif elementler, atomları radyoaktif bozunmaya maruz kaldıkça iyonize radyasyon yayar. Alfa (α) parçacıkları, beta (β) parçacıkları, gama (γ) ışınları, X-ışınları ve nötronlar iyonlaştırıcı radyasyonlardır.

α -parçacıkları pozitif yüklü ve iki proton ve iki nötrondan oluşan ağır parçacıklardır. α -parçacıkları yüksek enerjilere sahip olmalarına rağmen ağırlıklarından dolayı enerjilerinin kısa mesafelerde tüketirler ve atomdan çok uzak mesafelere gidemezler. α -parçacıklarına maruz kalmanın sağlığa etkisi, büyük ölçüde nasıl maruz kalındığına bağlıdır. Solunduğunda veya yutulduğunda önemli sağlık problemlerine neden olabilirlerken, cildin dış tabakasına bile nüfuz edecek enerjiden yoksundurlar. Bu nedenle vücudun dışı ile temas ettiğinde önemli bir sağlık sorunu oluşturmazlar.

β -parçacıkları, radyoaktif bozunma sırasında bir atomun çekirdeğinden yayılan, negatif yüklü, küçük kütleli ve hızlı hareket eden parçacıklardır. β -parçacıkları, α -parçacıklarına göre daha yüksek nüfuz etme kabiliyetine sahiptirler, ancak ürettikleri iyonizasyonlar daha geniş aralıklı olduğundan canlı dokuya ve DNA'ya daha az zarar verirler. Havada α -

parçacıklarına göre daha uzun mesafelerde yol alırlar, ancak bir giysi tabakası veya alüminyum gibi ince bir tabakalı malzeme tarafından kolaylıkla durdurulabilirler. Bazı β -parçacıkları cilde nüfuz edebilir ve cilt yanıkları gibi hasarlara sebep olurlar.

γ -ışınları, foton adı verilen yüksüz ve kütsüz enerji paketleridir. Hem enerjisi hem de kütlesi olan α ve β parçacıklarının aksine, γ -ışınları saf enerjidir. γ -ışınları tüm vücut için sağlık bakımından tehlike oluşturmaktadır. Cilt ve giysiler gibi α ve β parçacıklarını durdurabilen bariyerlere kolayca nüfuz edebilirler. γ -ışınlarının nüfuz etme gücü diğerlerine göre çok daha yüksek olduğundan onları durdurmak için genellikle birkaç santimetrelik kurşun plakalar veya onlarca santimetrelik betonlar kullanılır. γ -ışınları insan vücudundan tamamen geçebilir, geçerken doku ve DNA'ya zarar veren iyonizasyonlara neden olabilirler.

Nötronlar, malzemelere nüfuz etme konusunda olağanüstü bir yeteneğine sahip yüksek hızlı nükleer parçacıklardır. Malzemeleri radyoaktif hale getirebilme kabiliyetine sahiptirler. Nötronlar havada büyük mesafeler kat edebilirler ve onları engellemek için hidrojen içeriği yüksek çok kalın malzemeler tercih edilir. Nötronları zırlamak için günümüzde su ve beton yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sağlık açısından birçok tehlikesi bulunan iyonlaştırıcı radyasyonların birçok alanda kullanımı günümüzde mevcuttur ve bu alanların sayısı gelişen teknoloji ile artmaktadır. Radyasyon günümüzde tıpta, akademik araştırmalarda, endüstride ve elektrik üretiminde insanlığa fayda sağlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca radyasyonun tarım, arkeoloji, uzay araştırmaları, jeoloji ve daha birçok alanda faydalı uygulamaları bulunmaktadır. Uygun korunma yöntemleri ile radyasyondan bunlar gibi birçok alanda fayda sağlanmaktadır.

Radyasyondan korunma, iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerini en aza indirmek amacıyla gereksiz radyasyon maruziyetini azaltmayı amaçlar. Hayatımızın bir parçası olan radyasyondan korunmanın en iyi yollarından biri zaman, mesafe ve zırlama süreçlerinin uygulanmasıdır. Radyasyon ile ne kadar az zaman geçirirsek insan için o kadar faydalı olacaktır. Maruz kalma süresinin sınırlandırılması veya en aza indirilmesi insanın maruz kaldığı radyasyon dozunu düşük seviyelerde tutacaktır. Benzer şekilde, radyasyon kaynağı ile aramızdaki mesafeyi yüksek tutarsak, yine maruz kalınan doz seviyesi düşük olacaktır.

Bu iki süreçte ister istemez çalışan personel radyasyon ile temas halinde olacaktır. Radyasyon ile teması en düşük seviyede tutan süreç ise zırhlamadır. Zırhlama, radyasyon kaynağından korunmak için kaynak ile çalışan arasına yerleştirilen bir malzemedir. Günümüzde X ve γ -ışınları için zırhlama malzemesi olarak genellikle kurşun plakalar tercih edilirken, nötronlardan korunmak için ise su veya betonlar kullanılmaktadır. Çalışan ile radyasyon kaynağı arasına uygun zırh malzemesi yerleştirilerek, alınan doz büyük ölçüde azaltılır veya ortadan kaldırılabilir.

Günümüzde radyasyon zırhlamalarda en çok kullanılan malzemelerden biri kurşun veya türevlerinden üretilen levhalardır. Kurşun yüksek atom numarasına ve yoğunluğa sahip bir elementtir ve dezavantajlarından dolayı tercih edilebilirliği gün geçtikçe düşmekte ve maliyet bakımından ucuzdur. Kurşunun insan sağlığında onarımı güç sonuçlar bıraktığı bilinmektedir. Radyasyondan korunurken diğer taraftan zehirlilik seviyesi yüksek bir elemente maruz kalınmaktadır. Kurşun maruziyeti çocuklarda geri dönülmez ciddi sorunlar doğurabilir. Yüksek düzeyde kurşuna maruz kalan bir çocukta beyin ve merkezi sinir sistemi oldukça etkilendir. Çocuğu komaya sokabilir, kasılmalara neden olabilir hatta bu maruziyet ölümle bile sonuçlanabilir. Yüksek düzeyde kurşun maruziyetinden kurtulan çocuklar daha sonra hayatına zihinsel engelli veya davranış bozukluklarına sahip olarak devam etme ihtimali vardır. Çocukların beyin gelişimini etkileyerek zekâ katsayısının azalmasına, dikkat sürelerinin azalmasına ve anti sosyal davranışların artması gibi davranış değişikliklerine sebep olabilir. Bilinen güvenli bir kurşun maruziyet seviyesi yokken az veya çok maruz kalınmasında anemi, hipertansiyon, böbrek yetmezliği, immünotoksisite ve üreme organlarında toksisiteye sebep olur. Halk sağlığına olumsuzluk açısından önemli on kimyasaldan biri olan kurşundan işçilerin, çocukların ve üreme çağındaki kadınların korunması ayrı bir öneme sahiptir. Bu kadar ciddi sağlık problemlerine neden olan kurşunun, radyasyon zırhlama malzemesi olarak da en kısa zamanda terk edilmesi gerekmektedir.

Radyasyon zırhlama sıklıkla kullanılan bir diğer malzeme ise betondur. Betonun bileşenleri çoğu yerde kolayca bulunabildiği için tercih edilmesi yüksektir. Ayrıca, yüksek dayanıklılığı, bakım maliyetinin düşük olması ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi diğer avantajlarıdır. Avantajlarının yanında birçok dezavantaja da sahiptir. Betonun çekme dayanımı çok düşüktür ve betonun çekme bölgesinde takviye çubuklarının kullanılması

gerekmektedir. Beton birim ağırlık başına düşük mukavemete sahiptir. Betonda tam dayanım gelişimi 28 güne kadar uygun kürlenmeyi gerektirir, bu da betonun ekstra bakım ve iyi miktarda su gerektiği anlamına gelir ve bu da onu bir dezavantaj haline getirir. Beton üretim süreci, çelik ve cam gibi diğer yapı malzemelerine göre çok daha fazla enerji kullanıldığı ve daha fazla karbondioksit saldığı için çevre dostu değildir. Deprem gibi doğal afetlerde çatlamaya karşı hassastır, bu da radyasyon zırhlamanın güvenilir bir şekilde olamayacağını göstermektedir. Kurşun ve betonun bu dezavantajları dikkate alındığında radyasyon zırhlamada kullanılabilecek alternatif malzemelerin gereksinimi ortaya çıkmaktadır ve günümüzde alternatif malzeme arayışlarında kompozitler ön plana çıkmaktadır.

Kompozit malzeme, farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip en az iki malzemenin bir araya getirilmesiyle üretilir. Farklı özelliklerdeki malzemeleri bir araya getirmekte, kullanım alanı dikkate alınmaktadır. Örneğin daha güçlü, daha hafif, elektriğe, ısıya, korozyona dayanıklı olma gibi belirli bir işi yapmak için özelleşmiş bir malzeme oluşturulabilir. Kompozit üretimiyle bir malzemenin temel özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür. Kompozitlerin kullanım alanlarına göre birçok avantajları vardır. Bunlardan bazıları; düşük maliyet, tasarım esnekliği, çok çeşitli kimyasal ajanlara karşı direnç, düşük ağırlık, dayanıklılık, elektrik yalıtımı ve yüksek darbe mukavemeti örnek olarak gösterilebilir. Kompozitler havacılık, uzay çalışmaları, otomotiv, inşaat, elektrik ve denizcilik alanları olmak üzere gelişen teknoloji ile birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri de son yıllarda çalışılmaya başlanan radyasyon zırhlama alanıdır. Yüksek atom numaralı elementlerin gama zırhlamasında kullanılması ve düşük atom numaralı elementlerin nötron zırhlamada kullanılması dikkate alındığında iki alanda da kullanılabilecek optimum bir malzeme kompozitler ile sağlanabilir. Toksik olmayan, polimer-metal kompozit malzemeler, kurşun malzemelerle ilişkili tehlikeleri ortadan kaldırmak için verimli ve uygun maliyetli bir yol sağlar. Benzer şekilde mukavemet ve çatlama gibi istenmeyen özelliklere sahip betonun da alternatifi olarak kompozit malzeme kullanmak yerinde olacaktır.

Sunulan tez çalışmasında, bağlayıcı olarak polyeşter reçinenin, dolgu malzemesi olarak da ferro-krom ve manganez (Mn), molibden disülfür (MoS_2) veya bizmut oksiklorür'ün (BiOCl) kullanıldığı üçlü kompozitler üretilmiştir. Doymamış polyeşter reçine, kobalt

oktoat (%6) ve metil etil keton peroksit kullanılarak polimer matriks elde edilmiştir ve dolgu malzemeleri belirli oranlarda bu polimer matrikse katkılanmıştır. Üretilen kompozitlerin 276,4 keV ile 1332,5 keV enerji aralığında gama radyasyonu zırhlama özellikleri deneysel olarak HPGe detektör ve teorik olarak WinXCOM (Gerward vd., 2001) programı kullanılarak irdelenmiştir. Üretilen kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimi, radyasyon geçirme oranı, kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, serbest ortalama yol, moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametreleri belirlenmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Radyasyon zırhlamada genellikle tercih edilen kurşun plakalar ve betonların dezavantajları dikkate alındığında özellikle kurşun plakaların bu amaçla kullanılmasının acilen terk edilmesi gerekmektedir. Günümüzde alternatif zırh malzemesi olarak kullanılabilecek alaşımlar, seramikler ve camlar gibi malzemelerin yanında özellikle hafifliği ve içindeki bileşenlerin istenildiği gibi ayarlanabildiği inorganik bileşenlerle güçlendirilmiş kompozitlerin araştırmaları son yıllarda hız kazanmıştır. Bu amaçla radyasyon zırhlamada kullanmak için üretilen üçlü kompozit sayısına bakıldığında ikili kompozitlere göre sayılarının oldukça az olduğu görülmektedir. Bagheri vd. (2018) doymamış polyester, nano boyutta kil ve PbO malzemelerini kullanarak beş farklı oranda kompozit üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama karakteristiklerini incelemişlerdir. Ir-192, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynakları ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda %30 PbO ile güçlendirilmiş kompozitin diğerlerine göre gama radyasyonunu daha iyi azalttığını gözlemlemişlerdir. Kavanoz vd. (2019) farklı oranlardaki vanadyum, epoksi reçine ve antimon trioksit içeren üçlü kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini farklı enerjilerde incelemişlerdir ve 0,03 oranında antimon trioksit ve 160/900 oranlarında epoksi reçine ve vanadyum içeren numunenin en iyi radyasyon zırh özelliğine sahip olduğunu not etmişlerdir. Kiani vd. (2019) farklı oranlarda epoksi-kil-PbO içeren üçlü kompozitleri döküm metodu kullanarak üretmişlerdir ve bunların gama ışıını zırhlama özelliklerini 317, 661, 1172 ve 1332 keV foton enerjilerinde incelemişlerdir. Deneysel ve teorik hesaplamalar sonucunda ağırlıkça %30 PbO içeren kompozitin betona göre %47 daha iyi zırhlama özelliğine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Baykara vd. (2020) nötron ve gama zırhlama özelliklerini incelemek için eriyik ekstrüzyon işleme tekniği ile farklı oranlarda bor nitrit ve gadolinyum oksit içeren nano kompozitler üretmişlerdir ve bunların karakterizasyonunu SEM, TEM ve XRD ile gerçekleştirmişlerdir. Üretilen kompozitlerin gama zırhlama özelliklerinde önemli bir değişme olmadığını, ancak bunları nötron zırhlama amacıyla çeşitli alanlarda kullanılabileceğini not etmişlerdir. Zakaly vd. (2021) polipropilen tabanlı ve farklı oranlarda nano boyutlu kadmiyum oksit ve bentonit kullanarak üçlü kompozitler üretmişlerdir. 0,015-15 MeV enerji aralığında, üretilen kompozitlerin bazı zırhlama parametrelerini FLUKA kodu ve Microshield programını

kullanarak incelemişlerdir ve %40 bentonit içeren kompozitin üretilen kompozitler içinde en iyi gama radyasyonu zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ghrib vd. (2021) farklı oranlarda zirkonyum-titanyum-talyum içeren üçlü oksit seramiklerini katı-hal reaksiyonu metoduyla üretmişlerdir ve bunların gama, nötron, proton ve alfa zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Artan Ti_2O_3 miktarı ile gama zırhlama özelliklerinin iyileştiğini ancak, nötron ve yüklü parçacık zırhlama özelliklerinin kötüleştiğini rapor etmişlerdir. Bayoumi vd. (2022) tungsten tabanlı bazı üçlü kompozitleri tek kap hidrotermal yöntemiyle üretmişlerdir ve bunların radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için 662, 1173 ve 1332 keV foton enerjisinde lineer azaltma katsayısı, radyasyon koruma verimi, yarı kalınlık değeri ve ortalama serbest yol parametrelerini deneysel, teorik ve simülasyon kodu yardımıyla incelemişlerdir. Elde edilen datalardan $Pb_{0,82}Bi_{0,12}WO_4/W_{0,5}Pb_{0,5}B_{12}O_{20}$ kompozitinin en etkili gama zırh malzemesi olduğunu rapor etmişlerdir. Oğul vd. (2022) polyester reçine tabanlı ve %0-50 arasında %10'luk adımlarla bor ve kalay elementlerini yer değiştirme yaparak altı farklı üçlü kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama ve nötron radyasyonları zırhlama kapasitelerini incelemişlerdir. %50 kalay katkılı kompozitin hem gama hem de nötron radyasyonu zırhlama kabiliyetinin diğerlerinden daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. Wu vd. (2022) tungsten trioksit (WO_3), bizmut trioksit (Bi_2O_3) ve su bazlı poliüretan içeren üçlü kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. WO_3/Bi_2O_3 miktarının artmasıyla gama radyasyonu zırhlama kabiliyetlerinin iyileştiğini ve nano boyutlu malzemelerin kullanımının mikro boyutlulara göre daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Artan WO_3/Bi_2O_3 oranı ile çekme dayanımının önce arttığını sonra azaldığını ve uzama karakteristiğinin azaldığını not etmişlerdir. Erwina vd. (2023) selüloz, Fe_3O_4 ve Cu içeren üçlü kompozitleri karıştırma metodu ile üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Fe_3O_4 miktarını %94 olarak sabit bırakıp selüloz ve Cu miktarlarını ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında değiştirerek kompozitleri üretmişlerdir. Ağırlıkça %2 selüloz ve %4 Cu içeren kompozitin diğerlerine göre daha iyi foton azalttığını rapor etmişlerdir. Erkoyuncu vd. (2023) polyester tabanlı poliakrilonitril ve gadolinyum (III) sülfat katkılı üçlü kompozitlerin gama ve nötron zırhlama karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmalar deneysel, teorik ve GEANT4 kodu ile gerçekleştirmişlerdir. %50 gadolinyum (III) sülfat katkılı kompozitin gama zırhlama karakteristiğinin diğerlerine göre daha üstün olduğunu gözlemlenirken %50 poliakrilonitril katkılı kompozitin ise diğerlerine göre daha üstün nötron radyasyonu zırhlama kabiliyetine

sahip olduğunu raporlamışlardır. Özdemir vd. (2023) farklı oranlarda barit ve bizmut içeren polyester tabanlı üçlü kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimi, lineer ve kütle azaltma katsayıları, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu parametrelerini 276,4 ila 1332,5 keV enerji aralığında belirlemişlerdir. Çalışmalar deneysel, teorik ve GEANT4 kodu yardımıyla gerçekleştirmişlerdir ve bunlar arasında iyi bir uyum olduğunu raporlamışlardır. %50 bizmut katkılı kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu not edilmiştir. Oğul vd. (2023) polyester tabanlı, makro ve nano boyutlu molibden ve bor kullanarak %0-50 aralığında değişen ve yer değiştirme yaparak ürettikleri kompozitlerin nötron ve gama radyasyonları zırhlama kapasitelerini incelemişlerdir. Gama radyasyonu zırhlama çalışmaları deneysel, teorik ve simülasyon kodları ile gerçekleştirilirken, nötron zırhlama çalışmaları teorik ve simülasyon kodları ile gerçekleştirilmiştir. %50 molibden katkılı kompozitin en iyi gama ve nötron zırhlama kabiliyetine sahip olduğunu ve katkılanan bor miktarının nötron zırhlama kabiliyetini önemli derecede değiştirmediğini not etmişlerdir. Üçlü kompozit olarak literatürden elde edilebilen radyasyon zırhlama ile ilgili çalışmalar bunlar ile sınırlıdır.

İkili kompozitlere bakıldığında ise radyasyon zırhlama alanında üçlülere göre daha fazla çalışma bulunmaktadır ve bunların büyük çoğunluğu son yıllarda gerçekleştirilmiştir. Fan vd. (2009) $BaPbO_3$ ve Al'dan oluşan kompoziti toz metalürjisi yöntemiyle üreterek bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için 250 ve 662 keV enerjilerde kütle azaltma katsayısı ve yarı kalınlık değerlerini belirlemişlerdir. Üretilen kompozitin alüminyuma göre %14,74 oranında daha iyi gama zırhlama özelliğine sahip olduğunu not etmişlerdir. Harish vd. (2009) doymamış polyester tabanlı ve kurşun monoksit ile katkılanmış kompozitlerin fiziksel, mekanik ve gama ışını azaltma özelliklerini incelemişlerdir. 662 keV'de gerçekleştirilen deneyler sonucunda artan kurşun monoksit ile gama zırhlama özelliğinin iyileştiğini ve %50 kurşun monoksit içeren kompozitin diğerlerine göre daha iyi zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Azman vd. (2013) epoksi reçineye ağırlıkça %2-10 aralığında WO_3 katkılı olarak bir seri nano ve mikro boyutlu kompozitler üretmişlerdir ve bunların X-ışını geçirme karakteristiklerini 1-40 keV enerji arasında incelemişlerdir. Nano boyutlara sahip kompozitlerin X-ışınlarını daha iyi azalttığını, ancak yüksek enerjilerde parçacık boyutunun önemsiz olduğunu rapor etmişlerdir. Belgin vd. (2015) %10-50 aralığında doğal hematit içeren ve izoftalik polyester

bağlayıcı ile üretilmiş 5 farklı kompozitin gama ışını azaltma karakteristiklerini 60-1836 keV enerji aralığında 10 farklı foton enerjisinde belirlemişlerdir ve elde ettikleri sonuçları kurşun elementininkilerle karşılaştırmışlardır. Hazırlanan kompozitlerin kütle azaltma katsayılarının kurşun elementinin kütle azaltma katsayısının %98'ine kadar ulaştığını rapor etmişlerdir. Chang vd. (2015) ağırlıkça farklı oranlarda tungsten tozu ile epoksi reçineyi harmanlayarak 5 farklı kompozit üreterek, bunların Co-60 kaynağından yayınlanan fotonlarla gama radyasyonu azaltma kapasitelerini incelemişlerdir. Artan tungsten miktarı ile gama zırhlama özelliklerinin iyileştiğini, ancak ışın dozunun arttıkça termal kararlılık ve mekanik özelliklerinde dalgalanmalar olduğunu gözlemlemişlerdir. Ambika vd. (2017) ağırlıkça %0-60 arasında Bi_2O_3 katkılı ve izoftalik polyester reçine tabanlı 8 kompoziti açık kalıp döküm tekniği ile üretmişlerdir ve azaltma katsayıları, yarı kalınlık değerleri ve ortalama serbest yol gibi gama radyasyonu zırhlama parametrelerini 662 keV foton enerjisinde incelemişlerdir. Elde ettikleri datalardan artan Bi_2O_3 katkılama miktarı ile gama radyasyonu zırhlama özelliklerinin geliştiğini not etmişlerdir. Mahmoud vd. (2018) nano ve mikro boyutlu kurşun oksitler ile yüksek yoğunluklu polietilenleri kullanarak bir seri kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama ışını zırhlama kapasitelerini 59,53 ila 1332,50 keV aralığında 6 farklı enerjide hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan artan katkılama oranı ile zırhlama kapasitesinin arttığını ve nano boyutlu kompozitlerin mikro boyutlulara göre daha iyi zırhlama gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Cherkashina vd. (2019) polimid tabanlı ve %70 bizmut silikat ile güçlendirilmiş kompozitin radyasyon zırhlama özelliklerini 1 ila 6 MeV elektron enerjisi ve 0,4 ila 0,662 MeV foton enerjisi aralığında incelemişlerdir. Elde edilen datalardan etkin elektron aralığının polimide göre iki kat azaldığını ve 0,5 MeV ve 1 MeV foton enerjilerinde alüminyuma göre lineer azaltma katsayılarının sırasıyla 2,5 kat ve 1,4 kat daha büyük olduğunu not etmişlerdir. Muthamma vd. (2019) polivinil alkol tabanlı ve ağırlıkça %0-50 aralığında bizmut oksit ile güçlendirilmiş kompozitlerin 5,895 ve 6,490 keV enerjilerinde X-ışını azaltma ve 59,54 ve 662 keV enerjilerinde gama ışını azaltma kabiliyetlerini incelemişlerdir. Hem X- hem de gama ışınlarını azaltma kabiliyetlerinin artan bizmut oksit ile arttığını not etmişlerdir.

Tekin vd. (2020) demir ile güçlendirilmiş taban olarak doymamış polyester reçinenin kullanıldığı dört farklı kompozit üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu, yüklü parçacık ve nötron zırhlama kabiliyetlerini incelemişlerdir. %20 demir katkılı kompozitin

hem gama hem de yüklü parçacık zırhlama özelliklerinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu ve %5 demir katkılı kompozitin ise nötron zırhlama özelliğinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir. Adliene vd (2020) WO_3 ya da Na_2WO_4 içeren polidimetilsiloksan tabanlı ve Ta veya Ta_2O_5 içeren geleneksel silikon tabanlı esnek kompozitler üretmişlerdir ve bunların radyasyon koruma verimlerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan ağırlıkça %50 Ta veya Ta_2O_5 içeren kompozitlerin diğerlerine göre daha iyi bir zırh malzemesi olacağını önermişlerdir. Cao vd. (2020) ağırlıkça %0-44 aralığında Bi_2O_3 içeren poli(metil metakrilat) tabanlı kompozitleri hızlı ultraviyole kür yöntemi ile üretmişlerdir ve bunların gama ışını zırhlama özelliklerini 88 ila 1330 keV enerji aralığında 6 farklı enerjide NaI(Tl) detektör kullanarak incelemişlerdir. Kullanılan yöntem ile hızlı üretim yapılabileceğini ve artan Bi_2O_3 ile gama ışını zırhlama özelliklerinin geliştiğini rapor etmişlerdir. Kacal vd. (2020) ağırlıkça %2-10 aralığında Zn içeren ve polyester reçine tabanlı 5 farklı kompozit üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama ve basınç dayanımı özelliklerini karakterize etmişlerdir. İncelenen numuneler arasında en iyi zırh malzemesinin %10 Zn katkılı kompozitin olduğunu ancak, basınç dayanımı en yüksek kompozitin %2 Zn katkılı kompozit olduğunu not etmişlerdir. Turhan vd. (2020) ağırlıkça %25, 50, 75 ve 100 oranlarında hematit katkılı ve doymamış polyester reçine tabanlı kompozitlerin gama ışını azaltma karakteristiklerini 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında incelemişlerdir. Deneysel çalışmaları HPGe detektör ve teorik çalışmaları WinXCOM program ile gerçekleştirmişlerdir ve %100 hematit katkılı kompozitin diğerlerine göre daha iyi zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Akman vd. (2020a) $BaTiO_3$ veya $CaWO_4$ ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özelliklerini geniş bir enerji aralığında incelemişlerdir. %20 katkılı $BaTiO_3$ veya $CaWO_4$ kompozitlerin diğerlerine göre daha iyi bir zırh malzemesi olacağını gözlemlerken, bunlar arasında %20 katkılı $CaWO_4$ kompozitin diğerinden daha iyi bir zırh malzemesi olacağını not etmişlerdir. Ahmed vd. (2020) 0-%88,1 oranları arasında 6 farklı silikon tabanlı ve tungsten katkılı esnek kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama ışını azaltma özelliklerini 662 keV foton enerjisinde incelemişlerdir. Bu amaçla kütle azaltma katsayısı ve yarı kalınlık değeri parametrelerinin incelenmesi sonucu %88,1 katkılı kompozitin üretilen kompozitler içinde en iyi zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Akman vd. (2020b) HPGe detektör ve 8 farklı nokta kaynak kullanarak 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında ağırlıkça farklı oranlarda kurşun (II) iyodür içeren ve polyester tabanlı olan 4 farklı kompozitin gama ışını azaltma kabiliyetlerini incelemişlerdir. Teorik

sonuçlar ile karşılaştırılan deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ve %20 PbI₂ içeren kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir gama zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Olukatun vd. (2020) geri dönüşümden elde ettikleri düşük yoğunluklu polietilen tabanlı ve farklı oranlarda kil katkılanmış kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini 0,015 ila 15 MeV enerji aralığında XCOM, EGS5 ve Phy-X/PSD programlarını kullanarak incelemişlerdir ve artan kil miktarı ile gama radyasyonu zırhlama özelliklerinin iyileştiğini not etmişlerdir. Özkalaycı vd. (2020) ağırlıkça %0-20 aralığında PbCl₂ içeren 5 farklı polyester kompozitin gama radyasyonu azaltma karakteristiklerini deneysel olarak HPGe detektör ve Am-241, Ba-133, Co-57, Na-22, Cs-137, Eu-152, Mn-54 ve Co-60 radyoaktif kaynaklarını ve teorik olarak WinXCOM programını kullanarak incelemişlerdir. %20 PbCl₂ katkılı kompozitin %0 PbCl₂ katkılı kompozite göre 59,5 keV enerjide %244 daha iyi zırhlama özelliği gösterdiğini rapor etmişlerdir. Intom vd. (2020) doğal kauçuk ve Bi₂O₃ kullanarak ürettikleri kompozitlerin gama radyasyonu azaltma karakteristiklerini 223-662 keV foton enerjileri aralığında incelemişlerdir ve ağırlıkça %57,8 Bi₂O₃ içeren kompozitin en iyi zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Körpınar vd. (2020) polihidroksietil metakrilat polimer tabanlı ve ağırlıkça %10-50 aralığında tungsten (VI) oksit ile güçlendirilmiş kompozitleri radikal polimerizasyon yöntemi ile üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini NaI(Tl) detektör kullanarak incelemişlerdir. Bu amaçla yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol parametreleri incelenen kompozitler arasında %50 tungsten (VI) oksit içeren kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir zırh malzemesi olduğunu rapor etmişlerdir. Rashad vd. (2020) saf polivinilin ve bununla ağırlıkça %1 oranında nano boyutlu Ni, NiO ve Fe₂O₃ katkılanmış kompozitlerin gama ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan %1 Ni katkılı kompozitin kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve nötron saçılma tesir kesitinin diğerlerine göre daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Mirji ve Lobo (2020) polikarbonat tabanlı ve ağırlıkça %0,1-5,0 aralığında bizmut nitrat pentahidrat ile güçlendirilmiş kompozitlerin kütle azaltma katsayısı, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve ortalama serbest yol parametrelerini belirleyerek gama radyasyonu zırhlama özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Ağırlıkça %2,5 ve %5 bizmut nitrat pentahidrat içeren kompozitlerin iyi bir gama zırh malzemesi olabileceğini önermişlerdir. El-Toony vd. (2020) saf polivinil ester ve polivinil ester tabanlı Pb₂O₃ ile güçlendirilmiş kompozitin yarı kalınlık değeri, onda-bir

kalınlık değeri, ortalama serbest yol, lineer ve kütle azaltma katsayılarını belirlemişlerdir. 662 keV foton enerjisinde ve 2,5 cm numune kalınlığında saf polivinil esterin %32 ve güçlendirilmiş kompozitin %86 radyasyon koruması sağladığını not etmişlerdir.

Akman vd. (2021a) BiBr_3 veya PbSO_4 ile güçlendirilmiş polyester tabanlı kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında HPGe detektör yardımıyla deneysel ve XCOM programı yardımıyla teorik olarak incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda en yüksek BiBr_3 veya PbSO_4 katkılı kompozitlerin gama zırhlama özelliklerinin en iyi olduğu ve en düşük BiBr_3 veya PbSO_4 katkılı kompozitlerin nötron zırhlama özelliklerinin daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaçal vd. (2021) Li_2WO_4 katkılanmış polyester kompozitlerin gama zırhlama kabiliyetlerini geniş enerji aralığında deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda Na-22, Mn-54, Co-57, Co-60, Ba-133, Cs-137, Eu-152 ve Am-241 radyoaktif kaynakları kullanılmıştır ve artan Li_2WO_4 katkılama oranı ile gama zırhlama kapasitesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Dilsiz vd. (2021) ağırlıkça %5-20 oranlarında CdS içeren ve doymamış polyester tabanlı kompozitlerin gama ve nötron zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Artan enerji ile gama zırhlama özelliklerinin kötüleştiğini ve artan CdS miktarı ile hem gama hem de nötron zırhlama özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Akman vd. (2021b) 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında 22 farklı enerjide polyester tabanlı ve farklı oranlarda CdTe katkılanmış kompozitlerin gama radyasyonu azaltma karakteristiklerini deneysel ve teorik yollarla incelemişlerdir ve artan CdTe miktarına bağlı olarak gama azaltma karakteristiklerinin iyileştiğini not etmişlerdir. Aldhuhaibat vd. (2021) saf epoksi ve epoksi tabanlı farklı oranlardaki Al_2O_3 ve Fe_2O_3 katkılanmış kompozitlerin kütle azaltma katsayılarını, ortalama atom numaralarını, etkin atomik tesir kesitlerini, etkin atom numaralarını ve elektron yoğunluklarını NaI(Tl) detektör yardımıyla 662, 1173 ve 1333 keV foton enerjilerinde incelemişlerdir ve %15 Fe_2O_3 katkılı kompozitin diğerlerinden daha iyi bir zırh malzemesi olduğunu rapor etmişlerdir. Yu vd. (2021) ağırlıkça %0 ile %65 arasında $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ içeren epoksi tabanlı kompozitlerin X-ışını azaltma karakteristiklerini incelemişlerdir. 80 ve 100 kVp'de %65 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ katkılı kompozitin X-ışınlarının yaklaşık %97 ve %95 oranında azalttığını not etmişlerdir. Almisned vd. (2021) pirinç ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin gama zırhlama özelliklerini 0,060-1,408 MeV enerji aralığında deneysel olarak, ayrıca maruz kalma ve enerji soğurma yığılma faktörlerini, görelî doz dağılımlarını, proton ve alfa kütle durdurma güçlerini, proton ve alfa fırlatılma

aralıklarını ve son olarak hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitlerini teorik olarak incelemişlerdir. %20 pirinç katkılı kompozitin diğerlerine göre gama radyasyonu ve yüklü parçacık azaltma kabiliyetlerinin daha iyi olduğunu, ancak %5 pirinç katkılı kompozitin nötron zırhlama özelliğinin daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir. Nunez-Briones vd. (2021) polivinil klorür tabanlı ve %0, 10, 30 ve 50 oranlarında Bi_2O_3 içeren kompozitlerin X-ışını radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemek için üretmişlerdir. 20-61 kV aralığında zırhlama özellikleri incelenen kompozitlerde ağırlıkça %50 Bi_2O_3 içeren kompozitin en iyi zırh malzemesi olduğunu belirtmişlerdir. Ozel vd. (2021) BaZrO_3 veya $\text{Ba}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ile güçlendirilmiş polyester tabanlı kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama karakteristiklerini deneysel, teorik ve simülasyon kodu yardımıyla incelemişlerdir. Elde edilen datalar arasında iyi bir uyum olduğunu ve %20 BaZrO_3 veya $\text{Ba}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ile güçlendirilmiş kompozitlerin diğerlerine göre gama radyasyonu zırhlama özelliklerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Akman vd. (2021c) doymamış polyester tabanlı ve ağırlıkça %5, 10 ve 15 ferro-krom ile güçlendirilmiş kompozitlerin iyonlaştırıcı olmayan ve iyonlaştırıcı radyasyona karşı zırh özelliklerini incelemişlerdir. %10 ferro-krom katkılı kompozitin iyonlaştırıcı olmayan radyasyon için, %15 ferro-krom katkılı kompozitin ise iyonlaştırıcı radyasyon için uygun zırh malzemesi olabileceğini gözlemlemişlerdir.

Hosseini vd. (2022) ağırlıkça farklı oranlarda mikro veya nano boyutlu tungsten oksit içeren ve polivinil alkol tabanlı kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini Co-57, Tl-201, Ga-67, Tc-99m, Ba-133 ve Cs-137 radyoaktif kaynaklarını kullanarak incelemişlerdir. Artan tungsten oksit ile gama zırhlama özelliklerinin geliştiğini ve nano boyutlu olanların mikro boyutlu olanlara göre önemli derecede yüksek gama zırhlama sağladığını not etmişlerdir. Gilys vd. (2022) polidimetilsiloksan (PDMS) silikon tabanlı kalay, seryum oksit, tungsten oksit ve bizmut katkılı çok tabakalı kompozitlerin X-ışını azaltma kabiliyetlerini 40 ila 141 kV enerji aralığında incelemişlerdir. Esnek olan bu kompozit tabakaların incelenen enerji aralığında yüksek X-ışını azaltma kabiliyetlerine sahip olduklarını rapor etmişlerdir. Choudhary vd. (2022) hidroksiapatit tabanlı ve TiO_2 katkılılandırılmış kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama karakteristiklerini incelemek için lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu parametrelerini belirlemişlerdir. Artan TiO_2 miktarı ile gama radyasyonu zırhlama karakteristiklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Kilicoglu vd. (2022) yedi farklı kaynak ve HPGe detektör kullanarak deneysel olarak farklı oranlarda Pb katkılı ve polyester reçine tabanlı kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama kabiliyetlerini incelemişlerdir. 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar teorik ve FLUKA ve GEANT4 kodları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. %20 Pb içeren kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir gama radyasyonu zırh malzemesi olduğunu gözlemlemişlerdir. Moonkum vd. (2022) farklı oranlarda BaSO₄ veya Bi₂O₃ katkılı ve silikon kauçuk tabanlı çevre dostu ve esnek kompozitler üretmişlerdir. BaSO₄ veya Bi₂O₃ katkılı kompozitlerin 120 kVp’de birincil ışınları sırasıyla %90,19 ve %94,78 ve ikincil ışınları sırasıyla %92,72 ve %97,48 azalttığını not etmişlerdir. Akman vd. (2022) polyester reçine tabanlı ve reçinenin %5, 10 ve 15’i oranlarında niyobyum katkılı üç kompozit malzeme üretmişlerdir ve bunların iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan bazı radyasyonlara karşı zırh malzemesi kullanılabilirliğini incelemişlerdir. %15 niyobyum katkılı kompozitin hem foton zırhlamasında hem de elektromanyetik zırhlamada kullanılabileceğini not etmişlerdir. Özkalaycı vd. (2022) polyester tabanlı ve polyester ağırlığının %5, 10, 15 ve 20 oranlarında antimon içeren kompozitleri üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama kabiliyetlerini deneysel ve teorik yollarla incelemişlerdir. Bu amaçla lineer ve kütle azaltma katsayıları, yarı ve onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve radyasyon koruma verimi parametrelerini 59,5 ila 1408,0 keV enerji aralığında belirlemişlerdir. %20 antimon içeren kompozitin diğerlerinden daha uygun gama radyasyonu zırhlama malzemesi olabileceğini bildirmişlerdir.

Mahmoud vd. (2023a) epoksi tabanlı ve ağırlıkça %0,5 ila 10 Bi₂O₃ içeren kompozitlerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini MCNP-5 Monte Carlo kodu yardımıyla 15-661 keV foton enerjisi aralığında incelemişlerdir. Artan Bi₂O₃ miktarı ile gama radyasyonu zırhlama kapasitesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Abualroos vd. (2023) epoksi tabanlı ve farklı oranlarda tungsten karbit, tungsten karbit kobalt, bizmut oksit, baryum sülfat veya kalay içeren malzemelerle kompozitler üretmişlerdir ve bunların gama radyasyonu zırhlama özelliklerini 140 ve 364 keV enerjilerde incelemişlerdir. Katkılanan malzemelerin gama radyasyonu zırhlama özelliklerini iyileştirdiğini ve 140 keV’de %98 ve 364 keV’de %65 gama radyasyonu zırhlamasına ulaşıldığını raporlamışlardır. Abulyazied vd. (2023) poliaktik asit ve tungsten trioksit (WO₃) içeren kompozitleri çözelti karıştırma yöntemini kullanarak üretmişlerdir. Kompozitler ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranlarında WO₃

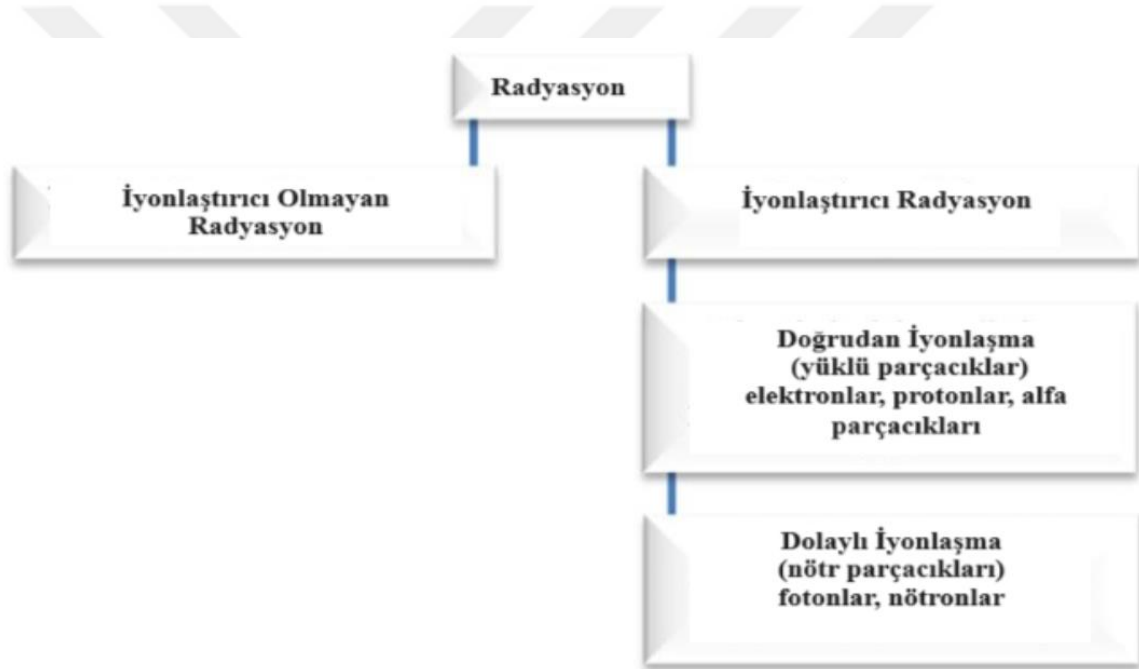
içermektedir. Üretilen kompozitlerin termal, optik ve gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemişlerdir. 80 ila 2164 keV gama enerjileri aralığında incelenen kompozitlerden %7 WO₃ içeren kompozitin en iyi gama radyasyonu zırh malzemesi olduğunu not etmişlerdir. Mahmoud vd. (2023b) poliepoksitler reçine tabanlı ve ağırlıkça %0-10 aralığında WO₃ içeren kompozitlerin gama radyasyonu azaltma kabiliyetlerini MCNP-5 Monte Carlo yardımıyla 121 ila 1408 keV foton enerji aralığında incelemişlerdir. Artan WO₃ miktarı ile gama radyasyonu azaltma kabiliyetinin arttığını, dolayısıyla en iyi gama radyasyonu zırh malzemesinin %10 WO₃ içeren kompozit olduğunu not etmişlerdir.

Literatür taramasından da görüldüğü gibi gama radyasyonu zırhlama alanında üçlü kompozitler ikili kompozitlere göre daha az çalışılmıştır. Hatta ikili kompozitler de son yıllarda çalışılmaya başlanmıştır. Sunulan çalışmada, literatürde eksiklik olarak görülen üçlü kompozitlerin gama zırhlama kabiliyetleri çalışılmıştır. Bu amaçla bağlayıcı olarak doymamış polyester ve dolgu malzemesi olarak da FeCr ve Mn, MoS₂ veya BiClO seçilerek bir dizi kompozit serisi üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde bağlayıcı miktarı sabit kalırken, FeCr ile Mn, MoS₂ veya BiClO arasında yer değiştirme yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin geniş bir enerji aralığında radyasyon koruma verimi ve geçirme faktörü parametreleri deneysel, kütle ve lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri, serbest ortalama yol, moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametreleri ise hem deneysel hem de teorik olarak hesaplanmıştır ve içlerinden en iyi gama radyasyonu zırh özelliğine sahip kompozit belirlenmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Radyasyonun Sınıflandırılması

Radyasyon maddeyi iyonize etme özelliğine bağlı olarak iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Radyasyonun sınıflandırılması Şekil 3.1’de verilmektedir. Bir atomu iyonlaştırmak için gereken minimum enerji, alkali metaller için birkaç eV enerji aralığında iken helyum (soygaz) için ise yaklaşık 24,6 eV’dir.



Şekil 3.1. Radyasyonun sınıflandırılması

İnsanlar her gün iyonlaştırıcı olmayan radyasyon kaynaklarını kullanıyor ve bunlara maruz kalıyorlar. Bu radyasyon türü atomları veya molekülleri iyonize etmeye yetecek kadar enerji taşımaz. Mikrodalga fırınlar, GPS, cep telefonları, televizyon istasyonları, FM ve AM radyo, bebek telsizleri, kablosuz telefonlar, garaj kapısı açıcıları ve amatör radyoların tümü iyonlaştırıcı olmayan radyasyon kullanır.

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun enerjisi, atoma bağlı elektronların iyonlaşma enerjisinden daha düşük olduğu için elektron koparamaz. İyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi, atoma bağlı elektronların iyonlaşma enerjisinden fazla olduğu için atomu doğrudan ya da dolaylı olarak iyonlaştırabilir. Doğrudan iyonlaşma elektron, proton ve alfa parçacıkları gibi yüklü parçacıklarda görülmektedir. Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, ortamdaki yüklü parçacık ve atomların yörünge elektronları arasında doğrudan Coulomb etkileşimi sayesinde ortamda enerji depolar. Dolaylı iyonlaşma fotonlar ve nötronlar gibi yüksüz parçacıklarda görülmektedir. Dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon, iki aşamalı bir süreç ile ortama enerji depolar. İlk aşamada, fotonlar elektronları ve pozitronları serbest bırakır, nötronlar ise protonları ya da daha ağır iyonları serbest bırakır ve böylece ortama bir yüklü parçacık salınır. İkinci aşamada ise salınan yüklü parçacıklar ortamdaki atomların elektronları ile Coulomb etkileşimleri sayesinde ortama enerji depolar.

İyonlaştırıcı radyasyonlar, birçok hastalığın tanısında ve tedavisinde kullanılmaktadır. Radyasyonu hastalıkların tedavisinde kullanan tıp dalına radyoterapi, terapötik radyoloji veya radyasyon onkolojisi denir. Tanısal radyoloji ve nükleer tıp, hastalıkların teşhisinde iyonlaştırıcı radyasyon kullanan tıp dallarıdır (Podgoršak, 2006).

3.2. İyonlaştırıcı Radyasyonun Türleri ve Kaynakları

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon, X ve gama ışınları, hafif yüklü parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar), ağır yüklü parçacıklar (protonlar, döteronlar ve alfa parçacıkları) ve daha ağır yüklü parçacıklar (örneğin, karbon-12) gibi çeşitli yüklü parçacık gruplarından oluşur.

3.2.1. X ve Gama Işınları

X-ışınları ve gama ışınları, yüksek enerjili elektromanyetik dalga olan iyonlaştırıcı radyasyonlardır. X-ışınları ve gama ışınlarını yüksüz, kütesiz fotonlar olarak ifade edebiliriz. X -ışınları ve gama ışınları yüksek giricilik özelliğine sahiptirler. Bu sebeple X ışınları ve gama ışınları, tanı ve teşhis, endüstri, tarım, nükleer tıp, radyasyon biyofiziği, radyasyondan korunma, kristalografi, spektrometri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. X ışınlarının enerjisi ve giriciliği genel olarak gama ışınlarından daha düşüktür. Gama ışınları radyoaktif atomların çekirdeğinden yayınlanırken, X- ışınları atomların çekirdeği

dışında üretilmektedir. X-ışınları ve γ -ışınlarından korunmada yaygın olarak yüksek yoğunluğa sahip olan kurşun ve türevleri kullanılmaktadır (Akman vd., 2019).

3.2.2. Elektronlar

Elektronlar, medikal fizikte önemli bir rol oynamaktadır. Kanser tedavisinde ışın olarak kullanılırlar. Elektronlar, foton ve elektron demetleri tarafından ortamda oluşan doz birikiminde sorumludurlar ve radyasyon dozimetrisinin deneysel ve teorik açıdan kontrol edilmesini sağlarlar. Elektronların farklı üretim yolları bulunmaktadır. Fotoelektrik olay sonucunda ortama salınan elektronlara fotoelektron, Compton saçılması sonucunda ortama salınan elektronlara Compton elektronları veya geri tepme elektronları denir. Çekirdek alanında veya bir orbital elektronu alanında çift oluşum etkileşimleriyle ortamda üretilen elektronlara çift oluşum elektronları, β^- radyoaktif bozunması sonucunda çekirdeklerden yayılan elektronlara beta parçacıkları denir. 4 MeV ile 30 MeV arasında kinetik enerjiye sahip olan lineer hızlandırıcılar, radyoterapide kullanılmaktadır. Betatronlar ve mikrotronlar birer lineer hızlandırıcı türüdür. Bu lineer hızlandırıcılar tarafından üretilen elektronlara mega voltaj elektronları denir. Auger olayı sonucunda üretilen elektronlara Auger elektronları denir. İç dönüşüm yoluyla üretilen elektronlara iç dönüşüm elektronları denir. Yüklü parçacık çarpışmaları yoluyla üretilen elektronlar, radyasyon doz ölçümünde kullanılır ve delta (δ) elektronları olarak adlandırılır (Podgoršak, 2006).

3.2.3. Pozitronlar

Çift oluşum veya üçlü oluşum yoluyla üretilen pozitronlara çift oluşum pozitronları denir. β^+ radyoaktif bozunması sonucunda yayılan pozitronlar ise pozitron emisyon tomografisinde (PET) kullanılır ve beta parçacıkları olarak ifade edilir.

3.2.4. Nötronlar

Atomun çekirdeğinden salınan yüksüz parçacıklardır. Nötronlar giricilik özellikleri oldukça yüksek olan iyonlaştırıcı radyasyonlardır. Nötronlar, havacılık, sağlık ve nükleer enerji santralleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Nötronlardan korunmak için yaygın olarak su ve beton kullanılmaktadır (Zhank ve ark., 2017).

3.2.5. Ağır Yüklü Parçacıklar

Ağır yüklü parçacıklar, radyoterapide kullanılmaktadır. Siklotronlarda, senkrotronlarda veya ağır parçacık lineer hızlandırıcılarında çekirdeklerin veya iyonların hızlandırılması sonucunda üretilir.

- Proton: Hidrojen-1 atomunun çekirdeğidir (${}^1_1H$).
- Döteron: Toplam 2,22 MeV bağlanma enerjisi ile birbirine bağlı bir proton ve nötrondan oluşan döteryum (${}^2_1H$) atomunun çekirdeğidir.
- Triton: Toplam 8,48 MeV bağlanma enerjisi ile birbirine bağlı bir proton ve iki nötrondan oluşan trityum (${}^3_1H$) atomunun çekirdeğidir.
- Helyum-3: Toplam 7,72 MeV bağlanma enerjisi ile birbirine bağlı 2 proton ve 1 nötrondan oluşan helyum-3 (${}^3_2He$) atomunun çekirdeğidir.
- α parçacığı: Toplam 28,3 MeV bağlanma enerjisi ile birbirine bağlı 2 proton ve 2 nötrondan oluşan helyum-4 (${}^4_2He$) atomunun çekirdeğidir (Podgoršak, 2006).

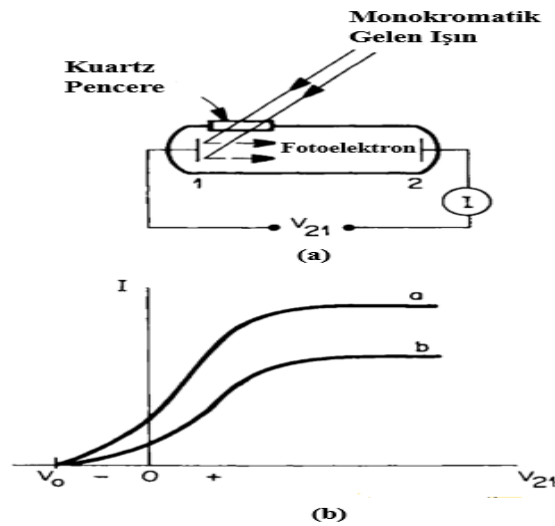
3.3. Foton-Madde Etkileşim Süreçleri

Fotonlar, yüklü parçacıkların aksine elektriksel olarak nötrdür. Madde ile etkileşime girdiklerinde sabit bir şekilde enerji kaybetmezler. Fotonlar, bir atomla etkileşime geçmeden önce atom içerisinde biraz mesafe kat edebilirler. Bir fotonun etkileşim seviyesi, katedilen birim mesafe başına etkileşim olasılığı ile istatistiksel olarak belirlenebilir. Etkileşim seviyesi, fotonun enerjisine ve ortama bağlıdır. Fotonlar madde ile etkileştiğinde, soğurularak yok olabilir veya enerji kaybı olmadan ya da enerji kaybı olarak hareket yönünü değiştirerek saçılabilir. Thomson ve Rayleigh saçılması fotonların enerji kaybı olmaksızın madde ile etkileşime girdikleri saçılmalarıdır. Thomson saçılmasında, klasik teoriye göre madde içerisinde geçen bir elektromanyetik dalganın elektrik vektörüne tepki olarak serbest bir elektron salınır. Salınım yapan elektron, gelen dalga ile aynı frekansa sahip fotonlar yayar. Thomson saçılması elastik bir saçılmadır. Bu sebeple gelen fotonlar ortama enerji aktarımı olmadan yeniden yönlendirilir. Foton-elektron etkileşimlerinin kuantum mekanik teorisine göre Thomson saçılması, gelen foton enerjisi sıfıra yaklaştıkça Compton saçılmasının düşük enerji sınırını temsil eder. Rayleigh saçılması, bir bütün olarak atomun koherent hareketinden kaynaklanır. Bu saçılmada saçılma açısı genellikle

çok küçüktür. Foton ile atom etkileşime girdiğinde kayda değer bir enerji kaybı yoktur ancak atom momentumu koruyacak kadar geri tepme yapar. Fotonların madde ile etkileşimi sonucunda baskın olarak üç olay gözlemlenir. Bunlar; fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum süreçleridir.

3.3.1. Fotoelektrik Olay

Işık soğurulmasının bir sonucu olarak bir yüzeyden elektronların kopartılmasına fotoelektrik olay denir. Şekil 3.2’de fotoelektrik olayın deneysel gösterimi görülmektedir. Şekil 3.2’den görüldüğü üzere gelen monokromatik ışın, bir kuvars pencereden içi boşaltılmış bir cam tüpe geçer ve burada 1. elektrotla çarparak fotoelektronların oluşumunu sağlar. 1. elektrot metalden yapılmıştır. Tüpün 1. ve 2. elektrotları arasında uygulanan V_{21} potansiyel farkının bir fonksiyonu olarak I akımı oluşur. Şekil 3.2’de görülen a ve b, gelen ışığın iki farklı şiddetteki akım değerlerini göstermektedir. Metal yüzeye ışık düşürüldüğünde, $V_{21}=0$ olsa bile bir miktar akım olacaktır. V_{21} pozitif olarak arttığında, 2. elektrotta fotoelektronlar daha fazla toplanır. Tüm elektronlar toplanırken akım artar ve sonra belirli bir değerde sabit seviyede kalır. Sabit akımların oranı, a ve b eğrileri için kullanılan göreceli ışık şiddetine eşittir.



Şekil 3.2. (a) Fotoelektrik olayın deneysel gösterimi. (b) Gelen ışığın iki farklı şiddetteki akım değerlerinin potansiyel farka göre değişimlerinin gösterimi (Turner, 1995)

Potansiyel farkının polaritesi ters çevrildiğinde ($V_{21} < 0$), ışın gönderilen 1. elektrottan sökülen fotoelektronlar, çekici bir kuvvetle karşılaşırlar. V_{21} negatif değer aldığı anda sadece enerjisi yüksek olan fotoelektronlar 2. elektrota ulaşabilir. Bu durum da I akımının düşmesine sebep olur. Işık şiddetinden bağımsız olarak, ters potansiyel farkı, durdurma potansiyelinin (V_0) büyüklüğüne ulaştığında akım sıfır olur. Burada potansiyel enerji eV_0 , fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi olan $T_{maks.}$ 'a eşittir. Bu durum denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$T_{maks.} = eV_0 \quad (3.1)$$

Burada e elektronun yükünün büyüklüğünü ifade etmektedir. Durdurma potansiyeli (V_0), kullanılan monokromatik ışığın frekansı (ν) ile lineer olarak değişir. Şiddetli bir ışıpta bile, fotoelektronların yayılmadığı bir ν_0 frekansı bulunur. ν_0 değeri 1. elektrotta kullanılan metale bağlıdır.

Fotoelektrik olay, modern fiziğin temellerinin atılması konusunda oldukça büyük bir öneme sahiptir. Fotoelektrik olay incelenirken elde edilen deneysel bulgular, 19. yüzyılın ikinci yarısında oldukça başarılı olan klasik dalga teorisiyle çelişmekteydi. Klasik dalga teorisine göre, fotoelektronların maksimum kinetik enerjisi ($T_{maks.}$) Denklem 3.1'deki gibi belirlenir ve gelen ışığın şiddeti arttıkça $T_{maks.}$ değerinin de artması beklenir. Fakat, Şekil 3.2'den de görüldüğü üzere V_0 'ın değeri şiddetten bağımsızdır. Ayrıca bazı fotoelektronlar, herhangi bir frekanstaki ışık tarafından yeterince şiddetli hale getirilerek yayılırlar. Buna eşik frekansı denir ve her metal için eşik frekansı (ν_0) mevcuttur.

Fotoelektrik olayı açıklamak için Einstein 1905 yılında gelen ışığın, $E=h\nu$ enerjisine sahip fotonlardan oluştuğunu ifade etmiştir. Burada h , Planck sabitidir. Ayrıca, metaldeki tek bir elektron, tek bir fotonu tamamen soğurduğunda fotoelektronların oluştuğunu da ifade etmiştir. Fotoelektronun kinetik enerjisi (T), Denklem 3.2'de görüldüğü üzere fotonun enerjisinin, metalden elektron koparabilmek için gerekli enerji (ϕ) ve elektrona aktarılan kinetik enerjinin toplamına eşittir.

$$T = h\nu - \phi \quad (3.2)$$

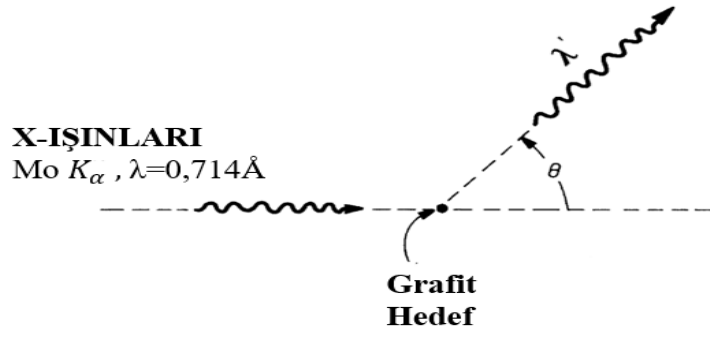
ϕ enerjisi, elektronu atoma bağlayan enerjinin büyüklüğünü ifade eder. İş fonksiyonu olarak da ifade edilen minimum ϕ_0 enerjisi, yüzeyden en gevşek bağlı elektronu koparabilmek için gerekli olan enerjidir. Bu durumda bir fotoelektronun sahip olabileceği maksimum kinetik enerji Denklem 3.3 ile ifade edilir.

$$T_{maks.} = h\nu - \phi_0 \quad (3.3)$$

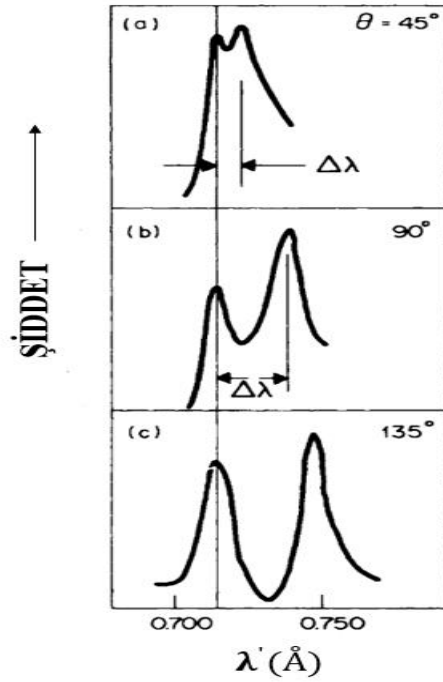
Işık bir atoma çarptığında bir fotoelektron oluşma ihtimali, atom numarasına (Z) ve fotonların enerjisine ($h\nu$) bağlıdır. Yüksek atom numaralı ve düşük enerjili fotonlar için ν_0 eşik değerinin üzerindeki frekanslarda fotoelektron oluşma ihtimali en büyüktür. Bu olasılık $Z^4/(h\nu)^3$ olarak ifade edilebilir.

3.3.2. Compton Saçılması

Compton tarafından 1922 yılında yapılan deneysel düzenek Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu deneyde molibden $K\alpha$ X ışınları (foton enerjisi: 17,4 keV, dalga boyu λ : 0,714 Å) bir grafit hedefe yönlendirilmiştir ve saçılan fotonların dalga boyları (λ') gelen foton yönüne göre çeşitli açılarda (θ) ölçülmüştür. Bazı θ değerleri için λ' 'ne bağlı olarak saçılan radyasyonların şiddetinin gösterimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Şekil 3.4'te ayrıca iki dalga boyu değerleri arasındaki pik noktaları gösterilmiştir. λ gelen fotonların dalga boyunu, λ' ise saçılan fotonların dalga boyunu ifade etmektedir. Gelen fotonların dalga boyuna kıyasla saçılan fotonların dalga boyu daha uzundur ($\lambda' > \lambda$). Saçılan radyasyonun daha uzun bir dalga boyunda görünmesine Compton saçılması denir. Dalga boyundaki kayma, $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ yalnızca θ açısına bağlıdır. Gelen fotonun dalga boyundan (λ) bağımsızdır. Compton 1922 yılında yapmış olduğu deneyde $\theta = 90^\circ$ olduğunda dalga boyundaki kaymayı $\Delta\lambda = 0,024$ Å olarak bulmuştur.



Şekil 3.3. Compton saçılmasının gösterimi



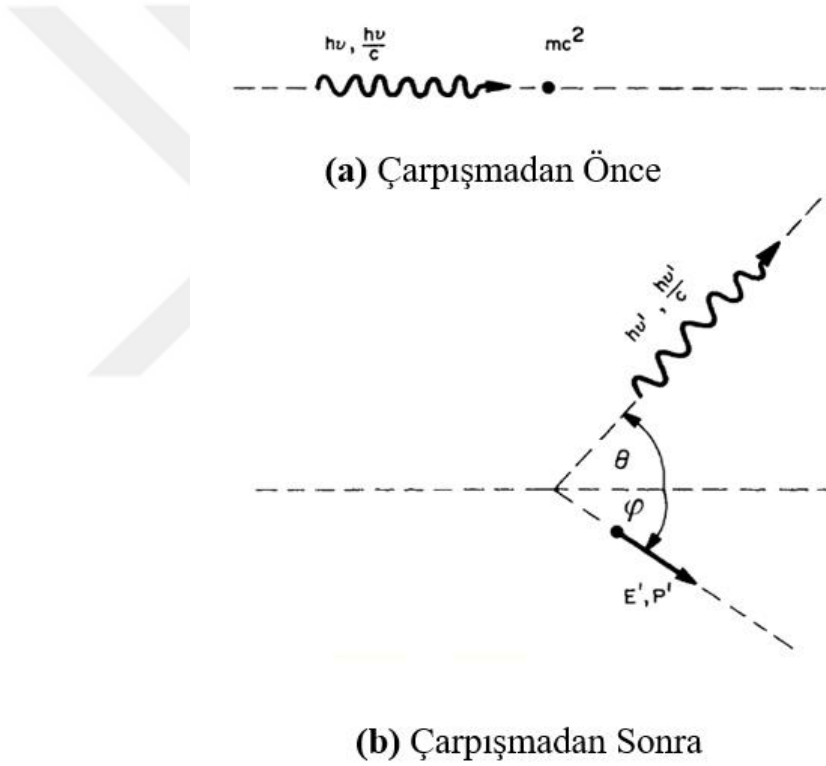
Şekil 3.4. Belirli açılarda saçılan fotonların şiddetine bağlı olarak dalga boyunun gösterimi (Turner, 1995)

Klasik elektromanyetik dalga teorisine göre gelen radyasyon ile saçılan radyasyonun dalga boylarının aynı olması beklenir. Klasik teoriye göre gelen bir dalganın elektrik alanı, atomik elektronların salındığı frekansta salınır ($v=c/\lambda$). Elektronlar bu nedenle aynı dalga boyunda radyasyon yayarlar. Thomson saçılması, yani atomlardan yayılan ve dalga boyunda değişiklik olmayan koherent saçılma Compton'ın çalışmasından önce biliniyordu. Bu sebeple saçılan radyasyonun daha uzun dalga boyuna sahip olması klasik fizik için beklenmedik bir sonuçtu.

Compton bu sonucu açıklayabilmek için aşağıdaki Denklem 3.4'teki kuantum modelini önermiştir.

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + E' \quad (3.4)$$

Şekil 3.5 (a) $h\nu$ enerjili ve $h\nu/c$ momentumuna sahip bir fotonun durgun haldeki serbest elektron ile çarpışmasını göstermektedir. Şekil 3.5 (b) ise çarpışmadan sonra $h\nu'$ enerjili ve $h\nu'/c$ momentuma sahip θ açısında saçılan foton ile çarpışmadan sonra E enerjisi ve P momentumuna sahip ϕ açısında saçılan elektronu göstermektedir.



Şekil 3.5. Compton saçılmasının (a) çarpışmadan önceki ve (b) çarpışmadan sonraki gösterimi

Compton saçılmasında toplam enerji korunur. Enerjinin korunumu Denklem 3.5 ile ifade edilmektedir.

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + E \quad (3.5)$$

Compton saçılmasında momentum da korunur. Yatay yönde momentum korunumu Denklem 3.6 ile dikey yönde momentum korunumu ise Denklem 3.7 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + P' \cos \varphi \quad (3.6)$$

$$\frac{h\nu'}{c} \sin \theta = P' \sin \varphi \quad (3.7)$$

Denklem 3.5, Denklem 3.6 ve Denklem 3.7'den faydalanılarak gerekli matematiksel işlemler yapıldığında Denklem 3.8 türetilir.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \left(\frac{h\nu}{mc^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de gerekli düzenlemeler yapılarak Compton saçılmasında dalga boyu kayması denklem 3.9'daki gibi türetilir.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = c \left(\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} \right) = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'dan Compton saçılmasında dalga boyu kaymasının, gelen fotonun frekansına bağlı olmadığı açıkça görülmektedir. $\theta = 90^\circ$ olduğunda kaymanın büyüklüğü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} = 2,43 \times 10^{-12} \quad (3.10)$$

$h/m_0 c = 0,0243 \text{ \AA}$ 'dur ve bu ifadeye Compton dalga boyu denir.

3.3.3. Çift Oluşum

Elektronun durgun enerjisinin en az iki katı enerjisine sahip bir foton ($h\nu \geq 2m_0 c^2$) bir atom çekirdeğinin Coulomb alanı ile etkileşime girdiğinde bir elektron-pozitron çiftine dönüşebilir. Bir atomik elektronun elektrik alanında da çift oluşum süreci meydana

gelebilir ancak bu olasılık oldukça düşüktür ve gerçekleşmesi için gerekli eşik enerjisi $4m_0c^2$ 'dir. Bu süreç, çift oluşuma ek olarak geri tepen elektronun varlığından dolayı genellikle üçlü oluşum olarak adlandırılır. Bir nükleer alanda çift oluşum meydana geldiğinde, çekirdek fotonları ihmal edilebilir bir enerji ile geri teper. Bu nedenle foton enerjisi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$h\nu = 2mc^2 + T_+ + T_- \quad (3.11)$$

Burada $h\nu$ foton enerjisini T_+ ve T_- ise geri tepen kinetik enerjileri ifade etmektedir. Foton enerjisinin elektron ve pozitron arasındaki dağılımı sürekli olarak değişir. Başka bir deyişle her birinin kinetik enerjisi sıfırdan maksimum $h\nu - 2m_0c^2$ 'ye kadar değişebilir. Her iki parçacığın enerji spektrumu çekirdeğin atom numarasına bağlıdır ve yaklaşık olarak aynıdır. Çift oluşum için eşik dalga boyu $0,012\text{\AA}$ 'dur. Çift oluşumun gerçekleşme ihtimali artan foton enerjisi ve artan atom numarası ile (yaklaşık olarak Z^2 'ye bağlı olarak) artar. Çift oluşumun tersi de gerçekleşebilir yani bir elektron ve bir pozitron fotonları üretmek için yok olabilir. Bir pozitron etkileşim esnasında yok olabilir, ancak pozitronun önce yavaşlaması ve bir elektronu çekerek pozitronyum oluşturma ihtimali daha olasıdır. Pozitronyum, bir elektron-pozitron çiftinin oluşturduğu hidrojen atomuna benzer bir sistemdir. Pozitronyum, elektron ve pozitron yok olmadan önce yaklaşık 10^{-10} saniyede oluşur. Pozitronyumun bozunmadan önceki toplam momentumu sıfır olduğu için momentum korunumundan dolayı en az iki foton üretilmelidir. En olası durum, zıt yönlerde ilerleyen $0,511\text{MeV}$ enerjili iki fotonun oluşmasıdır. Bazen de üç foton üretilmektedir. Herhangi bir pozitron kaynağının çevresinde $0,511\text{MeV}$ enerjiye sahip yok olma fotonlarının bulunması her zaman potansiyel bir radyasyon tehlikesini ifade etmektedir.

3.4. Azaltma Katsayıları

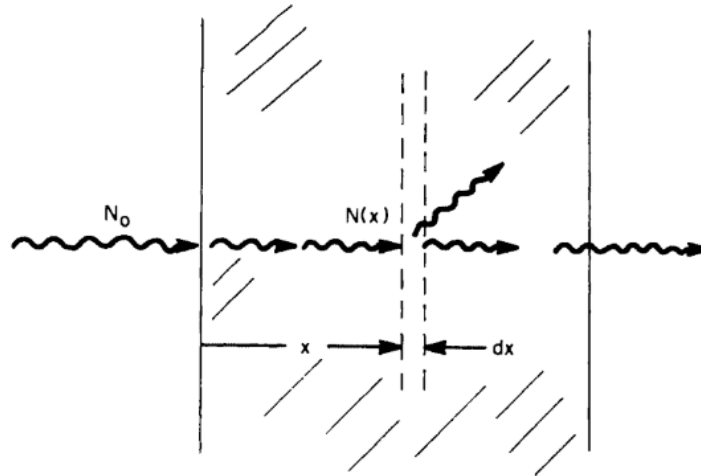
Maddedeki foton giriciliği, istatistiksel olarak bir fotonun madde ile bazı fiziksel olaylarla etkileşmesi sonrasında kat edilen birim mesafe başına olasılık olarak ifade edilebilir. μ ile ifade edilen bu olasılığa lineer azaltma katsayısı veya makroskobik tesir kesiti denir ve uzunluğun tersi ile (cm^{-1}) ile ifade edilmektedir. Lineer azaltma katsayısı, foton enerjisine ve etkileşime girilen malzemeye bağlıdır. Kütle azaltma katsayısı (μ/ρ), lineer azaltma

katsayının yoğunluğa bölünmesi ile elde edilir ve $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ile ifade edilmektedir. Malzemenin g cm^{-2} başına gelen foton ile etkileşme ihtimalini temsil etmektedir.

Tek enerjili fotonlar, tek tip bir hedefte üstel olarak azaltılmaktadır. Şekil 3.6, dar ve tek foton enerjili demetin (N_0) bir levha üzerindeki etkileşimini göstermektedir. Foton malzeme ile etkileşime girerken, bazı fotonlar soğurulabilir bazı fotonlar ise saçılabilir. $N(x)$, etkileşime girmeden x derinliğine ulaşan foton sayısını temsil etmektedir. Şekil 3.6'daki etkileşim aşağıdaki iki denklem ile ifade edilmektedir.

$$dN = -\mu N dx \quad (3.12)$$

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad (3.13)$$

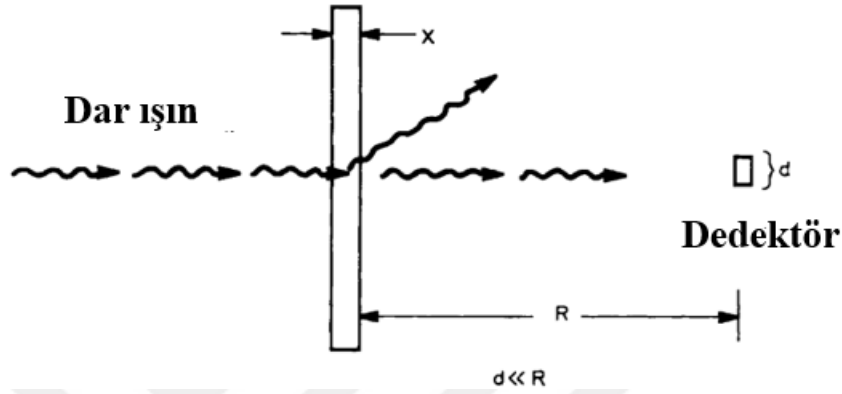


Şekil 3.6. Levha üzerine gelen N_0 tek foton enerjili fotonların dar huzme gösterimi (Turner, 1995)

Denklem 3.13'te verilen $e^{-\mu x}$ ifadesinden de anlaşılacağı üzere gelen bir fotonun x kalınlığındaki bir levhadan etkileşime girmeden geçme olasılığı (N/N_0) vardır. Bu sebeple $e^{-\mu x}$ faktörü genel olarak zırh malzemesinden etkileşime girmeden geçen fotonların oranını tanımlar.

Lineer azaltma katsayısı, Şekil 3.7'de gösterilen deney geometrisi ile ölçülebilir. Deney geometrisinden görüldüğü üzere dar ışınlar, x kalınlığındaki soğurucu levhaya yönlendirilir. d boyutunda küçük bir dedektör, doğrudan ışık hüzmesi düzleminde

soğurucu levhanın arkasında $R \gg d$ mesafesine yerleştirilir. Dar ışın veya iyi saçılma geometrisi olarak adlandırılan bu deney geometrisinde, dedektör tarafından yalnızca soğurucu levha ile etkileşime girmeden geçen fotonlar algılanacaktır. Soğurucu kalınlığının bir fonksiyonu olarak dedektöre ulaşan fotonların bağıl hızı ölçülebilir ve sonrasında Denklem 3.12 kullanılarak lineer azaltma katsayısı değeri belirlenir.



Şekil 3.7. Lineer azaltma katsayısını ölçmek için kullanılan deneysel dar ışın geometrisinin gösterimi

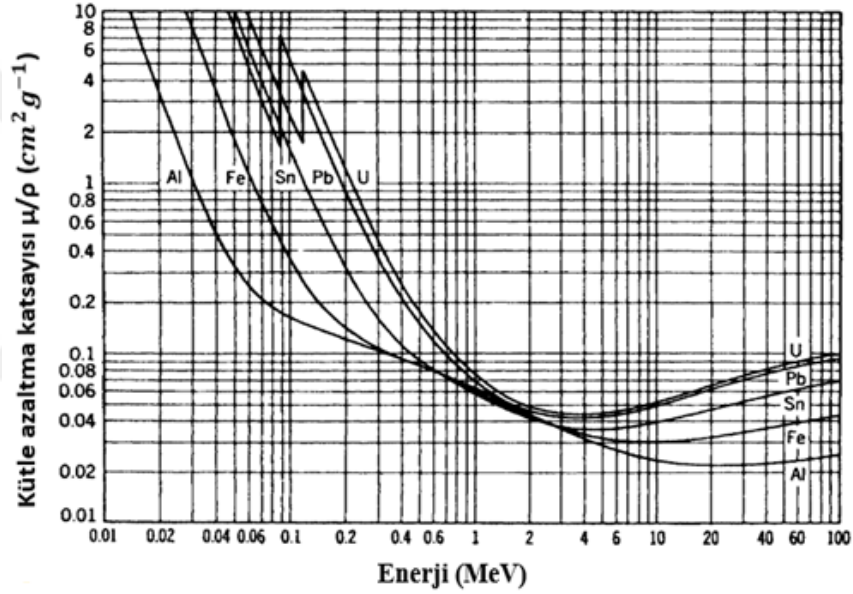
Bir malzemedeki belirli enerjiye sahip fotonlar için lineer azaltma katsayısı, Şekil 3.7’de dar ışın geometrisine sahip fotonların soğurucu levha ile çeşitli fiziksel etkileşim süreçlerinin toplamını ifade etmektedir. Bu sebeple lineer azaltma katsayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3.13)$$

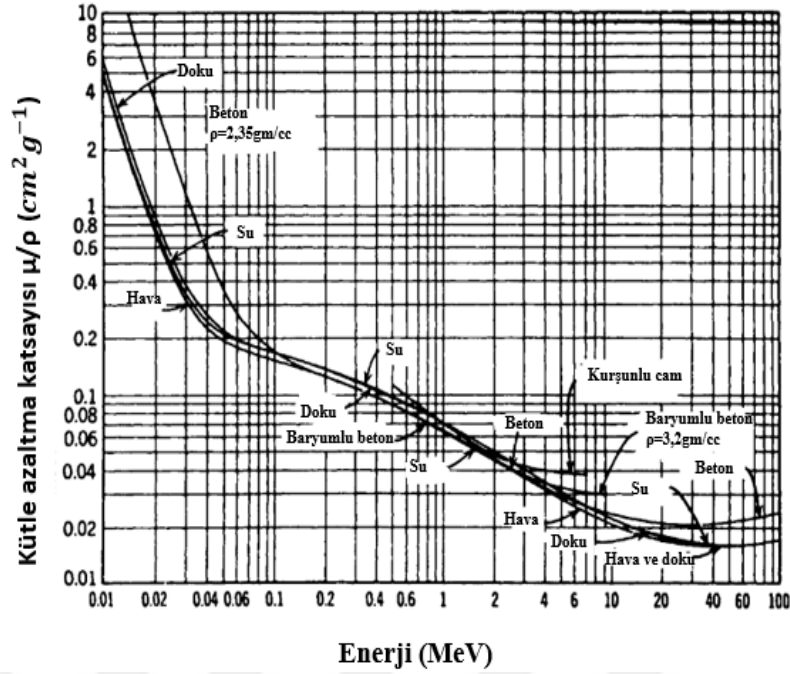
Burada τ , σ , κ sırasıyla fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum için tesir kesitlerini belirtir. ρ yoğunluğundaki bir malzeme için ilgili kütle azaltma katsayıları ise τ/ρ , σ/ρ ve κ/ρ olarak ifade edilir. Aslında fotonükleer reaksiyonlar ve Rayleigh saçılması da foton azalmasına katkı sağlamaktadır, fakat bu katkılar ihmal edilmektedir.

Şekil 3.8 ve 3.9’da 0,010 -100 MeV enerji aralığında çeşitli element ve malzemelerin kütle azaltma katsayılarının enerjiye göre değişimi verilmiştir. Şekildeki eğriler, beklendiği gibi fiziksel süreçleri yansıtmaktadır. Düşük foton enerjilerinde atomik elektronların bağlanması önemlidir ve fotoelektrik olay baskın etkileşimdir. Artan foton enerjisi ile hızlı bir şekilde azalan yüksek atom numaralı malzemeler, daha fazla azaltma ve soğurma sağlar. Foton enerjisi atomun K kabuğundan bir fotoelektron koparmak için yeterli enerjiye

sahip olduğunda, Pb ve U'un azaltma katsayıları aniden yükselir. Diğer elementlerin eğrileri daha düşük enerjilerde aynı özelliğe sahiptir. Foton enerjisi birkaç yüz keV veya daha büyük olduğunda, atomik elektronların bağlanması nispeten önemsiz hale gelir ve baskın etkileşim türü Compton saçılmasıdır. Elementler birim kütle başına yaklaşık aynı sayıda elektron içerdiğinden (hidrojen hariç), farklı malzemeler için kütle azaltma katsayılarının değerleri arasında büyük bir fark yoktur. Compton saçılması, çift oluşum eşik enerjisinin (1,022 MeV) üzerinde, çift oluşum süreci daha olası olana kadar etkin olmaya devam eder. Çift oluşum ile azalma, soğurucunun büyük bir nükleer yükü ile artırılır.



Şekil 3.8. Çeşitli elementlerin kütle azaltma katsayısı (Turner, 1995)



Şekil 3.9. Çeşitli malzemelerin kütle azaltma katsayısı

Şekil 3.8 ve 3.9'da verilen elementlerden kurşun ve betonun bazı enerji değerlerinde kütle azaltma katsayılarının gösterimi Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bazı malzemelerin kütle azaltma katsayıları

Enerji (hν)	μ/ρ (cm ² g ⁻¹)	
	Beton $\rho=2,35$ g cm ⁻³	Kurşun $\rho=11,4$ g cm ⁻³
500 keV	0,089	0,150
1,5 MeV	0,052	0,051

Bir element ortamında Compton saçılması için azaltma katsayısı, atom başına Compton tesir kesiti ve birim hacimdeki atom sayısı çarpımı ile ifade edilebilir. Fotoelektrik olay ve çift oluşum için de atomik tesir kesitleri ve atomların yoğunluğu arasında aynı tür ilişki geçerlidir. Ancak, Compton olayının etkisinin aksine diğer iki etkileşim için atomik tesir kesitler, fiziksel olarak $e\sigma$ gibi ayrı elektronik tesir kesitlerinin toplamı değildir. Denklem 3.14'te ifade edildiği gibi lineer azaltma katsayısı ayrıca tüm süreçler için atomik yoğunluk (N_A) ve toplam atomik tesir kesitinin (σ_A) çarpımına eşittir.

$$\mu = N_A \sigma_A \quad (3.14)$$

Bir elementin atom sayısı (cm^{-3}), $N_A = (\rho/A)N_0$ ile verilir. Burada ρ malzemenin yoğunluğunu, A atom ağırlığını ve N_0 Avogadro sayısını ifade etmektedir. Böylece lineer azaltma katsayısını $\mu = \rho N_0 \sigma_A / A$ olarak yazabiliriz. Buradan yola çıkarak kütle azaltma katsayısı da aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_0 \sigma_A}{A} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15, herhangi bir elementin foton etkileşimi için kütle azaltma katsayısı ile atomik tesir kesiti arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bir bileşik veya karışımın lineer azaltma katsayısını elde etmek için her bir elementin lineer azaltma katsayısı elementin ağırlıkça kesrine göre ayrı ayrı toplanır. Tesir kesitinin birimi genellikle barn olarak ifade edilir ve $1\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$ dir (Turner, 1995).

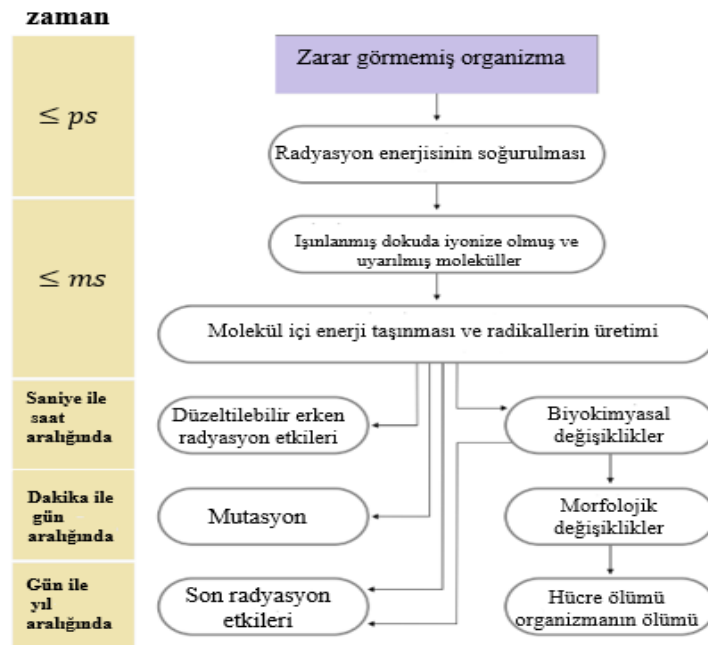
3.5. İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Radyasyona maruz kalmak sağlığımız için olumsuz etkilere sebep olabilir. Bu durumu radyasyondan korunmanın temel prensibi olarak kabul edebiliriz. Aynı zamanda iyonlaştırıcı radyasyondan kaynaklanan radyasyon hasarını, Becquerel'in radyoaktivitenin keşfinden hemen sonra gözlemlenmesi radyasyondan korunmanın ne kadar önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Vücut hücrelerine iyonlaşma ve uyarılma yoluyla enerji transferi yapılması sonucunda iyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri ortaya çıkmaktadır. Dokunun radyasyon duyarlılığı, dokuları oluşturan hücrelerin üreme yeteneği (mitoz bölünme) ile doğru orantılıdır ve hücrelerin farklılaşması ile de ters orantılıdır. Dokudaki mitoz bölünme yüksek bir hızda ilerlerse, hücrenin bir sonraki bölünmesi gerçekleşmeden önce hasarı onarmak için çok az zaman kalır. İnsanların radyasyona en duyarlı olduğu aşama embriyonik aşamadır. Bunun sebebi ise bu dönemde gelişmemiş organların kısmen az sayıda hücreden oluşmasıdır. Bu hücreler hasar görürse, yerini alabilecek başka sağlam hücre yoktur.

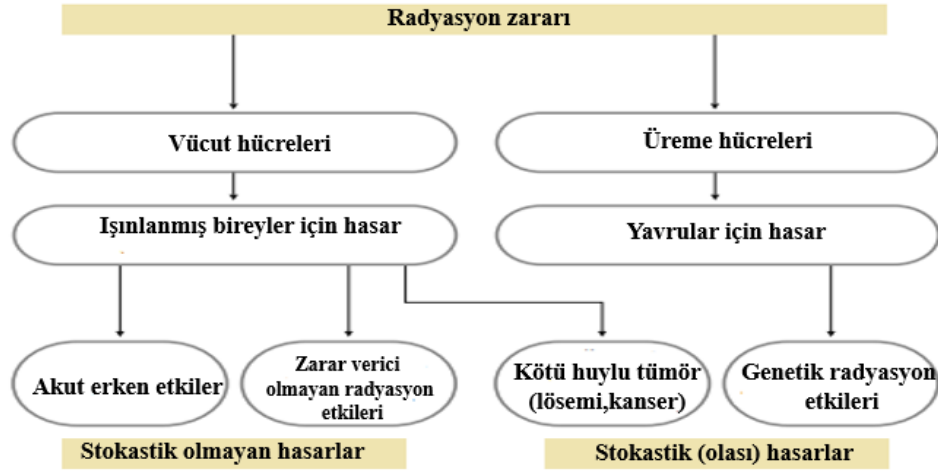
Radyasyon soğurulmasının fiziksel-biyolojik etkileri, Şekil 3.10'da ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Şekil 3.11'de ise radyasyonun zararları genel olarak verilmiştir. Radyasyona maruziyetten hemen sonra meydana gelen radyasyon hasarına erken etkiler denilmektedir. Vücut 0,25 Sv'lik radyasyon dozuna maruz kaldığında hemogramda bir değişiklik

görülebilmektedir. 1 Sv radyasyon dozuna maruziyetten sonra radyasyondan kaynaklı hastalıkların belirtileri ortaya çıkabilir. Fakat bu doza maruziyette hastaların iyileşmesi neredeyse garantidir. 4 Sv'lik radyasyon dozuna öldürücü doz denir ve vücut bu doza maruz kaldığında öldürme oranı %50'dir. 7 Sv'lik bir doz için ölüm oranı ise yaklaşık %100'dür. Yüksek radyasyon dozlarına maruz kalındığında oluşan hastalıkların belirtileri, radyasyona maruziyetten birkaç saat sonra ortaya çıkar. Bu belirtiler baş ağrısı, mide bulantısı ve kusma olarak kendini göstermektedir. Doza bağlı olarak bu belirtiler bir süre sonra kaybolur. Birkaç gün kaybolan belirtilerden sonra radyasyon hastalığının ikinci aşaması başlar. İkinci aşamadaki belirtiler ise ateş, kanama, kan kusma, kanlı dışkı ve saç dökülmesi olarak kendini göstermektedir. Yüksek radyasyona maruz kalan kişi eğer sekiz hafta hayatta kalırsa iyileşmesi için bir umut vardır. Ancak bazı durumlarda ölüm birkaç ay sonra da gerçekleşebilir (Grupen, 2010).

Biyolojik dokuda mevcut bir dizi onarım mekanizması bulunmaktadır. Bu sebeple, ışınlamadan sonraki erken etkiler için bir eşik doz vardır ve bu dozun altında kalıcı bir hasar gözlenmez. Bu eşik doz, dozun zaman dağılımına bağlıdır. Doğal radyasyondan kaynaklanan radyasyon maruziyeti kesinlikle bu eşiğin oldukça altındadır. Stokastik geç radyasyon hasarı ve genetik etkiler için eşik doz yoktur.



Şekil 3.10. Soğurulan radyasyon enerjisinin fiziksel ve biyolojik etkilerinin gelişim süreci



Şekil 3.11. Radyasyon zararlarının şematik gösterimi

Radyasyona maruziyetten on yıl sonra geç etkiler de oluşabilir. Bu geç etkiler stokastik etki olarak kendini göstermektedir. Bu etkilerin oluşma olasılığı doza bağlıdır. Soğurulan 10 mSv doz başına toplam kanser riski yaklaşık $5 \cdot 10^{-4}$ olur. Genel olarak kanser olma ihtimali ile soğurulan doz orantılıdır.

Üreme hücreleri, radyasyonu soğurduğunda mutasyonlara neden olabilir. Radyasyona maruz kalan kişi için mutasyonlar anlaşılabilir değildir. Ancak sonraki nesillerde mutasyon etkileri kendisini gösterecektir. Genetik olarak 35 yaşına kadar insanda, çevresel faktörler nedeniyle yaklaşık 140 genetik mutasyon oluşmaktadır. 10 mSv’lik bir radyasyona maruz kalma, 2 genetik mutasyon oluşmasına sebep olacaktır. Bu doğal mutasyon oranının yaklaşık yüzde bir veya ikisine tekabül etmektedir. Radyasyon etkileri bakımından ilk iki kuşakta kalıtsal olarak aktarılabilen ortalama risk faktörü, 10mSv başına yaklaşık 10^{-4} ’tür.

Kötü huylu radyasyon hasarı için risk faktörü olarak birkaç milisievert az olarak ifade edilmektedir. Bireysel vakalarda, gözlemlenen hastalık ile ışınlanma arasında ilişki kurmak imkânsızdır. Çünkü kanser ve mutasyonların doğal oranları genellikle çok daha yüksektir. Düşük dozların (yılda birkaç milisievert) zararlı ya da zararsız olduğu şu anda tartışmalıdır. Yaşam ve insanlık, dünyanın varoluşundan itibaren doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Bu sebeple eşik doz değerinden daha fazla dozda radyasyona maruz kalmaktan kaçınılması gerekmektedir.

Radyasyonun biyolojik etkisini büyük ölçüde değiştirebilen bazı kimyasal maddeler vardır. Örneğin insan dokusundaki oksijen, bromourasil ve fluorourasil artması radyasyon hassasiyetini büyük ölçüde değiştirir. Dokudaki su seviyesi artmasıyla H₂O radikallerinin radyasyon duyarlılığı artmaktadır ayrıca tüm kanserojen maddeler dokunun radyasyon hassasiyetini artırır.

Radyasyonun etkisi, fraksiyonel ışınlama için azaltılır. Bireysel fraksiyonlar arasındaki radyasyon hasarını onaran rejenerasyon mekanizmaları devreye girer. Ayrıca bir ön ışınlamadan sonra daha yüksek bir direnç gözlenir. Fraksiyonel ışınlama veya ön ışınlama yöntemi erken radyasyon hasarını azaltabilir, ancak genetik riski ve kanser riskini azaltmamaktadır.

Hassaslaştırıcı maddeler olduğu gibi, radyasyondan koruyucu maddeler de vardır. Sistamin bu koruyucu maddelerden biridir. Örneğin fareler, ışınlamadan önce bir sistamin enjeksiyonu alırlarsa 7 sievert radyasyon dozunda hayatta kalırken, sistamin enjeksiyonu yapılmayan fareler için bu doz öldürücü seviyededir.

Uygun ilaçlar verilerek dâhil edilen radyoaktif maddelerin insanlardan uzaklaştırılması da mümkündür. Vücut tarafından soğurulan radyoaktif maddenin vücuttan ilaç yoluyla atılması yöntemi, radyoaktif maddelerin vücuttan atılmasını desteklemeye veya yeniden soğurulmasını engellemeye dayanır. Radyoaktif maddelerin eliminasyonunu yoğunlaştırmada en iyi sonuçlar DTPA (dietilentriamin pentaasetat) ve EDTA (etilendiamin tetraasetat) ile elde edilmiştir.

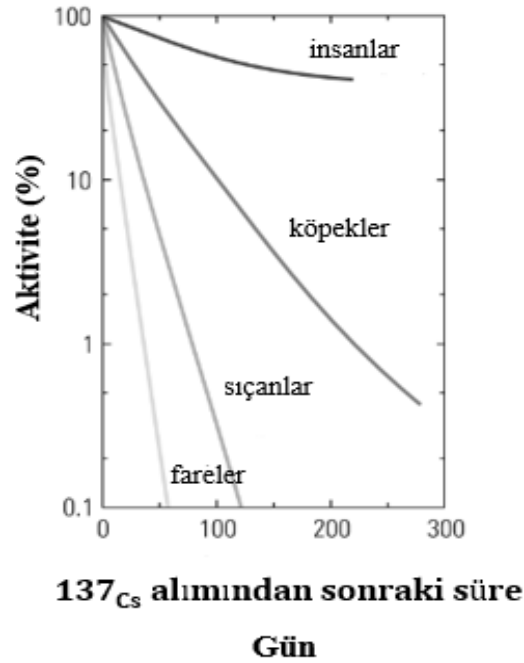
Dahil edilen radyoaktif maddelerin aktivitesi, dahil edilen radyoaktif malzemelerin fiziksel yarı ömrüne ($T_{1/2}^{fiz.}$) kıyasla çok daha hızlı azalır.

Etkin yarı-ömür, biyolojik yarı ömür ($T_{1/2}^{biyo.}$) de içermelidir. Biyolojik yarı ömür, biyolojik bir sistemde maddenin yarısını doğal bir şekilde ortadan kaldırdığı zamandır. Biyolojik yarı ömür ve etkin yarı ömür bozunma sabitlerinden hesaplanır. Aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$\lambda_{etk.} = \lambda_{fiz.} + \lambda_{biyo.} \quad (3.16)$$

$$T_{1/2}^{etk.} = \frac{T_{1/2}^{fiz.} \cdot T_{1/2}^{biyo.}}{T_{1/2}^{fiz.} + T_{1/2}^{biyo.}} \quad (3.17)$$

Şekil 3.12’de insanların ve bazı memelilerin vücudunda depolanan ^{137}Cs ’ların ($T_{1/2}^{fiz.} = 30 \text{ yıl}$) düşüşü görülmektedir. ^{137}Cs ’un insanlar için etkin yarı ömrü yaklaşık 110 gündür.



Şekil 3.12. İnsanlar ve çeşitli memeliler için vücutta biriken ^{137}Cs ’un azalması (Grupe, 2010)

Hayvanlar, iyonlaştırıcı radyasyona karşı dirençlidir. Radyasyona duyarlı tüm memeliler için öldürücü doz hemen hemen aynıdır. Örneğin, insanlar için öldürücü doz 4 Sv, köpekler için öldürücü doz 4 Sv, maymunlar için öldürücü doz 5 Sv, tavşanlar için öldürücü doz 8 Sv ve dağ sıçanları için öldürücü doz 10 Sv’dir. Örümcekler için öldürücü doz 100 Sv ve virüsler için ise 2000 Sv’dir. Bu öldürücü doz değerlerinden örümcekler ve virüslerin iyonlaştırıcı radyasyona karşı daha dirençli olduğu açıkça görülmektedir.

Deinococcus radiodurans ve *micrococcus radiophilus* bakterileri, radyasyon hasarını onarma konusunda oldukça başarılıdır. Bu bakteriler, 30 000 Sv’lik bir öldürücü dozda bile hayatta kalabilir. *Deinococcus radiodurans* türündeki bakteriler, nükleer enerji santrallerinin sıcak reaktör çekirdeğinde bile bulunmuştur. Bu bakteriler DNA’nın sarmal

yapısında yaklaşık bir milyon kırılma gösterse bile özel enzim sistemi yardımıyla DNA hasarını onarmayı başarırlar.

Deinococcus radiodurans ayrıca yüksek radyoaktif atıkları bileşenlerine ayırabilmektedir. Bu sayede kolayca bileşenlerine ayrıştırılarak yok edilebilir. Radyasyona ve aşırı sıcaklıklara karşı yüksek direnç gösteren bu organizmalar uzun süre boyunca meteorlarda hayatta kalabilirler. Bu sebeple geniş alanlara yayılma yeteneğine sahiptir. Bu nedenle gezegenimiz onların gelişimi için uygun koşulları sunmaktadır.

İyonlaştırıcı radyasyona bağlı hasarların yanı sıra radyasyona maruz kaldıktan sonra olumlu etkiler de gözlenmiştir. Orta ve yüksek dozlarda tehlikeli olan maddelerin düşük dozlarda faydalı etkiler oluşturmalarına hormesis denir. Hücreler, doğal radyoaktivitenin neden olduğu küçük hasarları onarmakta ve düzenli olarak uyarılmaları durumunda radyasyona karşı daha dirençli hale gelmektedir (Grupe, 2010).

3.6. Radyasyondan Korunmanın Amaçları

İnsanoğlu, tıpta, endüstride, araştırma ve enerji üretimi alanlarında X ışınlarının, radyoizotopların ve nükleer fisyonu uğrayabilen malzemelerin kullanımından büyük ölçüde faydalanır. Ancak bu faydaların yanı sıra kaynakların temini ve normal kullanımı sırasında kişilerin radyasyona maruz kalmaları ile meydana gelebilecek kazalardan kaynaklanan maruziyetler oluşmaktadır. Radyasyona maruz kalma kişileri için bazı riskler içermektedir. Bu sebeple izin verilen maruziyet seviyeleri çalışma esnasında elde edilen sonuca değer olmalıdır. Radyasyondan korunmanın temel ilkesi, radyasyon içeren faaliyetlerden kaynaklanan riskleri ve faydaları dengelemektir. Standartlar çok zayıf ve yetersizse, riskler kabul edilemeyecek kadar büyük olabilir; standartlar çok katıysa, faaliyetler topluma zarar verecek şekilde aşırı pahalı veya kullanışsız olabilir. Radyasyondan korunmada risk ve fayda dengesi tam olarak gerçekleştirilememektedir.

Radyasyondan korunmada risk ve faydaların dengelenmesi kesin bir şekilde yapılamaz. Radyasyonun izin verilen düşük maruziyet seviyelerindeki riskleri tam olarak bilinmemektedir. Her yerde kullanılan yasal radyasyondan korunma standartları belirli bireyler veya gruplardan ziyade toplumun tümüne aittir.

3.7. Mesafe, Zaman ve Zırhlama

Radyasyon kaynağının yakınında bulunan bir kişinin maruz kalacağı doz, kişi ile radyasyon kaynağı arasındaki mesafeyi artırarak, maruz kalma süresini en aza indirerek ve zırh malzemesi kullanarak azaltılabilir. Mesafe sıklıkla basit ve etkili bir şekilde kullanılır. Örneğin, ellere ve vücudun geri kalanına verilen dozu en aza indirmek amacıyla radyoaktif kaynakları tutmak için pensler kullanılır. Bir işi gerçekleştirmek için belirli bir süre gerekmektedir, bu sebeple maruz kalma süresini önemli ölçüde sınırlandırmak her zaman mümkün değildir.

Zırhlama, radyasyon doz oranını sınırlayarak personelin radyasyon maruziyetini azaltmaktadır. Bu sebeple zaman ve mesafeye kıyasla daha güvenilir bir yöntemdir. Doz oranlarını istenen seviyelere düşürmek için tek başına zırhlama kullanılabilir. Ancak, uygulamada kullanılan zırh miktarı, maliyet ve beklenen fayda gibi gerekliliklere bağlıdır.

3.8. Gama Işını Zırhlaması

Bir foton demeti, x kalınlığına sahip bir soğurucu ortamdan geçtiğinde fotonların şiddetinde azalma meydana gelir. Bu azalma aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

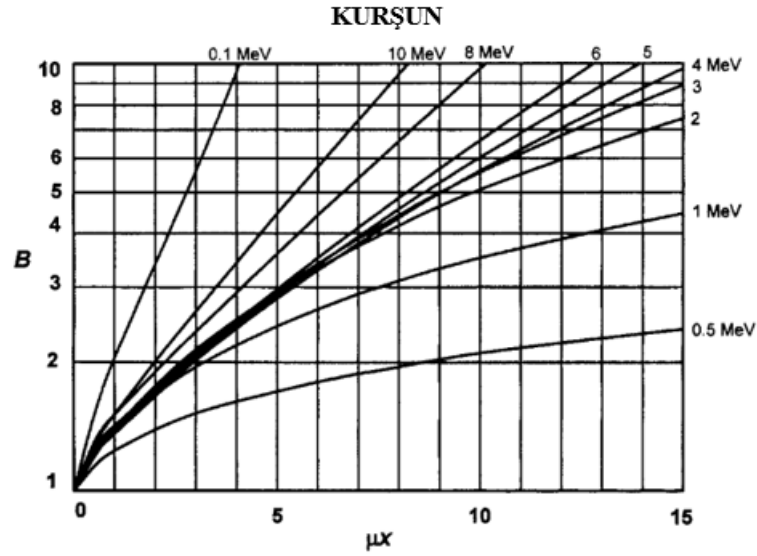
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.18)$$

Burada μ , lineer azaltma katsayısını, I_0 ve I ise sırasıyla başlangıçtaki ve soğurucu ortamdan geçtikten sonraki foton şiddetlerini ifade etmektedir.

Eğer gelen ışın, dar ışın geometrisine sahip değilse yani genişse, soğurucu ortamdan geçen şiddet daha büyük olacaktır. Geçen şiddetin daha büyük olmasının sebebi geniş ışınlarda saçılan fotonların da algılanmasıdır. Bu durum genellikle gama ışın kaynaklarından korunmak için gerekli zırh malzemeleri için geçerlidir. Artan foton iletimi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad (3.19)$$

Burada B , radyasyon yığılma faktörüdür ($B \geq 1$). Verilen bir zırh malzemesi, kalınlık, foton enerjisi ve kaynak geometrisi için yığılma faktörü, ölçümler veya hesaplamalar yoluyla elde edilebilir. Şekil 3.13, noktasal izotropik kaynaklardan yayılan 0-10 MeV enerji aralığındaki tek foton enerjili malzeme için yığılma faktörünü göstermektedir.



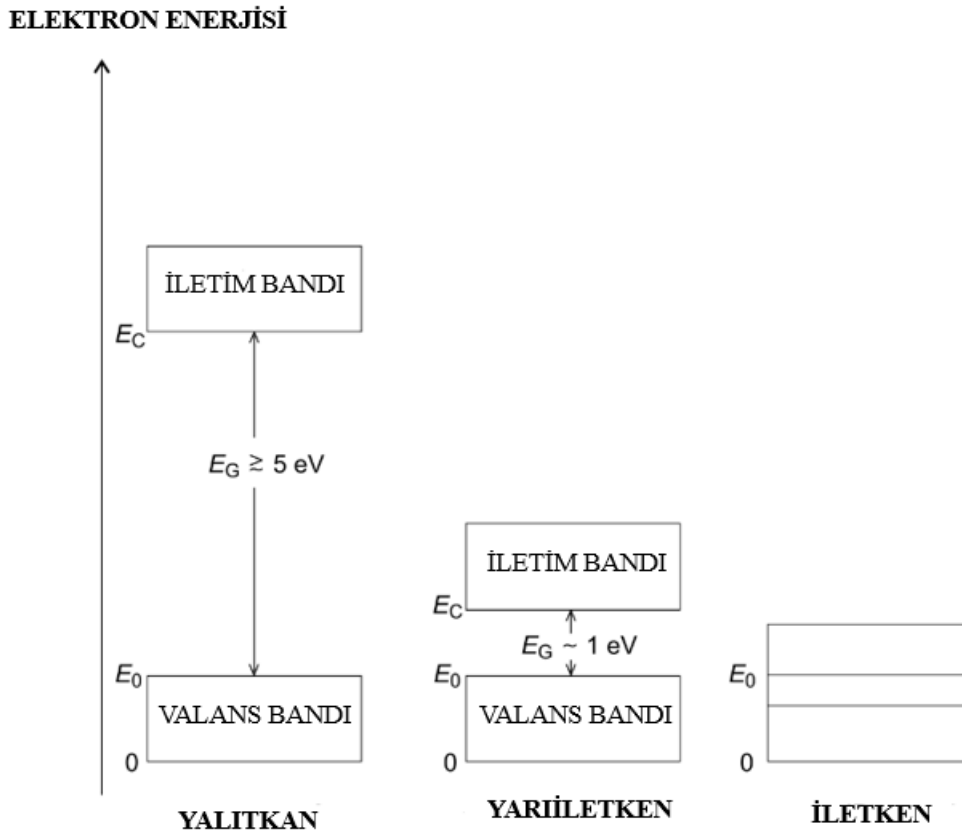
Şekil 3.13. μx 'in bir fonksiyonu olarak 0,1-10 MeV arasındaki tek foton enerjili fotonların yığılma faktörünün gösterimi (Turner, 1995).

3.9. Katıların Bant Yapısı

İzole edilmiş bir atomdan elektron koparmak için bir elektron üzerinde etki eden kuvvetler ve yoğun fazdaki komşu atomlar da elektronun davranışını etkileyebilir. Bu etki, atomlardaki en gevşek bağlı elektronlar için büyüktür ve daha sıkı bağlı iç kabuk elektronları üzerinde ise en küçük etkiye sahiptir.

Elektriksel olarak katılar, yalıtkanlar, iletkenler ve yarıiletkenler olarak sınıflandırılmaktadır. Katıya bir elektrik alan uygulandığında elektronların uygulanan elektrik alana tepkisi sayesinde katıların ayrımı yapılmaktadır. Elektronların elektrik alana tepkisi, belirli atomik/moleküllerin kristal yapısına ve ortaya çıkan bant aralığına bağlıdır. Katıların sınıflandırılması Şekil 3.14'de verilmektedir. Örneğin NaCl bir katıdır. Tek değerlik elektronuna sahip sodyum ve klor atomlarının eşleşmesi sonucunda valans bandı

tamamen dolar ve elektronların serbestçe hareket edebileceği boşluk kalmaz. Valans elektronlarını boş iletim bandına iletmek için bazı durumlarda termal uyarma yeterli olabilir. Fakat bu olasılık son derece küçüktür, çünkü yasak enerji aralığını aşmak için gereken uyarma enerjisi 8,5 eV mertebesinde. Boşluk yaklaşık 5 eV'den büyük olduğunda, malzeme bir yalıtkandır. Örneğin, karbonun bant aralığının genişliği 5,4 eV olduğu için yalıtkan bir malzemedir.



Şekil 3.14. Katıların bant yapısının gösterimi

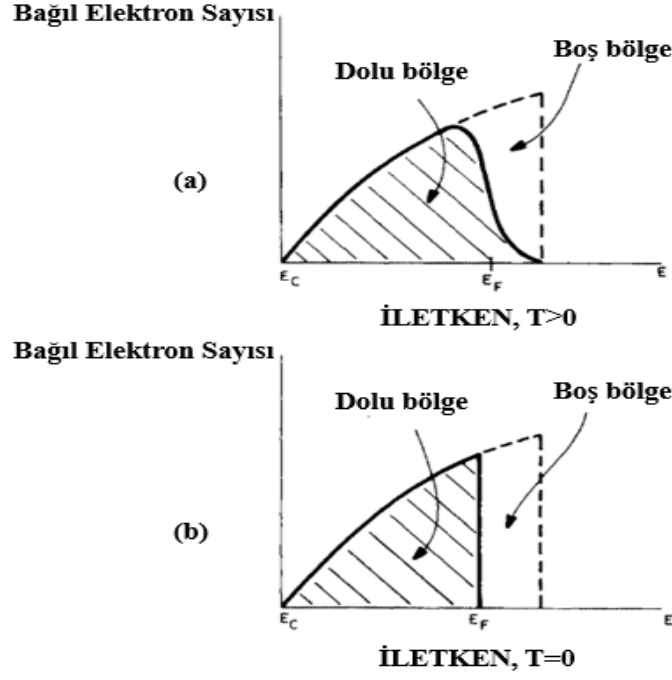
Silisyumdaki bant enerjisi 1,14 eV'dir. Germanyumun bant enerjisi ise 0,67 eV'dir. Mutlak sıfır sıcaklığında bu iki metaldeki valans bantları tamamen doludur ve iletim bandı boştur. Bu nedenle bu iki metal mutlak sıcaklık değerinde yalıtkandır. Ancak oda sıcaklığında ($kT \sim 0,025 \text{ eV}$), birkaç elektron termal olarak iletkenlik bandına uyarılarak bu metallere bir miktar iletkenlik kazandırır. Enerji aralığı yaklaşık 1 eV olan kovalent bağlı katı malzemeler yarıiletkenlerdir. İletkenlerde, valans ve iletim bantları, Şekil 3.14'de gösterildiği gibi birleşerek valans elektronlarına hareketlilik sağlar. Sodyum, temel durumda 3s yörüngesinde bir elektrona sahip olduğu için katı fazda bir iletkenidir.

Malzemedeki iletim elektronları, serbest spinli ($-1/2$) parçacıklardan oluşan bir sistem olarak ele alınabilir. Bu elektronlar birbirleriyle enerji alışverişi yapabilirler, ancak aynı zamanda ideal bir gazdaki moleküller gibi bağımsız şekilde de hareket edebilirler. Elektronlar Pauli dışarlama ilkesine uyarlar. Bu koşullar, istatistiksel mekaniğe göre, E enerjisinin kuantum durumu başına ortalama elektron sayısının $N(E)$ Fermi dağılımı tarafından verilir. $N(E)$ Fermi dağılımı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$N(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (3.20)$$

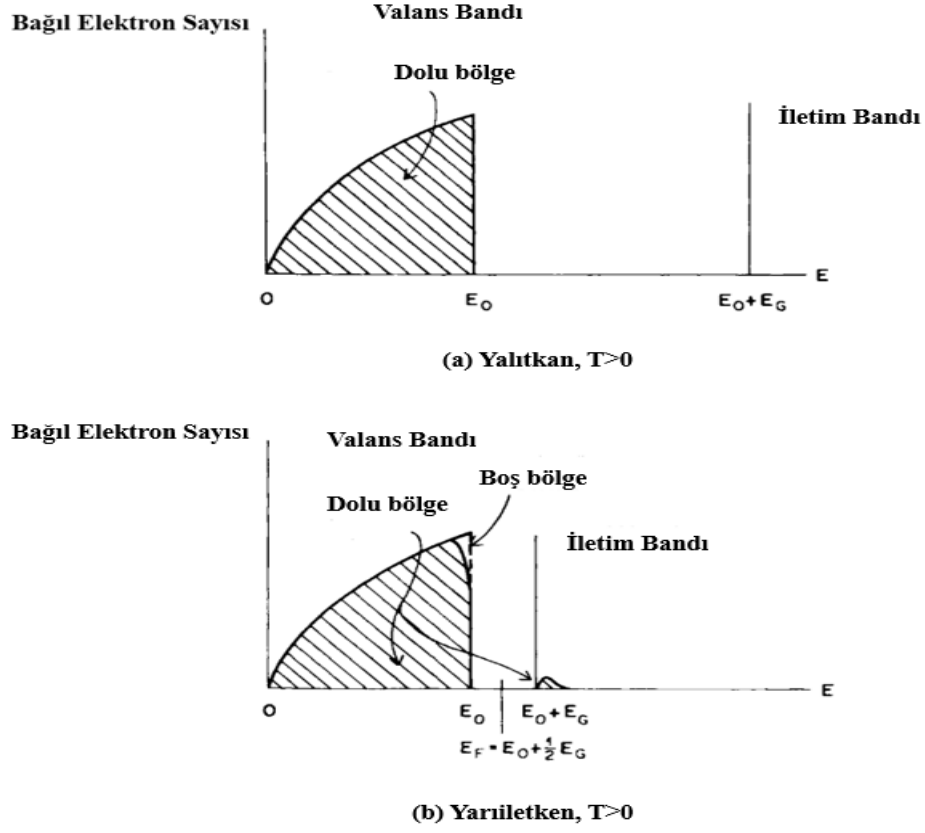
Burada k Boltzmann sabitidir, T mutlak sıcaklıktır ve E_F Fermi enerjisi olarak adlandırılır. Herhangi bir zamanda, sistemdeki her kuantum durumu ya boştur ya da tek bir elektron tarafından işgal edilmiştir. $N(E)$ değeri, enerjisi E olan bir durumun işgal edilmiş olma olasılığını ifade eder. Mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$) Fermi dağılımı ele alındığında, eğer $E > E_F$ ise Denklem 3.20'nin paydasındaki üstel terim sonsuz olur ve böylece $N(E)=0$ olur. Fermi enerji seviyesinin altındaki durumlar için ($E < E_F$) üstel terim sıfır olur ve böylece $N(E) = 1$ olur. Bu nedenle, sistemde Fermi enerjisinin altındaki tüm durumlar tek bir elektron tarafından işgal edilirken, Fermi enerjisinin üzerindeki tüm durumlar boştur. Bu konfigürasyon, mutlak sıfırda beklendiği gibi en düşük enerjiye sahiptir. $T > 0$ sıcaklıklarda, Fermi enerjisi, ortalama veya olası elektron sayısının $1/2$ olduğu enerji olarak tanımlanır.

Şekil 3.15(a), mutlak sıfır sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkta ($T > 0$) bir iletkenindeki elektronların enerji dağılımını göstermektedir. Bu durumda elektronlar, E_C 'nin üzerindeki termal enerji dağılımına sahip durumları işgal eder. Düşük enerji seviyeleri doludur, ancak bandın üst kısmında iletkenlik için boş durumlar mevcuttur. Şekil 3.15(b), $T=0$ 'daki durumunda aynı iletkenin enerji dağılımını göstermektedir. $E < E_F$ olan tüm seviyeler doludur ve $E > E_F$ olan tüm seviyeler boştur.



Şekil 3.15. Mutlak sıcaklıklarda bir iletkenin iletim bandındaki bağıl elektron sayısı (a) $T > 0$ ve (b) $T = 0$

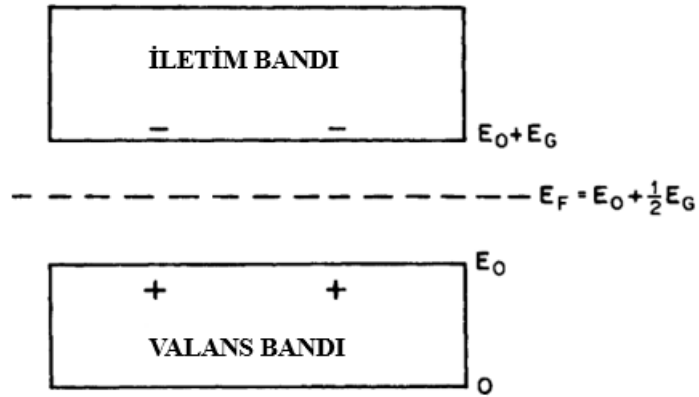
Şekil 3.16 (a), $T > 0$ sıcaklığındaki bir yalıtkanda bulunan elektronların enerji dağılımını gösterir. Valans bandı tamamen doludur ve yasak enerji aralığı ($E_G \sim 5$ eV) o kadar geniştir ki elektronlar normal sıcaklıklarda iletim bandına ulaşamazlar. Şekil 3.16 (b), yasak enerji aralığı ($E_G \sim 1$ eV) yalıtkandan çok dar olan yarı iletkenindeki enerji dağılımını gösterir. Denklem 3.20'de ifade edilen termal dağılım, nispeten az sayıda elektronun iletim bandında enerjiye sahip olmasına izin verir. Bu durumda, iletim bandındaki dolu durumların sayısı, valans bandındaki boş durumların sayısına eşittir ve E_F , $E_0 + E_{G/2}$ enerjisinde yasak enerji aralığının ortasında yer alır. Oda sıcaklığında, iletim bandındaki elektronların yoğunluğu Si için $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ve Ge için $2,4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 'tür.



Şekil 3.16. Valans ve iletkenlik bantlarının bağlı elektron sayısı (a) Yalıtkan $T > 0$ ve (b) Yarıiletken $T > 0$

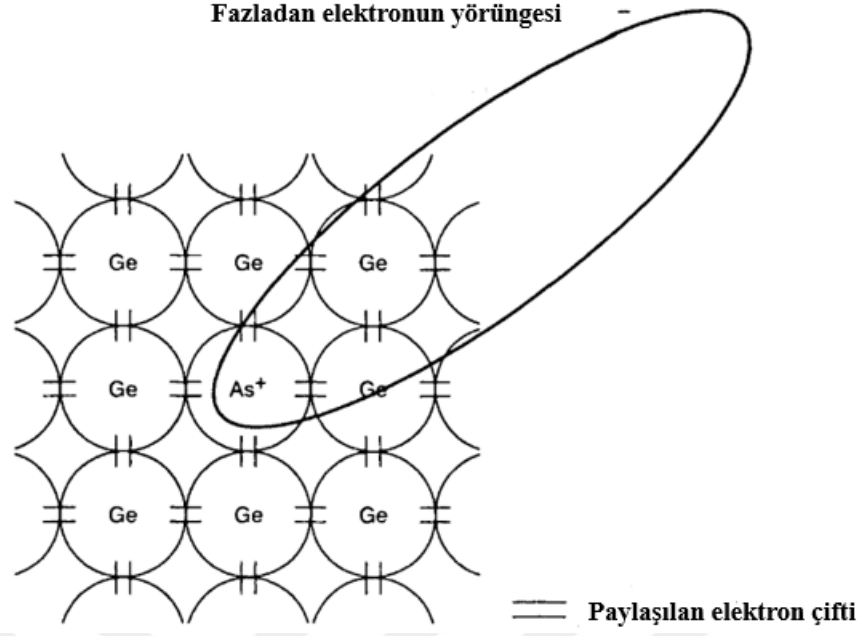
3.9.1. Yarıiletkenler

Saf yarıiletkenlerin enerji durumları ve band yapısı Şekil 3.17’de gösterilmiştir. İletim bandında az sayıda bulunan elektron eksi işaretiyle gösterilmektedir. Valans bandında eşit sayıda bırakılan elektronlar ise artı işaretiyle gösterilmektedir. İki yükün birleşimi, bir gazdaki iyon çiftine benzer şekilde bir elektron-boşluk çifti oluşturmaktadır. Uygulanan bir elektrik alanın etkisi altında, iletim bandındaki elektronlar hareket ederler. Ayrıca, valans bandındaki elektronlar boşlukları doldurmak için hareket ederler böylece yerlerinde boşluklar bırakırlar ve bu boşluklar da başka elektronlar tarafından doldurulur. Bu süreç, boşlukların elektronların tersi yönünde hareket etmesine neden olur. İletim bandı elektronlarının hareketi ve valans bandı boşluklarının hareketleri, iletkenliğe katkıda bulunur. Oda sıcaklığında yarıiletkenin doğal iletkenliği, az sayıdaki elektron-boşluk çifti ile sınırlıdır. Başka bir deyişle boşluk ile kT arasındaki fark ile sınırlıdır.



Şekil 3.17. Oda sıcaklığında içsel bir yarı iletkenin enerji durumlarının gösterimi (Turner, 1995)

Bir yarıiletkenin iletkenliği, kristal yapının periyodik sistemde bulunan komşu bir gruptan atomlarla katkılanması ile büyük ölçüde artırılabilir. Örneğin germanyuma (Ge) az miktarda arsenik (As) eklenerek katkılama yapılması durumu Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Erimiş karışımdan bir kristal oluştuğunda, arsenik safsızlığı, germanyum örgüsünde bir konum işgal eder. Arsenik atomunun yarıçapı $1,37 \text{ \AA}$ ve germanyum atomunun yarıçapı $1,39 \text{ \AA}$ ‘dur. Arsenik beş değerlik elektrona sahip olduğu için komşu Ge atomu ile kovalent bağ oluşturduktan sonra fazladan bir elektronu kalır. Şekil 3.18’de gösterilen iki kısa düz çizgi komşu atomlar arasında paylaşılan bir çift elektronun kovalent bağını temsil etmektedir. Kristal örgüde bulunan As^+ ifadesi ise fazladan elektronun yörüngesini temsil etmektedir. Valans bandı dolduğunda ekstra bir elektron işgal etme durumu yoktur. Bu sebeple arsenik iyonunda kalan fazladan elektron oda sıcaklığında termal iletim yoluyla iletim bandına geçebilir. Bu sebepten dolayı da katkılı yarı iletkenin iletkenliği, içsel yarıiletken değerinden çok daha iyidir. İletkenliğin artış miktarı, eklenen arsenik miktarını düzenleyerek kontrol edilebilir. Arsenik gibi fazladan elektron sağlayan katkı maddelerine donör denir ve elde edilen yarıiletken, n-tipi yarıiletken olarak ifade edilir.

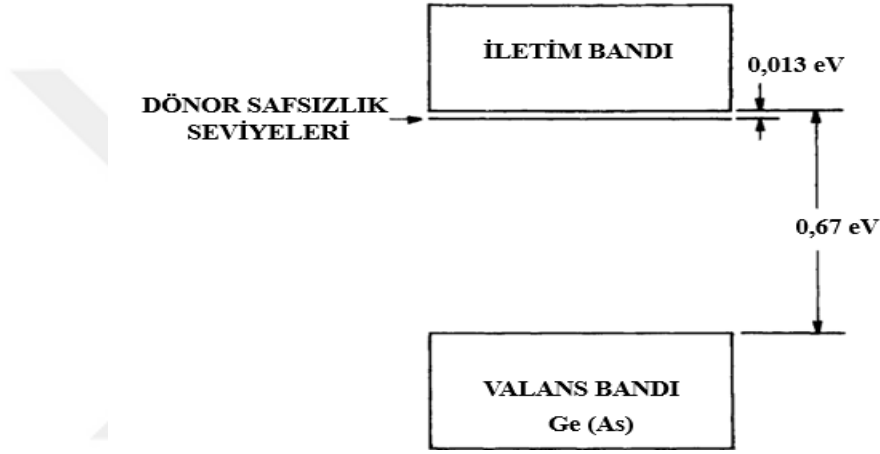


Şekil 3.18. n-tipi yarıiletkenin gösterimi (Turner, 1995)

n-tipi bir yarıiletkenin fazladan elektronlarını iletim bandına uyarmak için çok az enerji gerektiğinden, donör safsızlık atomlarının enerji seviyeleri, iletim bandının hemen altındaki yasak bölgede bulunmalıdır. Arsenik (As) donör atomları içeren germanyum (Ge) kristali için enerji seviyesi diyagramı Şekil 3.19’da verilmiştir. Ge için donör safsızlık atomlarının enerji seviyeleri, iletim bandı tabanının 0,013 eV altındadır. Mutlak sıfırda tüm donör durumları doludur ve iletim bandında hiçbir elektron yoktur. Fermi enerjisi, donör seviyeleri ile iletim bandının tabanı arasında yer alır. Sıcaklık arttıkça, termal olarak uyarılmış elektronlar donör durumlardan iletim bandına geçerek iletkenliği büyük ölçüde artırır. Antimon, n-tipi yarıiletken elde etmek için Ge veya Si için donör (safsızlık maddesi) olarak kullanılabilir.

Ge veya Si atomları, periyodik sistemde bulunan galyum veya indiyum ile katkıldığında yeni bir yarıiletken türü oluşmaktadır. Bu tür yarıiletkenlerde katkılama için kullanılan atomun değerlik elektronu normal kovalent bağlı kristali oluşturmak için gerekli olan elektron sayısından bir elektron eksiktir. Bu sebeple katkılanan kristal yapı pozitif yüklü boşluklar içerir. Bu katkı maddelerine alıcı (akseptör) denir ve bu şekilde üretilen yarıiletken, p-tipi yarıiletken olarak ifade edilir. Valans bandındaki boşluklar, komşu

atomlardan gelen elektronlar ile dolarken pozitif yükler gibi hareket eder. Valans bandı elektronlarının hareket edebilmesi ve katkı malzemesi mevcutken boşluk bırakması nedeniyle, alıcının etkisi valans bandının hemen üstündeki elektron enerji seviyelerinde tanımlanmaktadır. Şekil 3.20, galyum (Ga) alıcı atomları ile katkılanmış p-tipi germanyum yarıiletkenlerinin enerji seviyesi diyagramlarını göstermektedir. Mutlak sıfırda tüm elektronlar valans bandındadır ve Fermi enerjisi valans bandının hemen üzerinde yer alır. $T > 0$ olduğunda, termal olarak uyarılmış elektronlar, alıcı seviye durumlarını işgal eder ve bu katkı kristale artan iletkenlik kazandırır.



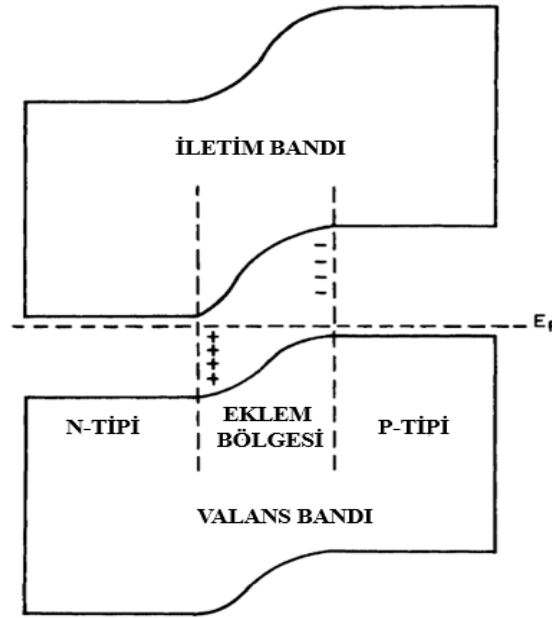
Şekil 3.19. Arsenik (As) dönör atomları içeren germanyum (Ge) kristali için enerji seviyesi diyagramı



Şekil 3.20. Galyum (Ga) alıcı atomları içeren germanyum (Ge) kristali için enerji seviyesi diyagramı

3.10. Yarıiletken Eklemler

Yarıiletkenlerin elektronik devre elemanları olarak ve radyasyon ölçümleri için kullanışlılığı, bir diyot bağlantısında oluşturulan özelliklerden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler n ve p tipi yarıiletkenlerin iyi termodinamik temasının sağlandığı diyot bağlantısında meydana gelir. Şekil 3.21, n-p eklemi için bir elektron enerji seviyesi diyagramını göstermektedir. İki yarıiletken tipi birleşerek, kendi karakteristik Fermi enerjisine (E_F) sahip tek bir sistem oluşturur. E_F , izole edilmiş n-tipi bölgede iletim bandının hemen altında ve izole edilmiş p-tipi bölgesinde valans bandının hemen üzerinde yer aldığından bantların bağlantı bölgesi üzerinde deformasyon olması gerekir. n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler başlangıçta temas ettirildiğinde, elektronlar n-tipi bölgedeki donör safsızlık seviyelerinden daha düşük enerjili alıcı p-tipi bölgelere akar. Bu süreçte eklem bölgesinin p-tipi tarafında negatif yük biriktirir ve n-tipi tarafında iyonize verici safsızlık atomları şeklinde hareketsiz pozitif yükler bırakır. Denge durumundaki net etki, eklem bölgesi boyunca yükün ayrılması ve deforme olmuş bantların korunmasıdır.

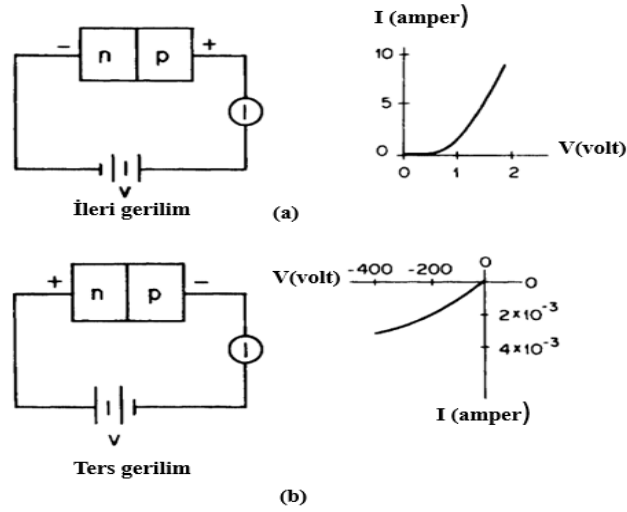


Şekil 3.21. n-p ekleminin enerji seviye diyagramı

Termal denge koşullarında bile, elektronlar bağlantı bölgesi boyunca her iki yönde hareket eder. Şekil 3.21’de görülen n-p ekleminde termal uyarma sonucunda bazı elektronlar p

bölgesindeki iletim bandına yükselirken valans bandında da boşluklar olacaktır. Yükseltilmiş bir elektron, serbestçe bağlantı bölgesinde hareket edebilir ve daha sonra n bölgesinde toplanır. Bu süreçte p ekleminden n eklemine doğru termal akım oluşur. Ayrıca, n bölgesindeki bazı iletim bandı elektronları p bölgesine hareket edebilmek için yeterli enerjiye sahip olurlar ve p bölgesine geçen bir elektron, valans bandındaki boşluklardan biri ile birleşebilir. Bunun sonucunda serbest elektronlar boşluklarla birleşir ve rekombinasyon akımı oluşur. Rekombinasyon akımı sonucunda termal akım dengelenir ve cihazda hiçbir net yük akışı olmaz. Valans bandındaki boşluklar, komşu elektronlar tarafından doldurularak pozitif yük taşıyıcıları gibi davranır. Silikon cihazlar (1,14 eV bant aralığı) oda sıcaklığında çalışır. Germanyum cihazların daha küçük bant aralığında (0,67 eV), termal gürültüyü bastırmak için düşük sıcaklıklarda (örneğin sıvı azot sıcaklığı 77 K) çalışması gerekmektedir. Yük dengesizliğinin meydana geldiği bağlantı bölgesi, tükenme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Tükenme bölgesi, yüksek dirençli bir paralel plakalı iyonizasyon odası gibi hareket ederek, radyasyon tespiti için kullanılabilir. Tükenme bölgesinde üretilen iyon çiftleri hareket ederek bir elektrik sinyaliye sebep olur. Böyle bir cihazın performansı, rekombinasyon ve gürültü problemlerini hafifletmek için öngerilim voltajı kullanılarak büyük ölçüde artırılır.

Ön gerilim voltajı kullanılarak oluşturulan bağlantı, doğrultucu olarak ifade edilir. Şekil 3.22(a), n tarafına uygulanan ön gerilimi göstermektedir. Bu yönde uygulanan gerilim, bağlantı bölgesi boyunca potansiyel farkını düşürür ve devrede nispeten büyük bir I akımının akmasına neden olur. Bu yöndeki gerilime ileri gerilim denir. Küçük bir ön gerilim voltajı ile nispeten büyük bir akım elde edilir. Şekil 3.22(b)'deki gibi ters gerilim uygulandığında bağlantı bölgesindeki potansiyel fark artar. Bu durumda çok daha küçük bir akım ters yönde akar. Bu tür n-p bağlantılı cihazlar doğrultucudur yani akımı bir yönde geçirirler ancak diğer yönde akım geçirmezler.



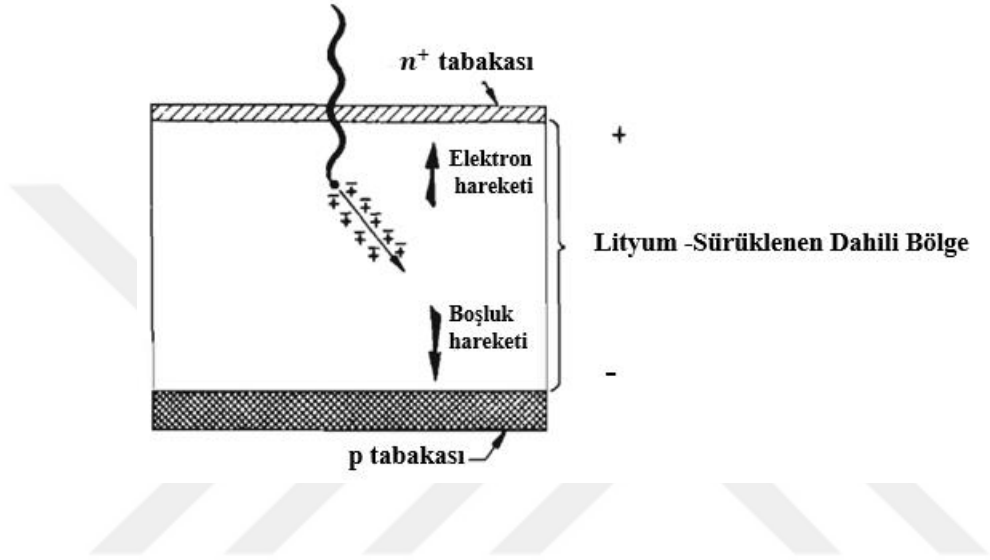
Şekil 3.22. n-p eklemlerine uygulanan (a) ileri ve (b) ters gerilimin ve akım- voltaj eğrilerinin gösterimi

3.11. Yarıiletken Dedektörler

Son yıllarda yarıiletken malzemenin tek kristallerinden üretilen radyasyon detektörlerinin gelişimi, X-ışınlarının ve gama ışınlarının algılanmasında büyük katkı sağlamıştır. Bu cihazlar artık oldukça büyük hacimlerde üretilmektedir. NaI(Tl) sintilasyon dedektörleri, gama radyasyonu için yüksek tespit verimliliği avantajına ve üstün enerji çözünürlüğüne sahiptir. Silikon ve germanyum dedektörleri darbe-genlik analiz sistemleri, elemental ve radyonüklidik analiz için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar, katı hal iyonizasyon odalarının özelliklerine sahiptir. Dedektöre bir gerilim uygulanırsa, uyarımla katı maddenin iletim bantlarına yükseltelen elektronlar ve valans bandındaki boşluklar serbest hareket ederler ve cihazın uygun elektrodunda toplanabilirler.

Yarıiletken radyasyon detektörlerinin gelişimi, yüklü parçacıkların ve fotonların tespiti ve enerji ölçümü için üretilen sintilasyon detektörlerinin geliştirilmesi ile paralel olmuştur. McKay 1951 yılında yarıiletken bağlantı diyotu ile alfa parçacıklarının tespiti edildiğini bildirmiştir. Bunun ardından X-ışını ve yüklü parçacık enerji ölçümü için p-n eklemlili sayaçlar geliştirilmiştir. 1958 yılında Walter ve Dabbs, sıvı nitrojen sıcaklıklarında germanyum yüzey bariyer bağlantılarını kullanarak enerji çözünürlüğünde önemli bir gelişme elde etmiştir. Ancak o dönemde sadece çok ince malzeme katmanlarından yük taşıyıcıları toplamak mümkündü ve sonuç olarak sayaçlar yüksek enerjili gama

radasyonuna karşı çok sınırlı bir duyarlılığa sahiptir. 1960 yılında Pell, lityum iyonlarının, p-tipi safsızlıkların varlığını telafi etmek ve böylece tükenme bölgesinin hacmini artırmak için büyük hacimlerde çok saf silikon veya germanyumdan sürüklenebileceğini gösterdi. Bu teknikle Şekil 3.23’de görüldüğü gibi bir p-i-n yapısı oluşturmak için lityum iyonları kullanılabilir. Şekilde gösterilen n^+ terimi elektron donörlerinin fazlalığını ifade etmektedir.

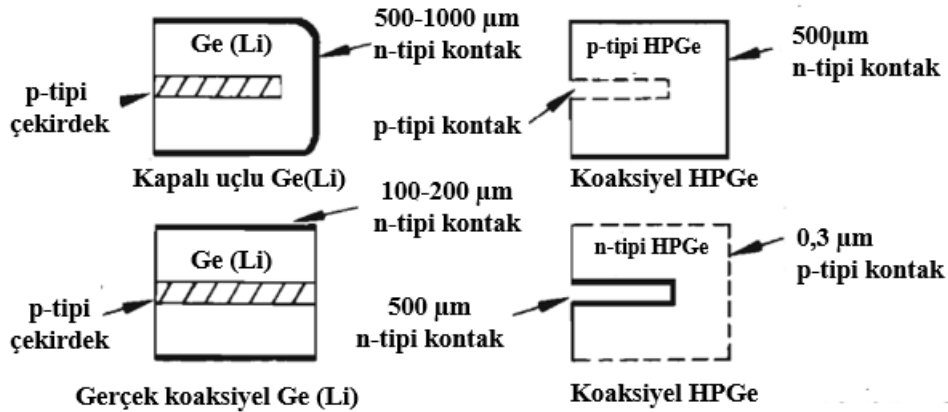


Şekil 3.23. Bir Ge (Li) detektörünün işleyişinin gösterimi

500 ile 4000 V arasında tipik öngerilim voltajı, yüklü parçacıkların toplanması ve optimum yükselme süresi tepkisini sağlamak için tükenme bölgesine uygulanır. Doymuş sürüklenme hızında, bir yük taşıyıcısının 1 cm mesafe kat etmesi için gereken süre yaklaşık 0,1 mikro saniyedir. Büyük hacimli cihazlarda, yükselme süresi ayrıca dedektördeki temel olayın konumuna bağlı olacaktır, bu durum cihazın zaman çözünürlüğünü sınırlayarak darbe şeklinde bir değişikliğe neden olur.

Gama ışınlarını algılayan dedektör kullanıldığında, gama ışınının dedektördeki etkileşimi sonucunda birincil uyarılmış elektron üretilir ve bu elektron enerjisini dedektör hacmi içinde dağıtarak bir dizi ikincil elektronu uyarır. Bu şekilde, birincil elektronun enerjisi, daha sonra toplanan elektron-boşluk çiftlerinin üretiminde harcanır. Toplanan elektronların sayısı, birincil elektronun enerjisi ile orantılı olacak ve dolayısıyla tespit edilen fotonun enerjisi ile ilişkili olacaktır.

Saf katkısız veya yapısal kusurlardan (ikincil elektronlar için tuzak görevi görebilen) arınmış yarıiletken kristaller doğrudan dedektörlerin imalatı için kullanılabilir. Bu dedektörlerin gelişim sürecinin ilk döneminde, yeterince saf malzeme mevcut değildi. Bu sebeple lityum iyonlarını yüksek sıcaklıkta dedektör malzemesi boyunca sürükleyerek safsızlıkları telafi etmek gerekmekteydi. Lityum iyonlarının kristal kafes içindeki hareketliliği oda sıcaklığında ihmal edilebilir seviyede olmadığı için bu tür dedektörler ömürleri boyunca kriyojenik sıcaklıklarda (-140°C altı sıcaklıklarda) tutulması gerekmektedir. Gama ışını enerji spektrometrisi için lityum-iyonu ile sürüklenmiş germanyum (Ge(Li)) dedektörlerinin uygulanmasına ilişkin ilk çalışmalar 1963 yılında yapılmıştır. Saf yarıiletken malzeme elde etmedeki zorluklar nedeniyle, 1,5 ila 2 cm'yi aşan derinliklerde yükün tam olarak toplanması mümkün olmamıştır. Bu sorunu gidermek için 1963 yılında Tavendale ve Ewan eş eksenli bir geometri önermişlerdir. Bu cihazlarda lityum, p-tipi bir çekirdek bırakarak kristalin dış yüzeyinden sürüklenir. Bu tür yapı, büyük bir hassas hacim sağlar ve gama ışını spektrometrisi için Ge(Li) dedektörlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Böylece 150 cm^3 'ü aşan aktif hacimler elde edilebilir. Eş eksenli Ge dedektörlerinin üretiminde kullanılan geometriler şekil 3.24'de gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Ge(Li) ve HPGe dedektörlerinin silindirik, dairesel ve yarı dairesel türlerinin şematik gösterimi (Nuttall, 1980)

Yeterli saflıkta tekli germanyum kristalleri artık üretilmektedir. Bu sayede lityum sürüklenmesine gerek kalmadan yüksek kaliteli dedektörler yapılabilmektedir. 20 cm^2 alana ve 30 cm^3 hacme sahip düzlemsel dedektörler ve 150 cm^3 'ten büyük hacme sahip koaksiyel dedektörler artık mevcuttur. Birçok avantajı bulunan bu dedektörler intrinsik

veya yüksek saflıkta (HPGe) dedektörler olarak adlandırılır. Bu dedektörlerde lityum iyon hareketliliği sorunu olmadığından her zaman soğuk tutulmaları gerekmemektedir. Bu dedektörler oda sıcaklığında monte edilebilirler, isteyerek veya kazara ısıtıldığında hasar görmezler, sıvı azot olmadan sevk edilebilirler ve gerekirse kullanıcı tarafından radyasyon hasarını onarmak için tavlanabilirler. Lityum sürüklenme işlemi haftalar veya aylar sürdüğü için Li içerikli dedektörlerin üretim süreci oldukça uzun sürmektedir fakat HPGe dedektörlerinin üretim süreci birkaç gündür. HPGe dedektörlerinin kısa sürede üretilmesi avantaj sunmaktadır.

İletim bandından termal olarak üretilen elektronları ortadan kaldırmak için HPGe ve Ge(Li) dedektörlerinin sıvı-azot sıcaklıklarına yakın çalıştırılması gerekmektedir. 77 K kriyostat sayesinde dedektörün termal iletkenliği ve vakum mahfazasından gelen termal radyasyon arasındaki denge sağlanır ve dedektör sıcaklığı 80 ila 85 K arasında tutulur. Soğutmalı FET (alan etkili transistör) ön yükselteç kullanan sistemlerde, giriş aşamasında bulunan FET, sıcaklığını 100 ila 140 K aralığında tutmak için kriyostat üzerine monte edilir. Ge(Li) ve HPGe dedektörlerinin çalışma özellikleri benzerdir ve "Ge dedektörü" terimi her iki tür için de ifade edilebilir.

HPGe dedektörler tamamen "içsel" değildir; alıcıların veya donörlerin ($<10^{-10} \text{ cm}^{-3}$ veya $1/10^{12}$ Ge atomları) kalan konsantrasyonu onlarda biraz p-tipi veya n-tipi özellik bırakmaktadır. p-tipi HPGe dedektörlerinin yerine n-tipi HPGe dedektörlerinin kullanılması (ince bir p-tipi dış kontak ile) sayesinde 3 keV'a kadar düşük enerjili X-ışınlarının algılanmasını mümkün olmaktadır. Şekil 3.24'te görüldüğü üzere n-tipi HPGe dedektörünün elektrot konfigürasyonu, kapalı uçlu p-tipi HPGe dedektörünün tam tersidir. p-n bağlantısını oluşturan dış p-tipi temas, yalnızca 0,3 μm kalınlığında bir boron tabakasının iyon implantasyonu ile yapılır. Böylece, aktif olmayan yüzey tabakası ortadan kaldırılır ve düşük enerji algılama limiti, esasen ince bir berilyum pencere ile donatılabilen kriyostat vakum muhafazası tarafından belirlenir.

Koaksiyel dedektörlerdeki ters elektrot geometrisinin avantajı ise özellikle hızlı nötronlardan kaynaklanan radyasyon hasarına karşı büyük ölçüde duyarlılığa sahip olmasıdır. Hızlandırıcı-hedef odalarında bu durum oldukça önemlidir. Bunun nedeni burada radyasyonun başlıca zarar verici etkisi olan boşluk tuzaklarının üretilmesidir. Ters

elektrotlarla boşluklar dış kısımda toplanır. Silindirik geometride çoğu malzeme dışarıya daha yakın olduğu için boşluklar daha kısa bir mesafe yol kateder ve hapsedilme olasılığı daha düşüktür. Ayrıca, p-tipi dedektör ile karşılaştırıldığında, belirli bir öngerilim için uzay-yük dağılımı dış bölgelerde daha yüksek bir alan açar ve bu da hapsedilme miktarını daha da azaltır. Bu iki etkiden koaksiyel n tipi HPGe dedektörlerinin performansları önemli ölçüde düşmeden önce, p tipi dedektörlere kıyasla 30 kattan daha fazla radyasyon hasarına dayanabilir.

Ge dedektörlerinin soğutulma gerekliliğinin olması nükleer reaktörlerin çevresinde, endüstride, uzayda ve nükleer tıp gibi alanlarda kullanılmasını kısıtlamaktadır. Bu alanlarda dedektör ihtiyacını karşılamak için bazı araştırmacılar oda sıcaklığından yaklaşık -50°C 'ye kadar çalıştırılabilen yarı iletken γ -ışını dedektörlerini geliştirme üzerine çalışmalar yapmıştır. Örneğin, tıbbi incelemelerde 37°C 'de çalışmalıdır. Bir yarıiletken dedektörün çalışma sıcaklığı, termal olarak uyarılan elektronun valans bandından iletim bandına aktarımı için yasak enerji aralığını (E_g) geçmesi gerekmektedir. Uygulamada, oda sıcaklığında çalışma için $E_g > 1$ eV olmalıdır ve tercihen yaklaşık 1,4 ila 2,4 eV enerji aralığında olmalıdır (Si için $E_g = 1,12$ eV ve Ge için $E_g = 0,68$ eV).

Oda sıcaklığında nükleer radyasyon dedektörleri için en umut verici yarı iletkenler HgI_2 ($E_g = 2,13$), CdTe ($E_g = 1,47$) ve GaAs ($E_g = 1,43$)'tir. Ancak bugüne kadar, kalıntı safsızlıklardan kaynaklanan kusurlar ve stokiyometriden kaynaklı küçük sapmalar, iyi yük toplanmasını engellemiştir. Spektroskopi dereceli HgI_2 ve CdTe dedektörleri, Ge'de bulunan $\sim 100 \text{ cm}^3$ hacim ile karşılaştırıldığında $\sim 100 \text{ mm}^3$ lük hacimlere sınırlandırılmıştır. Bu küçük dedektörler, Ge ile karşılaştırıldığında yüksek atom numaralarına sahip olduklarından özellikle X-ışınları için birim hacim başına çok yüksek algılama verimliliğine sahiptir. Özellikle tıbbi sondalar, röntgen dedektörleri ve kişisel radyasyon monitörleri gibi küçük boyutun avantaj olduğu birçok uygulamada kullanılmışlardır. CdTe radyasyon monitörleri, X ve γ ışınlarının yanı sıra termal nötronlara da tepki vermektedir. HgI_2 veya CdTe dedektörlerinden elde edilebilecek γ ışını verimliliğine ve Ge dedektörlerinininkine yakın çözünürlüğe sahip büyük dedektör türü sınırlıdır. Bu nedenle bu dedektörlerin şu an radyonüklid ölçümleri için yaygın olarak kullanılması mümkün değildir (Nuttall, 1980).

Düzlemsel Si dedektörleri, oda sıcaklığında yüklü parçacık tespiti ve alfa parçacık spektrometrisi için yaygın olarak kullanılmaktadır. 77 K'de çalışan Si(Li) dedektörleri, düşük enerjili X-ışınları için en iyi çözünürlüğü (6 keV'da ~150 eV FWHM) vermektedir. Lityum iyonları silisyumda germanyumda olduğundan çok daha az hareketlidir ve Ge(Li) dedektörlerinin aksine Si(Li) detektörler oda sıcaklığında saklanabilmektedir (Nuttall, 1980).



4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Üçlü Kompozitlerin Üretim Süreci

Gama radyasyonu zırhlama karakteristikleri incelenecek kompozitlerin üretimi iki aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada doymamış polyester reçine ($C_{16}O_7H_{14}$, $\rho=1,113 \text{ g/cm}^3$), kobalt oktoat (%6) ($CoC_{16}H_{30}O_4$, $\rho=0,885 \text{ g/cm}^3$) ve metil etil keton peroksit ($C_8O_6H_{18}$, $\rho=1,170 \text{ g/cm}^3$) kullanılarak polimer matriks hazırlanmıştır. Burada doymamış polyester reçine bağlayıcı, kobalt oktoat hızlandırıcı ve metil etil keton peroksit ise başlatıcı olarak kullanılmıştır. Kobalt oktoat (%6) ve metil etil keton peroksit (MEKP) ağırlıkça doymamış polyester reçinenin sırasıyla %0,2'si ve %1'i olarak seçilmiştir. Polimer matriks bütün kompozit serilerinde sabit tutulmuştur ve toplam hacmin %50'sini oluşturmuştur. Kalan hacmi ise FeCr ve Mn, MoS_2 veya BiClO malzemeleri oluşturmuştur. Bu malzemeler arasında ağırlıkça yer değişimleri yapılmıştır. Yer değiştirme ağırlıkça FeCr miktarının %0, 10, 20, 30, 40 ve 50'si olarak yapılmıştır. Üretimin ikinci aşamasında ağırlıkça oranları belirlenen dolgu malzemeleri (FeCr ve Mn, MoS_2 veya BiClO) öncelikle homojenliği sağlamak için 5 dakika karıştırıcı yardımıyla karıştırıldıktan sonra polimer matriks içine dökülmüştür. Polimer matriks ve dolgu malzemelerinden oluşan karışım homojenliğin sağlanması için kompozitin belli bir kıvama gelene kadar karıştırma süreci devam etmiştir. Numunelerin kalıptan rahat çıkması için kalıbın içi vakslanmış. Daha sonra elde edilen karışım disk şeklinde 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki kalıplara dökülmüştür. Yaklaşık yarım saat sonra kürleşme süresini tamamlayan kompozitler kalıptan çıkarılmış ve radyasyon zırhlama deneyleri için hazır hale gelmişlerdir. Kompozitlerin üretiminde kullanılan malzeme miktarları Tablo 4.1'de verilmiştir.

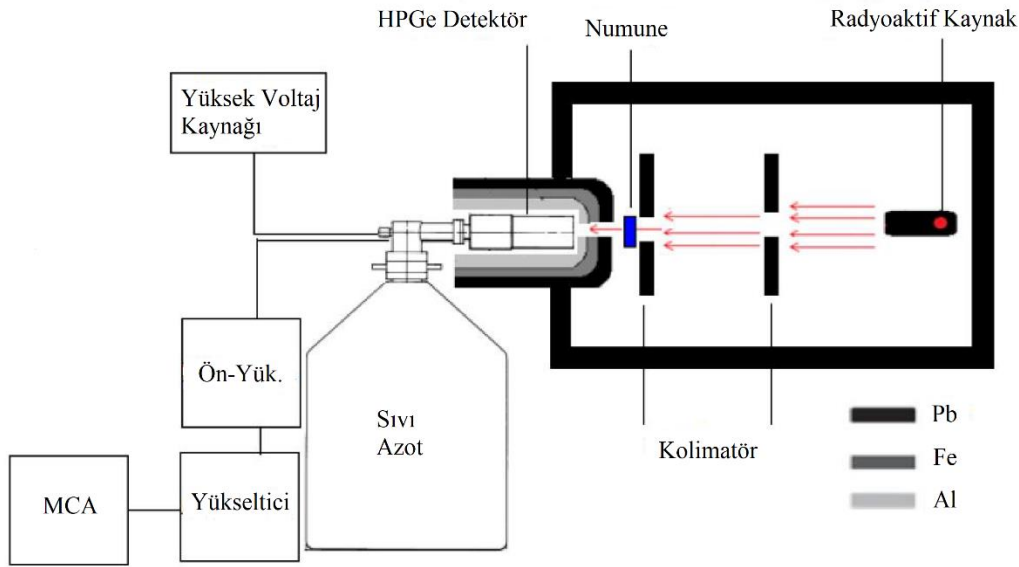
Tablo 4.1. Üçlü kompozitlerin üretiminde kullanılan malzeme miktarları

Numune Kodu	Polyester (g)	FeCr (g)	Mn, MoS ₂ veya BiClO (g)	Mekp (g)	Kobalt oktoat (%6) (g)
FeCrBi0	2,8	17,88	-	0,028	0,0056
FeCrBi10	2,8	16,10	1,78	0,028	0,0056
FeCrBi20	2,8	14,30	3,58	0,028	0,0056
FeCrBi30	2,8	12,55	5,36	0,028	0,0056
FeCrBi40	2,8	10,73	7,15	0,028	0,0056
FeCrBi50	2,8	8,94	8,94	0,028	0,0056
FeCrMn0	2,8	17,88	-	0,028	0,0056
FeCrMn10	2,8	16,10	1,78	0,028	0,0056
FeCrMn20	2,8	14,30	3,58	0,028	0,0056
FeCrMn30	2,8	12,55	5,36	0,028	0,0056
FeCrMn40	2,8	10,73	7,15	0,028	0,0056
FeCrMn50	2,8	8,94	8,94	0,028	0,0056
FeCrMo0	2,8	17,88	-	0,028	0,0056
FeCrMo10	2,8	16,10	1,78	0,028	0,0056
FeCrMo20	2,8	14,30	3,58	0,028	0,0056
FeCrMo30	2,8	12,55	5,36	0,028	0,0056
FeCrMo40	2,8	10,73	7,15	0,028	0,0056
FeCrMo50	2,8	8,94	8,94	0,028	0,0056

4.2. Deneysel Süreç

Deneysel süreçte kullanılan geometri Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney geometrisi yüksek saflıkta germanyum detektör (HPGe), kolimatörler, radyoaktif kaynaklar, kompozitler ve yüksek voltaj kaynağı, ön-yükseltici, yükseltici ve çok kanallı analizör gibi elektronik sistemlerden oluşmaktadır. Kullanılan HPGe detektör 70 mm kristal çapına ve 25 mm kristal genişliğine sahiptir. Detektörün rezülasyonu 5,9 keV’de 0,380 keV, 122 keV’de 0.585 keV ve 1330 keV’de 1,800 keV’dur. Çok kanallı analizör pozitif polarite ve yüksek voltaj kaynağı 2600 V’da çalıştırılmıştır. Detektör kristali ve ön-yükseltici elektronik gürültüyü engellemek ve temel saymayı en düşük seviyede tutmak için sıvı azot sıcaklığında (-196 °C) tutulmuştur. Dar ışın geometrisini sağlamak için kaynaktan önce iki farklı çapa sahip iki kurşun kolimatör ve numuneden sonra detektörün berilyum penceresinden hemen önce kurşun-demir-alüminyumdan yapılmış sandviç tipi bir kolimatör kullanılmıştır. Üretilen üçlü kompozitler detektör ve radyoaktif kaynağın arasına ölü zamanın minimum olduğu mesafelere yerleştirilmiştir. Deneyler Na-22, Co-60, Ba-133 ve Cs-137 nokta kaynaklarından yayınlanan 276,4 ila 1332,5 keV foton enerjileri aralığında 9 farklı enerjide gerçekleştirilmiştir. Radyoaktif kaynaklara ait aktiflik, yarı-ömür, enerji ve bozunma olasılıkları bilgileri Tablo 4.2’de verilmiştir. Bütün ölçümler üç tekrar şeklinde gerçekleştirilmiştir ve ölçüm süresi pik alanlarının en az 10000 sayım

olduğu zaman olarak seçilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen spektrumların altında kalan alanlar hem sistem ara yüzünün sağladığı Maestro programı ile hem de Origin 7.5 (demo versiyon) programı ile belirlendikten sonra data analizi sürecine geçilmiştir.



Şekil 4.1. Deney geometrisi

Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan radyoaktif kaynaklara ait bilgiler

Kaynak	Aktivitesi (kBq)	Yarı ömrü (y)	Enerji (keV)	Bozunma Olasılığı (%)
^{22}Na	456	2,60	511,0	179,80
			1274,5	99,94
^{60}Co	424	5,27	1173,2	99,97
			1332,5	99,99
			80,1	34,06
			276,4	7,16
^{133}Ba	460	10,51	302,8	8,33
			356,0	62,05
			383,8	8,94
^{137}Cs	473	30,07	661,6	85,10

4.3. Gama Radyasyonu Zırhlama Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneyisel süreçte elde edilen soğurucu varlığında (I) ve yokluğunda (I_0) gama ışını şiddetlerini kullanarak ve aşağıdaki formül yardımıyla radyasyon koruma verimi (RKV, %) parametresi belirlenmiştir.

$$RKV = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Daha sonra radyasyon koruma verimi parametresinin tamamlayıcısı olan radyasyon geçirme oranı (RGO, %) parametresi $100-RKV$ veya aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir.

$$RGO = \left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

Diğer gama zırlama parametrelerinin de öncüsü olan ve numunenin yoğunluğundan ve fiziksel halinden bağımsız olan kütle azaltma katsayısı (cm^2/g) deneysel olarak aşağıdaki denklem ile belirlenmiştir.

$$(\mu/\rho)_{komp.} = \frac{1}{\rho x} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4.3)$$

Burada ρx birim alana düşen malzeme miktarını belirtmektedir. Teorik olarak bu parametre karışım kuralı olarak bilinen ve WinXCOM programı yardımı ile belirlenen, temelinde aşağıdaki denklemi kullanan süreç ile belirlenmiştir

$$(\mu/\rho)_{komp.} = \sum W_i (\mu/\rho)_i \quad (4.4)$$

burada W_i kompozitin içindeki i . elementin ağırlık kesrini ve $(\mu/\rho)_i$ ise i . elementin kütle azaltma katsayısını belirtmektedir. Bu kural incelenecek numunenin birden fazla element içerdiği durumlarda kullanılmaktadır.

i . elementin ağırlık kesri aşağıdaki denklem ile belirlenebilmektedir,

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_j n_j A_j} \quad (4.5)$$

burada A_i ve n_i sırasıyla i . elementin atomik ağırlığını ve atom sayısını belirtmektedir.

Kütle azaltma katsayısı belirlendikten sonra birbiriyle ilişkili bir seri parametreler zinciri belirlenebilmektedir. Bunlardan ilki birim kalınlıktaki azaltmayı belirten, malzemenin yoğunluğu ve fiziksel haline bağlı lineer azaltma katsayısıdır. Kütle azaltma katsayısı ile lineer azaltma katsayısı arasındaki ilişki aşağıda sunulmuştur,

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \quad (4.6)$$

burada μ lineer azaltma katsayısını (cm^{-1}) belirtirken, ρ (g/cm^3) malzemenin yoğunluğunu belirtmektedir.

Lineer azaltma katsayısı kullanılarak, başlangıç radyasyon şiddetinin %50'sini soğuran malzeme kalınlık, yarı kalık değeri (YKD, cm), %90'nını soğuran malzeme kalınlığı, onda-bir kalınlık (OKD, cm) ve başlangıç radyasyon şiddetinin %36,8'ini geçiren malzeme kalınlığı, ortalama serbest yol (OSY, cm) parametreleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir.

$$YKD = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (4.7)$$

$$OKD = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2,303}{\mu} \quad (4.8)$$

$$OSY = \frac{1}{\mu} \quad (4.9)$$

Kütle azaltma katsayısı kullanılarak elde edilebilen bir diğer parametre moleküler tesir kesiti ($\sigma_{t,m}$, $\text{cm}^2/\text{molekül}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir,

$$\sigma_{t,m} = \frac{1}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{komp.} \sum (n_i A_i) \quad (4.10)$$

eşitlikteki N_A , n_i ve A_i sırasıyla Avogadro sayısını, i. elementin malzeme içindeki atom sayısını ve atomik ağırlığını belirtmektedir. Moleküler tesir kesiti kullanılarak belirlenen atomik tesir kesiti ($\sigma_{t,a}$, cm^2/atom) ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_{t,a} = \sigma_{t,m} / \sum_i n_i \quad (4.11)$$

Kompozit numunesinde bulunan H, O ve C gibi elementlerin varlığından dolayı sadece teorik olarak belirlenebilen elektronik tesir kesiti ($\sigma_{t,e}$, cm²/elektron),

$$\sigma_{t,e} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (4.12)$$

denklemlerle hesaplanmıştır. Burada f_i i. elementin kompozit içindeki bolluğunu belirtirken, Z_i ve $(\mu/\rho)_i$ i. elementin atom numarasını ve kütle azaltma katsayısını ifade etmektedir.

Gama radyasyonu zırlama özellikleri açısından önemli bir diğer parametre etkin atom numarasıdır (Z_{etk}) ve elektronik ve atomik tesir kesitlerinin sonuçlarından bu parametre belirlenebilir.

$$Z_{etk} = \sigma_{t,a} / \sigma_{t,e} \quad (4.13)$$

Etkin atom numarası ile ilişkili ve birim ağırlıktaki elektron sayısını belirten etkin elektron yoğunluğu (N_{etk} , elektron/g) parametresi,

$$N_{etk} = \frac{Z_{etk}}{A_{tot}} (N_A n_{tot}) \quad (4.14)$$

denklemlerle belirlenmiştir. Burada A_{tot} ve n_{tot} sırasıyla malzeme içinde bulunan elementlerin toplam atomik ağırlığını ve atom sayısını belirtmektedir. Son olarak etkin elektron yoğunluğu ile ilişkili olan etkin iletkenlik (σ_{etk} , S/m) parametresi aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmiştir,

$$\sigma_{etk} = \frac{N_{etk} e^2 \tau}{m} \quad (4.15)$$

eşitlikteki N_{etk} metreküp başına etkin elektron yoğunluğunu belirtirken, e , τ ve m sırasıyla elektronun yükünü, rahatlama süresini ve kütlesini belirtmektedir.

Kütle azaltma katsayısındaki deneysel belirsizlik aşağıdaki denklem ile belirlenmiştir,

$$\Delta\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho x} \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho x}{\rho x}\right)^2} \quad (4.16)$$

burada ΔI , ΔI_0 ve $\Delta \rho x$ sırasıyla numune varlığındaki radyasyon şiddetindeki belirsizliği, numune yokluğunda radyasyon şiddetindeki belirsizliği ve birim alandaki kütle miktarındaki belirsizliği belirtmektedir. Diğer parametrelerdeki belirsizlikler kare ortalama kare süreçleriyle belirsizliğin dağılımı ilkesine göre belirlenmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Radyasyon Koruma Verimi ve Radyasyon Geçirme Oranı Araştırma Bulguları

Radyasyon koruma verimi (RKV, %) herhangi malzemenin belirli bir enerjiye sahip olan foton şiddetini belirli kalınlıkta azaltma miktarıdır ve yüzde (%) biriminde sunulur. Radyasyon geçirme oranı (RGO, %) ise radyasyon koruma veriminin tamamlayıcısı olan bir parametredir ve malzemeden geçen radyasyon şiddetini ifade eder. Bu parametre de genellikle % sonuç olarak sunulur. Bağlayıcı olarak polyester reçinenin, dolgu malzemesi olarak da ferro-krom ve manganez (Mn), molibden disülfür (MoS_2) veya bizmut oksiklorür'ün (BiOCl) kullanıldığı üçlü kompozitlerde radyasyon koruma verimi denklem (4.1) ve radyasyon geçirme oranı ise denklem (4.2) ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Deneysel olarak elde edilen radyasyon koruma verimi ve radyasyon geçirme oranı sonuçları üretilen üçlü kompozitler için Tablo 5.1-5.6'da listelenmiştir. Bunun yanında sonuçların görsel olarak yorumlanması için de elde deneysel sonuçların enerjiye karşı değişimleri Şekil 5.1-5.6'da sunulmuştur.

Tablo 5.1. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)

Enerji (keV)	FeCrBi0	FeCrBi10	FeCrBi20	FeCrBi30	FeCrBi40	FeCrBi50
276,4	31,67±1,70	40,49±1,99	44,41±2,34	50,80±3,71	57,78±4,23	62,59±3,97
302,9	30,73±0,84	37,14±0,98	40,38±1,04	47,54±1,13	50,48±1,66	57,04±1,75
356,0	29,49±0,36	35,26±0,42	36,44±0,47	40,22±0,47	43,66±0,52	48,71±0,67
383,9	28,22±1,26	32,41±1,60	33,21±1,80	40,55±2,12	42,95±2,58	43,67±2,23
511,0	24,88±0,42	27,72±0,50	28,98±0,50	31,58±0,55	32,71±0,55	33,86±0,62
661,7	21,95±0,19	24,22±0,21	24,02±0,22	26,28±0,23	26,62±0,25	27,98±0,27
1173,2	17,13±0,21	18,95±0,23	18,26±0,21	19,35±0,23	19,54±0,23	19,62±0,23
1274,5	16,06±0,25	17,55±0,29	17,27±0,27	18,75±0,30	18,44±0,29	18,75±0,30
1332,5	16,27±0,17	17,56±0,19	17,19±0,18	18,23±0,19	17,84±0,19	18,05±0,20

Tablo 5.2. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)

Enerji (keV)	FeCrMn0	FeCrMn10	FeCrMn20	FeCrMn30	FeCrMn40	FeCrMn50
276,4	33,10±1,69	35,60±1,96	34,86±1,51	36,45±1,84	33,02±1,60	33,86±1,84
302,9	31,89±0,81	33,43±0,84	33,53±0,91	33,49±0,82	32,89±0,84	32,42±0,84
356,0	30,12±0,34	32,16±0,36	31,93±0,35	31,81±0,34	30,66±0,35	30,47±0,33
383,9	28,37±1,50	30,97±1,53	31,47±1,42	30,09±1,77	28,79±1,34	29,97±1,71
511,0	25,82±0,47	27,39±0,49	28,25±0,46	27,51±0,48	25,25±0,45	26,16±0,43
661,7	22,86±0,20	24,30±0,21	24,67±0,23	25,32±0,22	22,91±0,20	23,40±0,21
1173,2	17,77±0,21	19,05±0,23	19,58±0,23	18,77±0,23	17,80±0,21	18,51±0,23
1274,5	17,34±0,28	18,33±0,29	18,58±0,29	18,03±0,28	16,78±0,27	18,09±0,29
1332,5	16,72±0,18	18,38±0,20	18,45±0,20	17,58±0,19	17,10±0,18	17,61±0,19

Tablo 5.3. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçları (%)

Enerji (keV)	FeCrMo0	FeCrMo10	FeCrMo20	FeCrMo30	FeCrMo40	FeCrMo50
276,4	31,08±1,31	31,60±1,43	33,07±1,57	33,78±1,90	33,83±1,78	33,07±1,57
302,9	30,88±0,79	32,43±0,81	32,18±0,78	32,11±0,91	31,89±0,88	31,25±0,78
356,0	28,01±0,31	29,63±0,35	28,45±0,30	28,95±0,31	28,85±0,36	28,69±0,30
383,9	27,89±1,28	27,29±1,69	28,45±1,51	29,10±1,53	28,66±1,43	27,91±1,29
511,0	23,54±0,38	24,98±0,42	24,74±0,44	25,47±0,43	24,65±0,43	24,45±0,42
661,7	20,70±0,18	22,24±0,19	21,95±0,19	22,42±0,21	21,87±0,19	21,89±0,18
1173,2	16,25±0,19	17,27±0,21	17,16±0,20	17,21±0,21	17,24±0,21	17,20±0,21
1274,5	15,79±0,25	16,38±0,26	16,42±0,26	16,64±0,26	16,33±0,27	16,15±0,26
1332,5	15,26±0,16	16,28±0,17	16,02±0,17	16,29±0,17	16,16±0,17	16,05±0,17

Tablo 5.4. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirime oranı sonuçları (%)

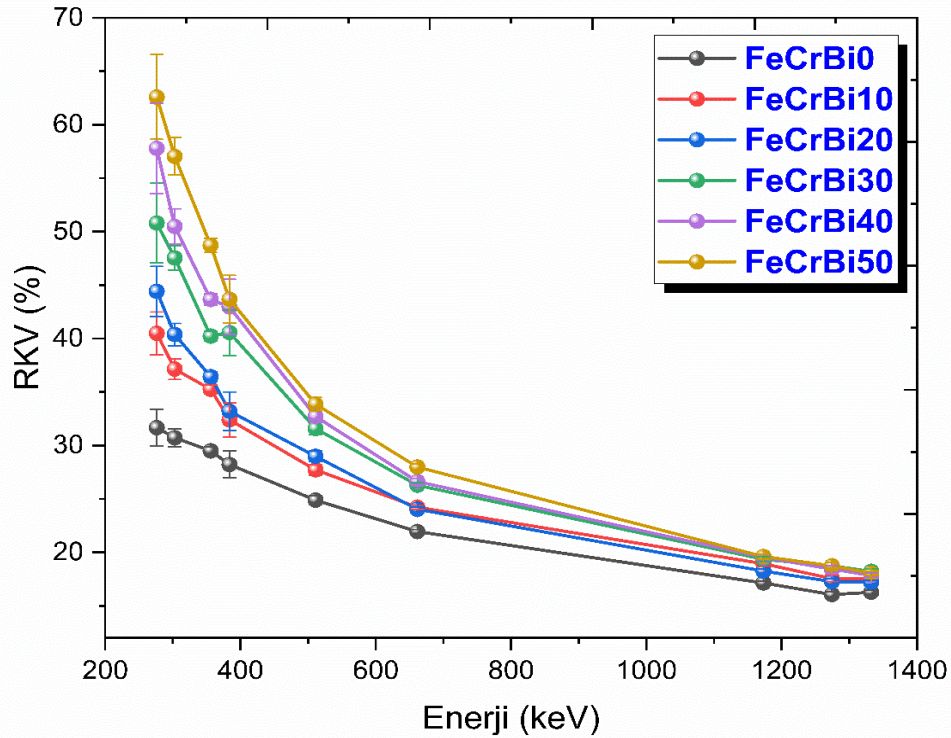
Enerji (keV)	FeCrBi0	FeCrBi10	FeCrBi20	FeCrBi30	FeCrBi40	FeCrBi50
276,4	68,33±3,66	59,51±2,93	55,59±2,93	49,20±3,60	42,22±3,09	37,41±2,37
302,9	69,27±1,90	62,86±1,66	59,62±1,54	52,46±1,24	49,52±1,62	42,96±1,32
356,0	70,51±0,87	64,74±0,77	63,56±0,82	59,78±0,70	56,34±0,66	51,29±0,70
383,9	71,78±3,20	67,59±3,35	66,79±3,62	59,45±3,11	57,05±3,43	56,33±2,87
511,0	75,12±1,27	72,28±1,29	71,02±1,23	68,42±1,19	67,29±1,13	66,14±1,21
661,7	78,05±0,68	75,78±0,65	75,98±0,69	73,72±0,65	73,38±0,68	72,02±0,70
1173,2	82,87±1,01	81,05±0,98	81,74±0,95	80,65±0,95	80,46±0,96	80,38±0,95
1274,5	83,94±1,30	82,45±1,34	82,73±1,28	81,25±1,30	81,56±1,27	81,25±1,30
1332,5	83,73±0,90	82,44±0,88	82,81±0,89	81,77±0,87	82,16±0,87	81,95±0,89

Tablo 5.5. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçları (%)

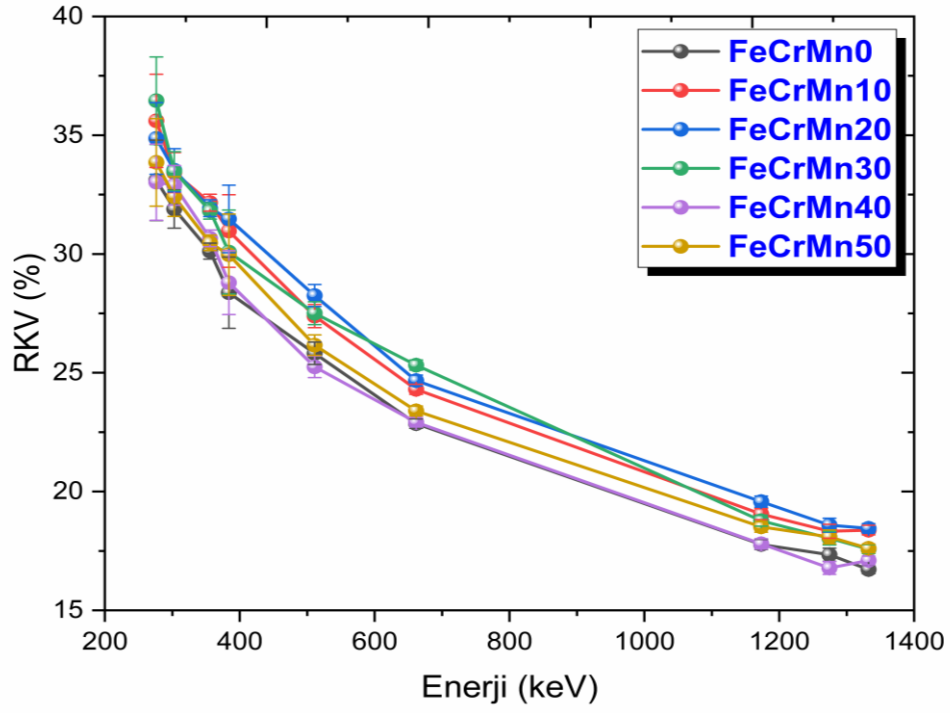
Enerji (keV)	FeCrMn0	FeCrMn10	FeCrMn20	FeCrMn30	FeCrMn40	FeCrMn50
276,4	66,90±3,42	64,40±3,55	65,14±2,81	63,55±3,21	66,98±3,25	66,14±3,60
302,9	68,11±1,72	66,57±1,68	66,47±1,80	66,51±1,63	67,11±1,71	67,58±1,75
356,0	69,88±0,78	67,84±0,75	68,07±0,76	68,19±0,74	69,34±0,79	69,53±0,74
383,9	71,63±3,79	69,03±3,41	68,53±3,09	69,91±4,11	71,21±3,32	70,03±4,00
511,0	74,18±1,35	72,61±1,30	71,75±1,18	72,49±1,27	74,75±1,33	73,84±1,21
661,7	77,14±0,68	75,70±0,66	75,33±0,71	74,68±0,64	77,09±0,67	76,60±0,68
1173,2	82,23±0,97	80,95±0,97	80,42±0,96	81,23±1,00	82,20±0,98	81,49±0,99
1274,5	82,66±1,32	81,67±1,31	81,42±1,29	81,97±1,29	83,22±1,33	81,91±1,31
1332,5	83,28±0,90	81,62±0,89	81,55±0,87	82,42±0,88	82,90±0,89	82,39±0,87

Tablo 5.6. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçları (%)

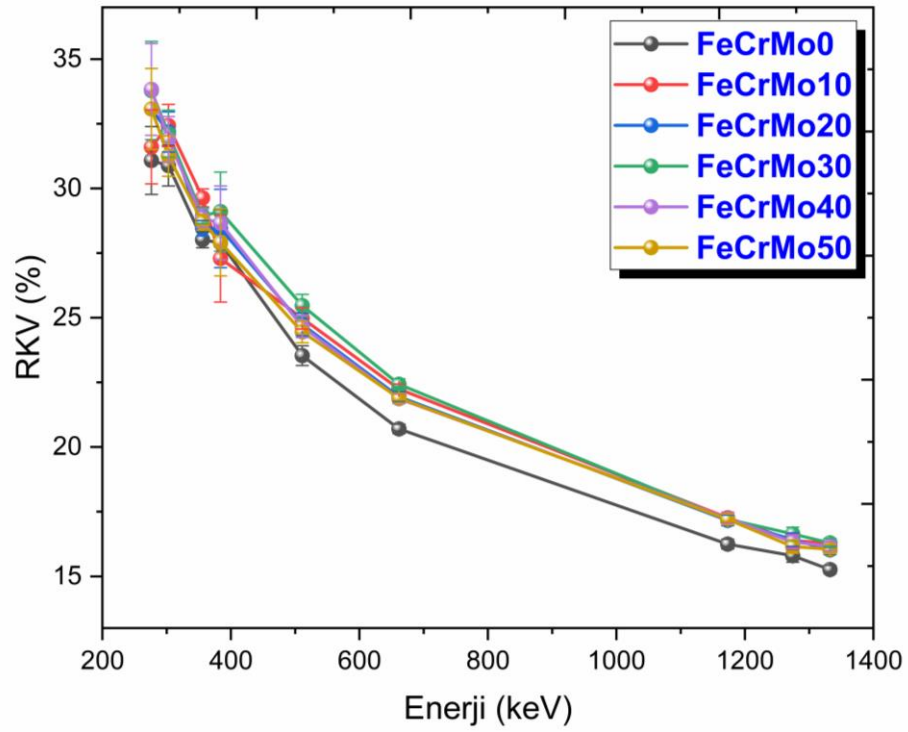
Enerji (keV)	FeCrMo0	FeCrMo10	FeCrMo20	FeCrMo30	FeCrMo40	FeCrMo50
276,4	68,92±2,91	68,40±3,10	66,93±3,18	66,22±3,72	66,17±3,47	66,93±3,18
302,9	69,12±1,76	67,57±1,70	67,82±1,64	67,89±1,91	68,11±1,89	68,75±1,71
356,0	71,99±0,79	70,37±0,82	71,55±0,75	71,05±0,76	71,15±0,89	71,31±0,75
383,9	72,11±3,31	72,71±4,49	71,55±3,80	70,90±3,72	71,34±3,56	72,09±3,34
511,0	76,46±1,24	75,02±1,26	75,26±1,34	74,53±1,26	75,35±1,30	75,55±1,31
661,7	79,30±0,71	77,76±0,67	78,05±0,68	77,58±0,74	78,13±0,67	78,11±0,66
1173,2	83,75±0,97	82,73±1,00	82,84±0,98	82,79±1,02	82,76±1,00	82,80±0,99
1274,5	84,21±1,33	83,62±1,32	83,58±1,31	83,36±1,30	83,67±1,36	83,85±1,33
1332,5	84,74±0,90	83,72±0,90	83,98±0,91	83,71±0,87	83,84±0,89	83,95±0,90



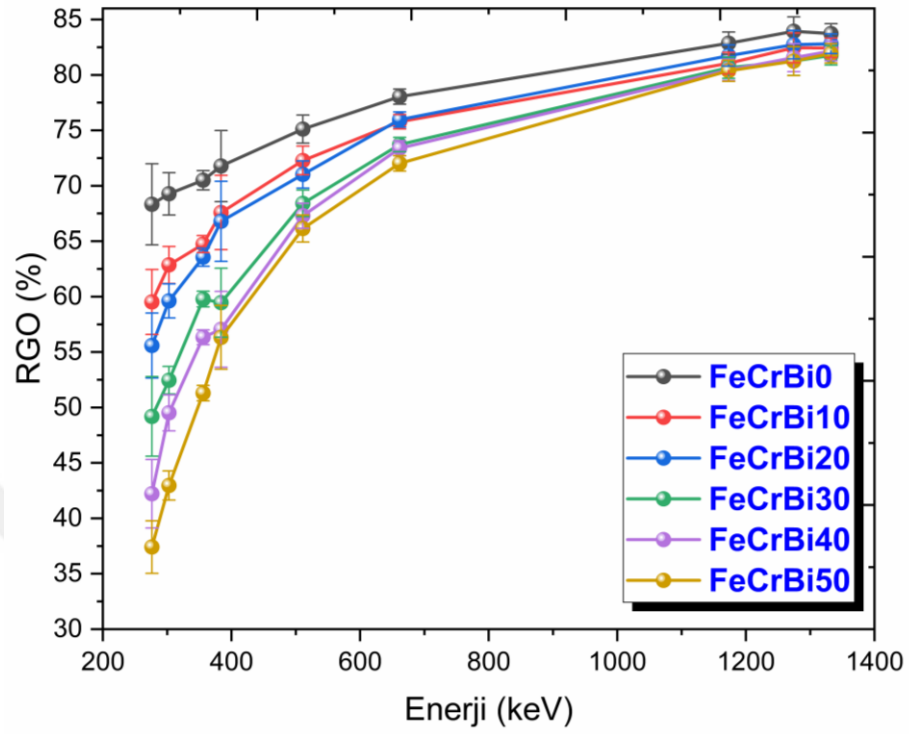
Şekil 5.1. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçlarının enerji ile değişimi



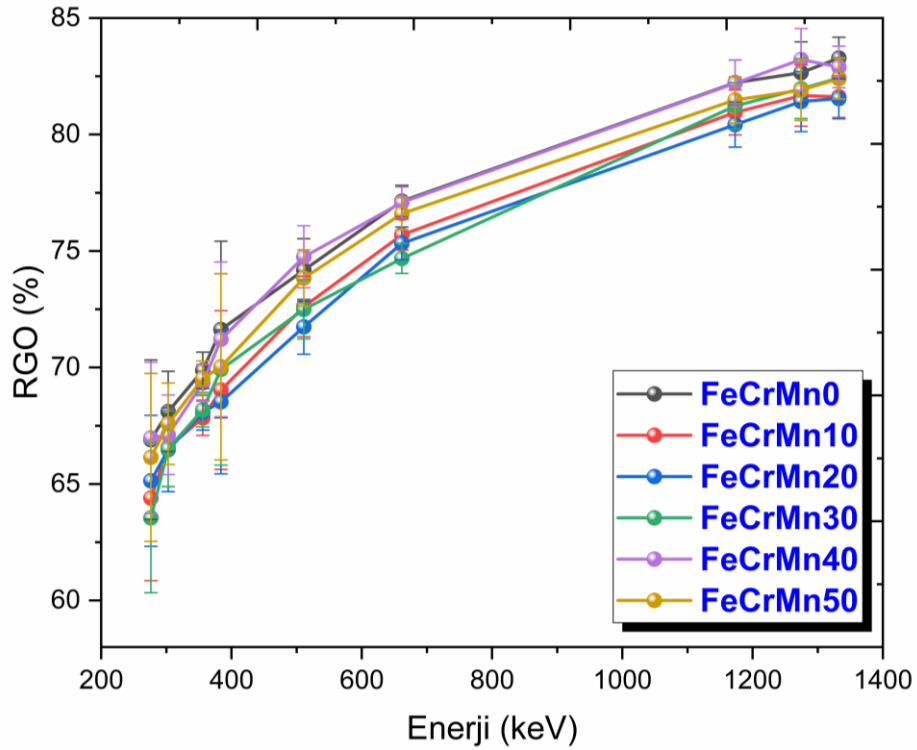
Şekil 5.2. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçlarının enerji ile değişimi



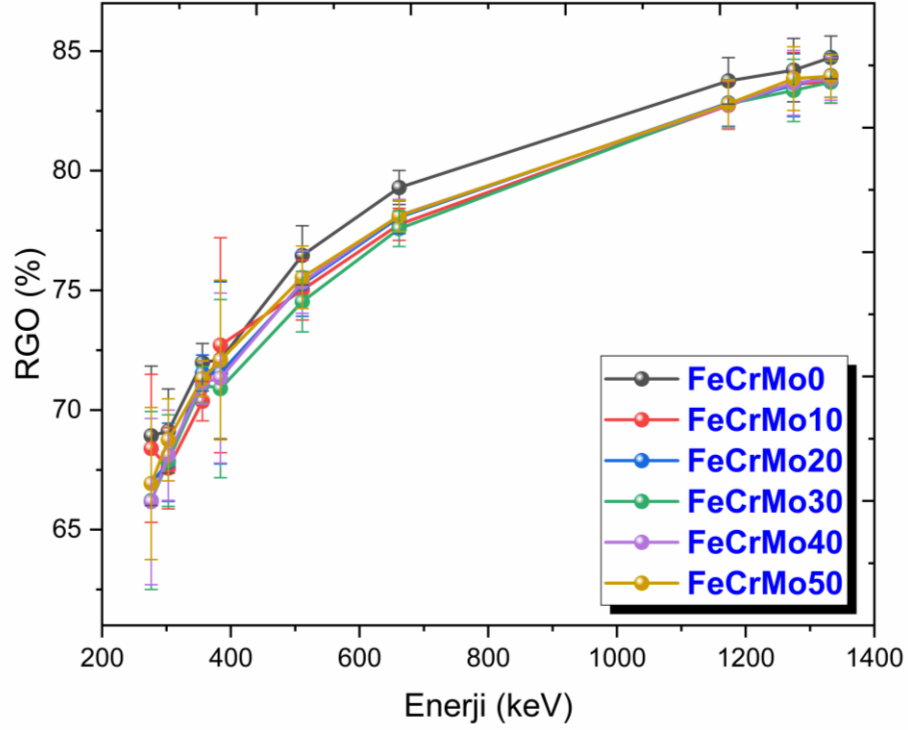
Şekil 5.3. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon koruma verimi sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.4. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirir oranı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.5. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.6. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait radyasyon geçirme oranı sonuçlarının enerji ile değişimi

5.2. Kütle Azaltma Katsayısı Araştırma Bulguları

Kütle azaltma katsayısı, malzemenin birim alandaki kütlesi ile gelen fotonun etkileşme ihtimaliyetini gösteren öncü bir parametredir. Bu parametre $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ birimine sahiptir. Kütle azaltma katsayısı malzemenin yoğunluğundan ve fiziksel halinden (katı-sıvı-gaz) bağımsız olduğu için iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama çalışmalarında genellikle ilk olarak belirlenen parametredir. Bu parametrenin yüksek değerleri malzemenin iyonlaştırıcı radyasyonu daha iyi azalttığını gösterir. Bağlayıcı olarak polyester reçinenin, dolgu malzemesi olarak da ferro-krom ve manganez (Mn), molibden disülfür (MoS_2) veya bizmut oksiklorür'ün (BiOCl) kullanıldığı üçlü kompozitlerde kütle azaltma katsayısı deneysel olarak denklem (4.3) ile ve teorik olarak denklem (4.4) ile belirlenmiştir. Teorik hesaplamalarda WinXCOM programı kullanılmıştır. Bu parametreye ait deneysel belirsizlikle ise denklem (4.16) ile elde edilmiştir. Bu parametre öncü bir parametre olduğu için daha sonraki parametrelerin belirsizlikleri kare ortalama karekök süreçleriyle belirsizliğin dağılımı ilkesine göre elde edilmiştir.

Deneysel ve teorik olarak belirlenen kütle azaltma katsayısı sonuçları üretilen üçlü kompozitler için Tablo 5.7-5.9'da ve foton enerjisine göre değişimleri görsel olarak görebilmek için Şekil 5.7-5.9'da sunulmuştur.

Tablo 5.7. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm²/g)

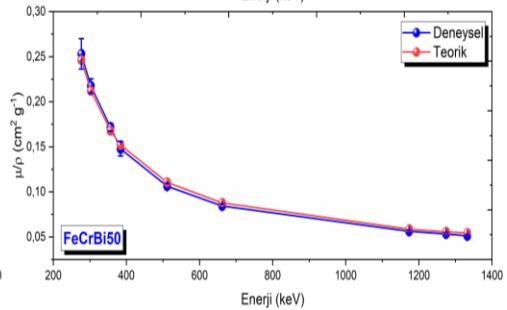
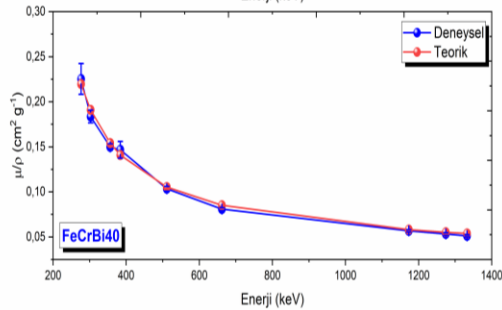
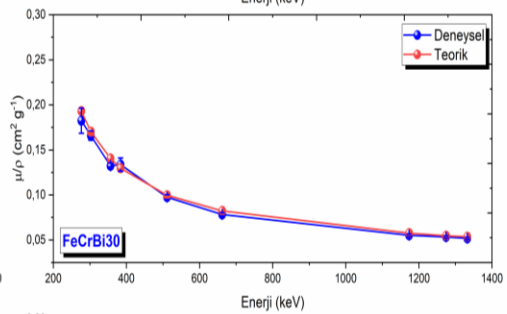
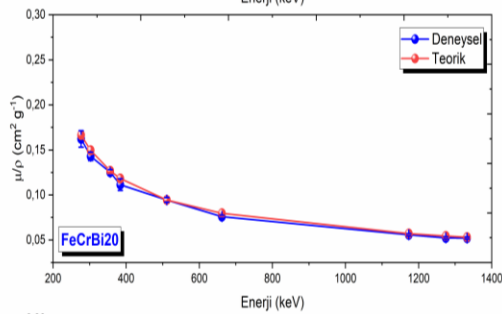
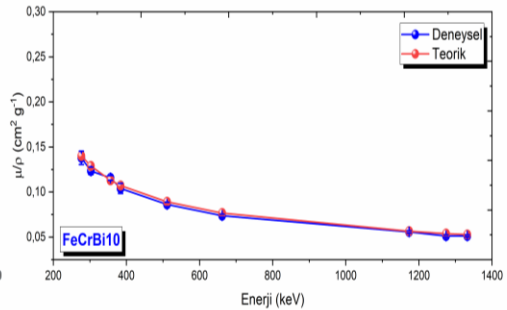
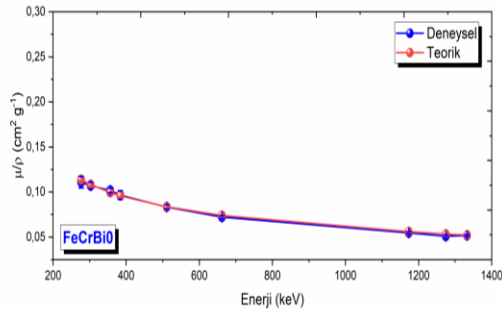
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1110±0,0064	0,1139	0,1380±0,0073	0,1402	0,1623±0,0091	0,1667
302,9	0,1070±0,0036	0,1082	0,1235±0,0041	0,1288	0,1429±0,0047	0,1496
356,0	0,1019±0,0024	0,0995	0,1156±0,0027	0,1132	0,1253±0,0030	0,1269
383,9	0,0967±0,0047	0,0959	0,1041±0,0056	0,1071	0,1116±0,0064	0,1184
511,0	0,0834±0,0022	0,0837	0,0863±0,0023	0,0891	0,0946±0,0025	0,0945
661,7	0,0723±0,0016	0,0740	0,0738±0,0016	0,0768	0,0759±0,0017	0,0796
1173,2	0,0548±0,0013	0,0559	0,0559±0,0013	0,0565	0,0557±0,0013	0,0571
1274,5	0,0510±0,0013	0,0534	0,0513±0,0013	0,0539	0,0524±0,0013	0,0543
1332,5	0,0518±0,0012	0,0524	0,0513±0,0012	0,0528	0,0521±0,0012	0,0532
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1824±0,0138	0,1932	0,2253±0,0171	0,2196	0,2532±0,0168	0,2462
302,9	0,1659±0,0051	0,1704	0,1836±0,0071	0,1911	0,2176±0,0080	0,2119
356,0	0,1323±0,0031	0,1406	0,1499±0,0035	0,1542	0,1719±0,0042	0,1679
383,9	0,1337±0,0075	0,1296	0,1467±0,0093	0,1408	0,1478±0,0081	0,1521
511,0	0,0976±0,0026	0,0999	0,1035±0,0027	0,1053	0,1064±0,0029	0,1107
661,7	0,0784±0,0017	0,0824	0,0809±0,0018	0,0851	0,0845±0,0019	0,0879
1173,2	0,0553±0,0013	0,0576	0,0568±0,0013	0,0582	0,0562±0,0013	0,0588
1274,5	0,0534±0,0014	0,0548	0,0532±0,0013	0,0552	0,0535±0,0014	0,0557
1332,5	0,0517±0,0012	0,0536	0,0514±0,0012	0,0540	0,0513±0,0012	0,0544

Tablo 5.8. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm²/g)

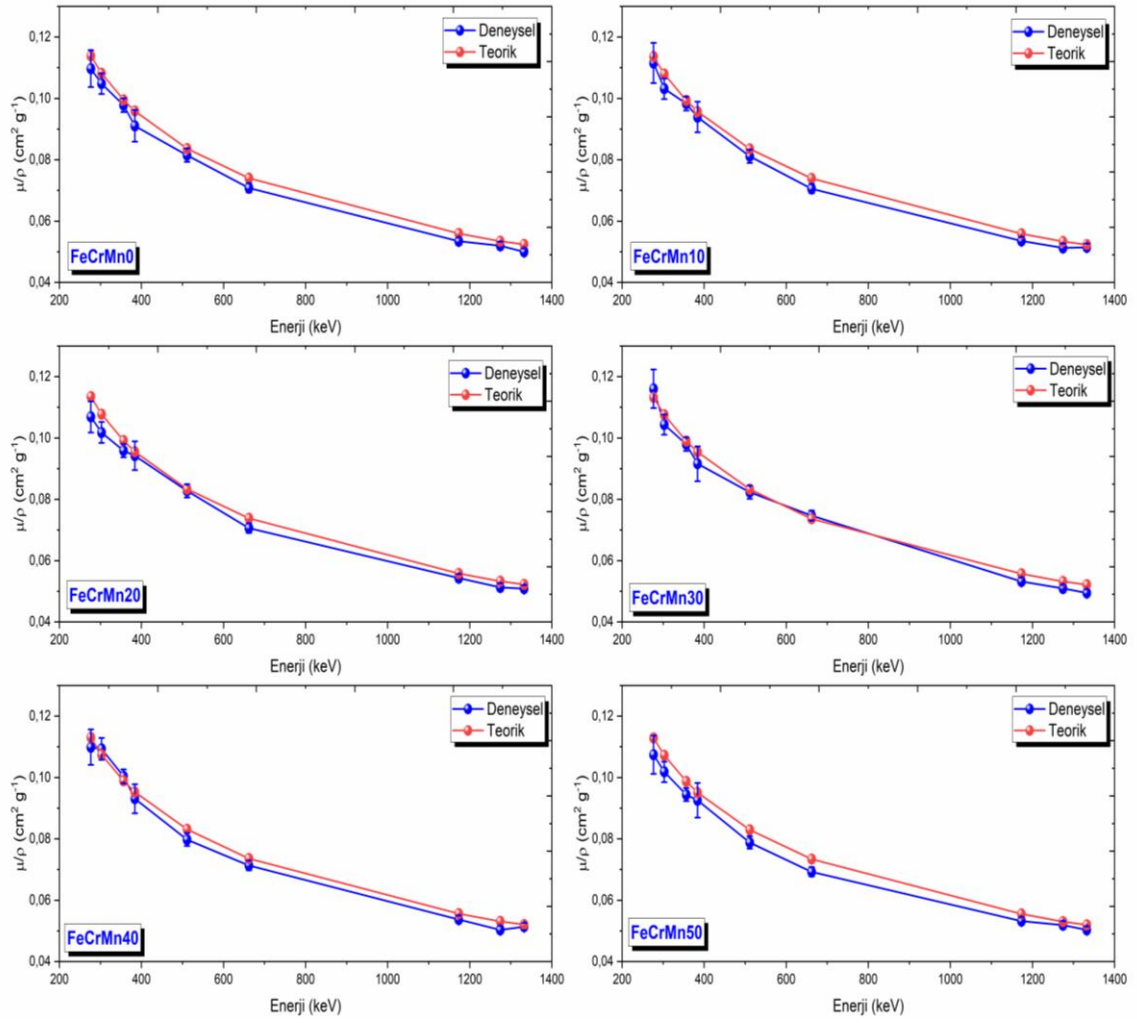
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1097±0,0060	0,1139	0,1116±0,0065	0,1137	0,1069±0,0051	0,1135
302,9	0,1048±0,0034	0,1082	0,1031±0,0033	0,1080	0,1018±0,0034	0,1078
356,0	0,0978±0,0022	0,0995	0,0983±0,0023	0,0994	0,0959±0,0022	0,0992
383,9	0,0911±0,0051	0,0959	0,0939±0,0050	0,0957	0,0942±0,0047	0,0956
511,0	0,0815±0,0022	0,0837	0,0811±0,0022	0,0835	0,0828±0,0021	0,0834
661,7	0,0708±0,0015	0,0740	0,0706±0,0015	0,0739	0,0706±0,0016	0,0738
1173,2	0,0534±0,0012	0,0559	0,0536±0,0012	0,0558	0,0543±0,0013	0,0558
1274,5	0,0520±0,0013	0,0534	0,0513±0,0013	0,0534	0,0513±0,0013	0,0533
1332,5	0,0499±0,0011	0,0524	0,0515±0,0012	0,0523	0,0509±0,0012	0,0522
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1161±0,0063	0,1133	0,1099±0,0058	0,1131	0,1074±0,0062	0,1129
302,9	0,1044±0,0033	0,1076	0,1093±0,0035	0,1075	0,1018±0,0033	0,1073
356,0	0,0980±0,0022	0,0991	0,1004±0,0023	0,0989	0,0945±0,0021	0,0987
383,9	0,0916±0,0057	0,0954	0,0931±0,0047	0,0953	0,0926±0,0056	0,0951
511,0	0,0823±0,0022	0,0833	0,0798±0,0021	0,0831	0,0788±0,0020	0,0830
661,7	0,0747±0,0016	0,0737	0,0713±0,0016	0,0736	0,0693±0,0015	0,0735
1173,2	0,0532±0,0013	0,0557	0,0537±0,0013	0,0556	0,0532±0,0012	0,0555
1274,5	0,0509±0,0013	0,0532	0,0504±0,0013	0,0531	0,0519±0,0013	0,0530
1332,5	0,0495±0,0011	0,0522	0,0514±0,0012	0,0521	0,0503±0,0011	0,0520

Tablo 5.9. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçları (cm^2/g)

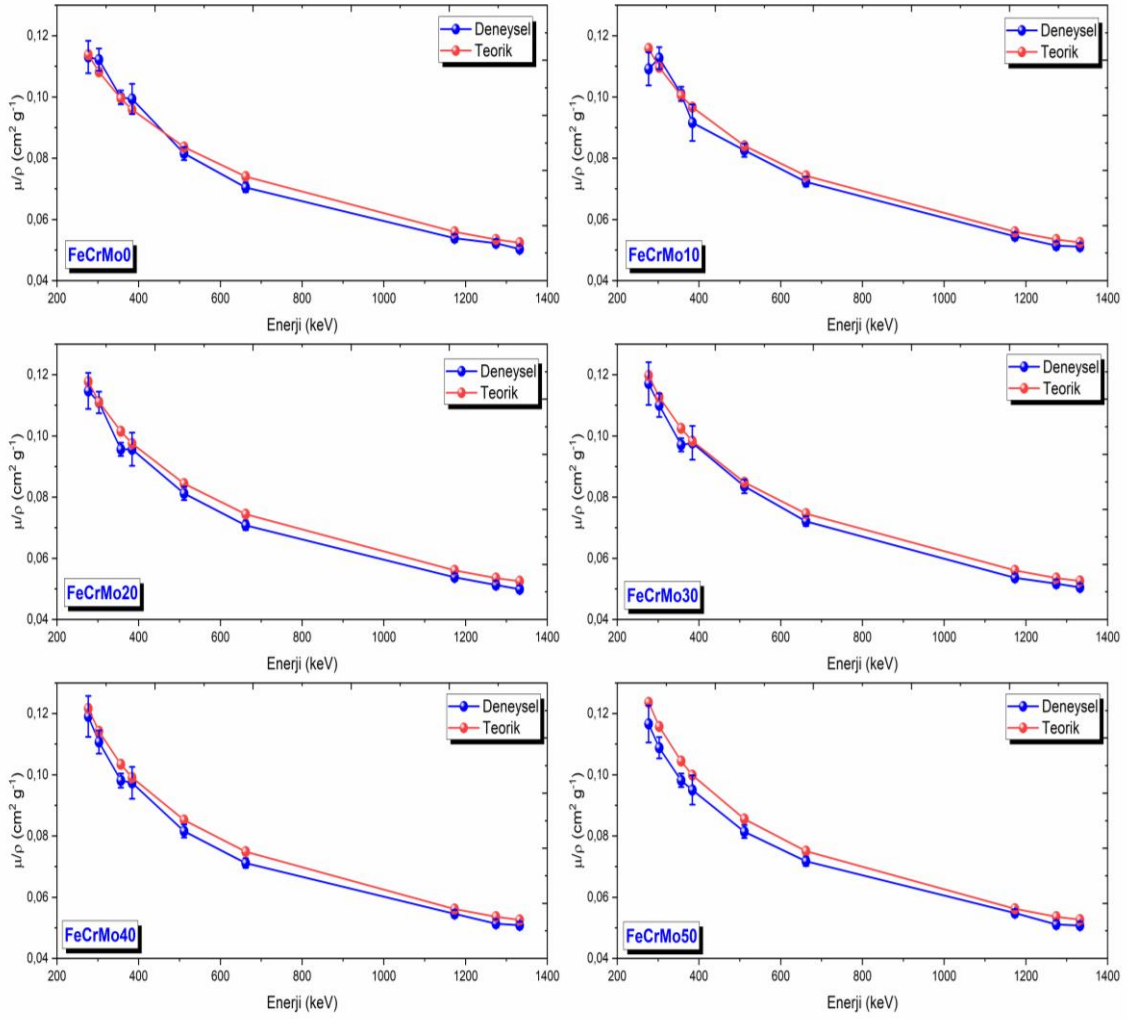
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1131±0,0053	0,1139	0,1092±0,0054	0,1158	0,1147±0,0059	0,1178
302,9	0,1122±0,0036	0,1082	0,1127±0,0036	0,1097	0,1110±0,0035	0,1112
356,0	0,0999±0,0023	0,0995	0,1010±0,0023	0,1005	0,0957±0,0022	0,1015
383,9	0,0994±0,0050	0,0959	0,0916±0,0060	0,0967	0,0956±0,0054	0,0975
511,0	0,0815±0,0021	0,0837	0,0826±0,0022	0,0841	0,0812±0,0022	0,0844
661,7	0,0705±0,0015	0,0740	0,0723±0,0016	0,0742	0,0708±0,0015	0,0744
1173,2	0,0539±0,0012	0,0559	0,0545±0,0013	0,0560	0,0538±0,0013	0,0560
1274,5	0,0522±0,0013	0,0534	0,0514±0,0013	0,0535	0,0513±0,0013	0,0535
1332,5	0,0503±0,0011	0,0524	0,0511±0,0012	0,0525	0,0499±0,0011	0,0525
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,1171±0,0070	0,1197	0,1190±0,0067	0,1217	0,1166±0,0060	0,1236
302,9	0,1101±0,0038	0,1127	0,1107±0,0038	0,1142	0,1088±0,0035	0,1157
356,0	0,0971±0,0022	0,1025	0,0981±0,0023	0,1035	0,0982±0,0022	0,1045
383,9	0,0977±0,0055	0,0983	0,0974±0,0052	0,0991	0,0950±0,0048	0,0999
511,0	0,0835±0,0022	0,0848	0,0816±0,0022	0,0852	0,0814±0,0022	0,0856
661,7	0,0722±0,0016	0,0747	0,0711±0,0015	0,0749	0,0717±0,0016	0,0751
1173,2	0,0537±0,0013	0,0561	0,0546±0,0013	0,0561	0,0548±0,0013	0,0562
1274,5	0,0517±0,0013	0,0536	0,0514±0,0013	0,0536	0,0511±0,0013	0,0537
1332,5	0,0505±0,0011	0,0525	0,0508±0,0012	0,0526	0,0508±0,0012	0,0526



Şekil 5.7. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.8. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.9. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait kütle azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi

5.3. Lineer Azaltma Katsayısı Araştırma Bulguları

Lineer azaltma katsayısı, gelen fotonun malzemenin birim kalınlığı ile etkileşime girme ihtimaliyetinin bir ölçüsüdür. Bu parametre cm^{-1} birimine sahiptir. Lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısının aksine malzemenin yoğunluğuna ve dolayısıyla fiziksel haline bağlıdır. Bu bağımlılıklardan dolayı malzemenin iyonlaştırıcı radyasyona karşı zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini gösteren bir parametredir. Direkt olarak Beer-Lambert Kanunu'ndan bulunacağı gibi kütle azaltma katsayısından da türetilir. Bu parametrenin yüksek değerleri malzemenin iyonlaştırıcı radyasyonu daha iyi azalttığını gösterir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin lineer azaltma katsayıları denklem (4.6) ile elde

edilmiştir. Güçlendirilmiş üçlü kompozitler için deneysel ve teorik olarak belirlenen lineer azaltma katsayısı sonuçları Tablo 5.10-5.12’de listelenmiştir. Bu sonuçların foton enerjisi ile değişimleri ise Şekil 5.10-5.12’de görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.10. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1})

Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,4679±0,0268	0,4799	0,5826±0,0310	0,5920	0,6864±0,0387	0,7052
302,9	0,4511±0,0153	0,4559	0,5213±0,0173	0,5440	0,6046±0,0197	0,6329
356,0	0,4294±0,0101	0,4196	0,4881±0,0114	0,4778	0,5299±0,0126	0,5366
383,9	0,4075±0,0199	0,4042	0,4397±0,0235	0,4522	0,4718±0,0272	0,5006
511,0	0,3516±0,0092	0,3527	0,3644±0,0098	0,3760	0,4001±0,0106	0,3996
661,7	0,3045±0,0066	0,3121	0,3114±0,0068	0,3243	0,3212±0,0071	0,3366
1173,2	0,2309±0,0054	0,2357	0,2359±0,0055	0,2385	0,2357±0,0055	0,2414
1274,5	0,2152±0,0054	0,2252	0,2167±0,0056	0,2275	0,2216±0,0056	0,2298
1332,5	0,2182±0,0050	0,2209	0,2168±0,0049	0,2230	0,2205±0,0050	0,2251
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,7728±0,0586	0,8187	0,9565±0,0726	0,9320	1,0762±0,0716	1,0464
302,9	0,7028±0,0218	0,7221	0,7795±0,0299	0,8111	0,9248±0,0339	0,9010
356,0	0,5606±0,0130	0,5955	0,6364±0,0148	0,6544	0,7308±0,0177	0,7138
383,9	0,5666±0,0318	0,5493	0,6225±0,0394	0,5978	0,6283±0,0344	0,6467
511,0	0,4135±0,0110	0,4232	0,4393±0,0115	0,4468	0,4524±0,0123	0,4706
661,7	0,3322±0,0073	0,3490	0,3432±0,0076	0,3614	0,3593±0,0080	0,3738
1173,2	0,2343±0,0054	0,2442	0,2411±0,0056	0,2471	0,2391±0,0056	0,2499
1274,5	0,2262±0,0058	0,2321	0,2260±0,0057	0,2344	0,2273±0,0058	0,2366
1332,5	0,2192±0,0050	0,2272	0,2180±0,0049	0,2293	0,2179±0,0050	0,2314

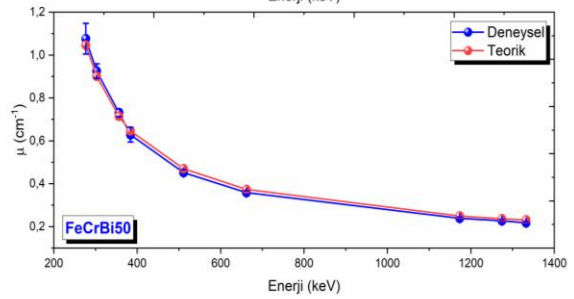
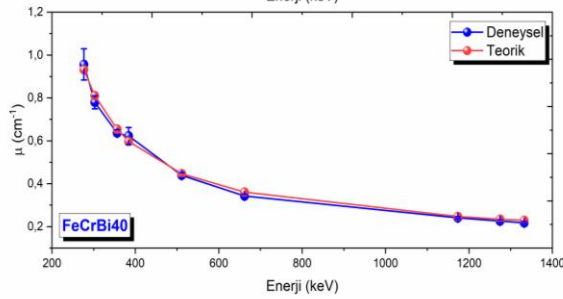
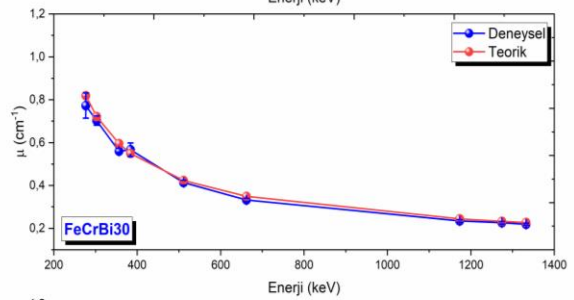
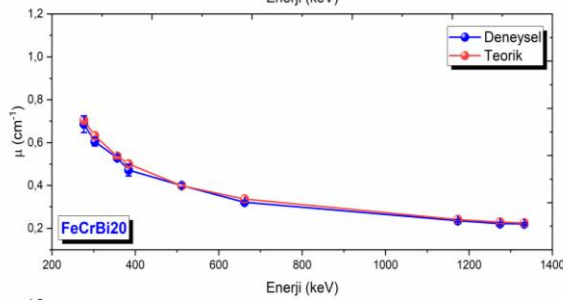
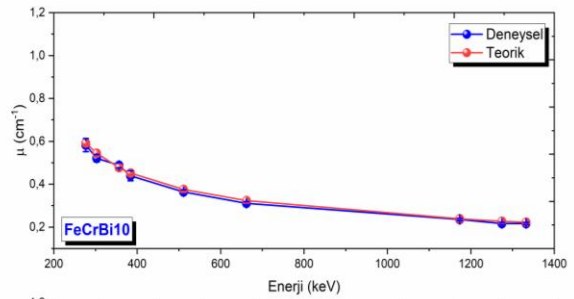
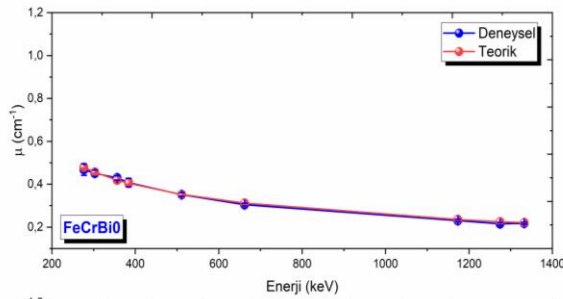
Tablo 5.11. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1})

Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,4625±0,0254	0,4799	0,4694±0,0275	0,4783	0,4490±0,0214	0,4768
302,9	0,4418±0,0142	0,4559	0,4340±0,0140	0,4544	0,4278±0,0144	0,4530
356,0	0,4123±0,0094	0,4196	0,4139±0,0095	0,4182	0,4029±0,0092	0,4169
383,9	0,3838±0,0217	0,4042	0,3953±0,0211	0,4029	0,3959±0,0195	0,4016
511,0	0,3436±0,0093	0,3527	0,3413±0,0092	0,3515	0,3478±0,0090	0,3504
661,7	0,2986±0,0065	0,3121	0,2970±0,0065	0,3111	0,2968±0,0066	0,3101
1173,2	0,2251±0,0052	0,2357	0,2254±0,0053	0,2350	0,2282±0,0053	0,2342
1274,5	0,2191±0,0056	0,2252	0,2160±0,0055	0,2245	0,2154±0,0055	0,2238
1332,5	0,2105±0,0048	0,2209	0,2166±0,0049	0,2202	0,2137±0,0048	0,2195
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	0,4868±0,0265	0,4752	0,4602±0,0241	0,4736	0,4491±0,0261	0,4720
302,9	0,4378±0,0138	0,4515	0,4579±0,0148	0,4500	0,4257±0,0139	0,4484
356,0	0,4111±0,0093	0,4155	0,4203±0,0097	0,4142	0,3948±0,0090	0,4127
383,9	0,3843±0,0239	0,4003	0,3898±0,0198	0,3990	0,3871±0,0234	0,3976
511,0	0,3454±0,0092	0,3493	0,3341±0,0090	0,3482	0,3295±0,0085	0,3470
661,7	0,3135±0,0068	0,3091	0,2988±0,0065	0,3081	0,2896±0,0063	0,3071
1173,2	0,2232±0,0052	0,2335	0,2250±0,0052	0,2328	0,2224±0,0052	0,2320
1274,5	0,2135±0,0054	0,2231	0,2109±0,0054	0,2224	0,2169±0,0056	0,2216
1332,5	0,2076±0,0047	0,2188	0,2153±0,0049	0,2181	0,2104±0,0048	0,2174

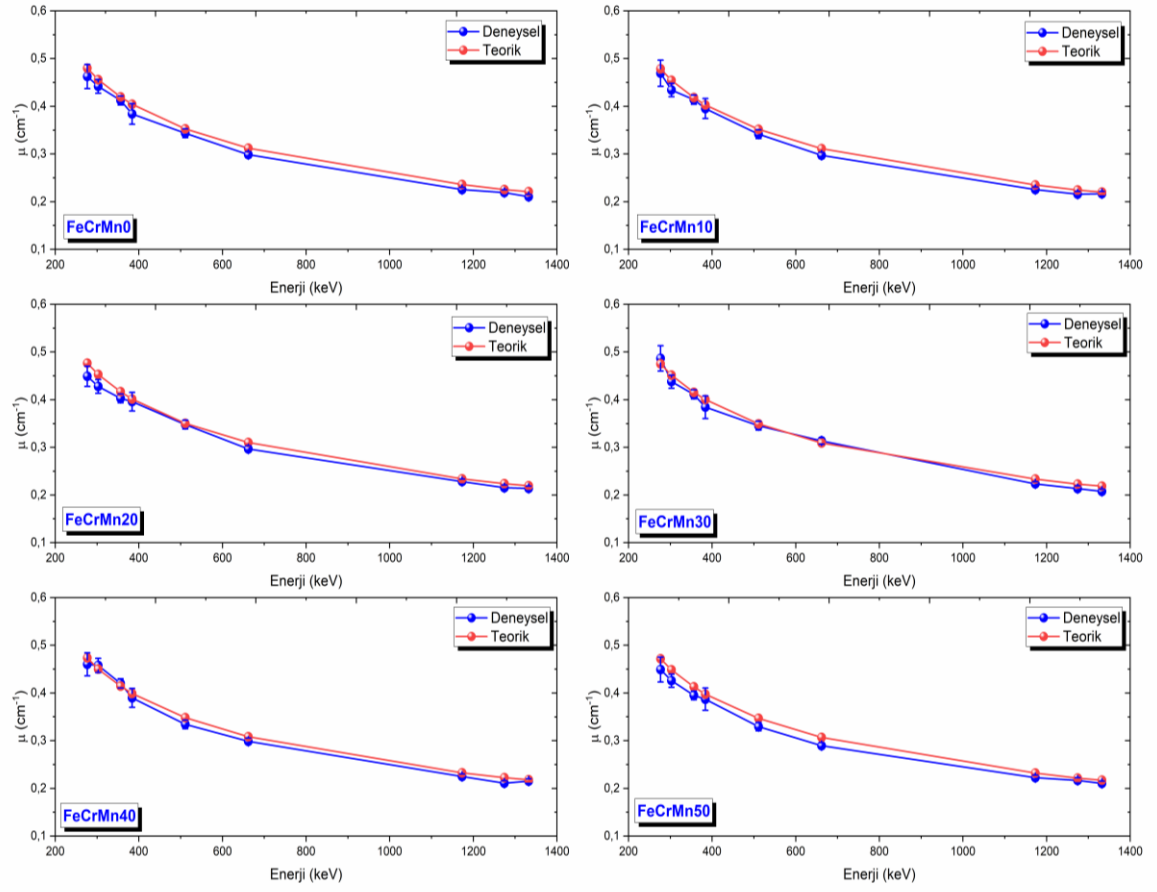
Tablo 5.12. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçları (cm^{-1})

Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	0,4767 $\pm$ 0,0223	0,4799	0,4498 $\pm$ 0,0223	0,4770	0,4619 $\pm$ 0,0238	0,4742
302,9	0,4730 $\pm$ 0,0153	0,4559	0,4642 $\pm$ 0,0149	0,4518	0,4468 $\pm$ 0,0140	0,4478
356,0	0,4210 $\pm$ 0,0096	0,4196	0,4162 $\pm$ 0,0096	0,4140	0,3852 $\pm$ 0,0087	0,4087
383,9	0,4188 $\pm$ 0,0210	0,4042	0,3774 $\pm$ 0,0245	0,3983	0,3851 $\pm$ 0,0219	0,3926
511,0	0,3437 $\pm$ 0,0088	0,3527	0,3403 $\pm$ 0,0089	0,3462	0,3269 $\pm$ 0,0088	0,3400
661,7	0,2970 $\pm$ 0,0065	0,3121	0,2979 $\pm$ 0,0065	0,3058	0,2850 $\pm$ 0,0062	0,2998
1173,2	0,2270 $\pm$ 0,0053	0,2357	0,2244 $\pm$ 0,0052	0,2306	0,2166 $\pm$ 0,0050	0,2256
1274,5	0,2202 $\pm$ 0,0056	0,2252	0,2118 $\pm$ 0,0054	0,2203	0,2064 $\pm$ 0,0052	0,2155
1332,5	0,2121 $\pm$ 0,0048	0,2209	0,2105 $\pm$ 0,0048	0,2161	0,2009 $\pm$ 0,0046	0,2114

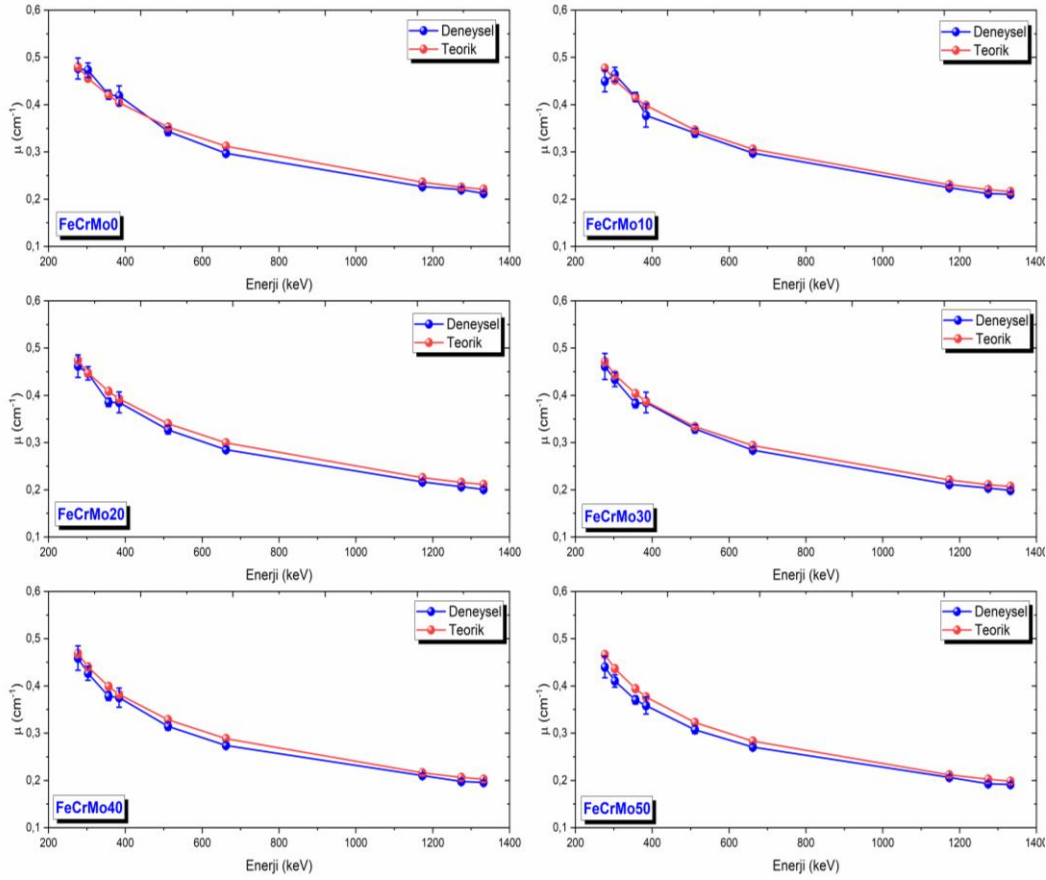
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	0,4613 $\pm$ 0,0275	0,4715	0,4588 $\pm$ 0,0258	0,4690	0,4399 $\pm$ 0,0226	0,4664
302,9	0,4335 $\pm$ 0,0150	0,4439	0,4268 $\pm$ 0,0146	0,4403	0,4104 $\pm$ 0,0131	0,4367
356,0	0,3825 $\pm$ 0,0087	0,4037	0,3782 $\pm$ 0,0089	0,3989	0,3704 $\pm$ 0,0084	0,3941
383,9	0,3850 $\pm$ 0,0216	0,3872	0,3753 $\pm$ 0,0202	0,3820	0,3585 $\pm$ 0,0181	0,3770
511,0	0,3290 $\pm$ 0,0086	0,3341	0,3146 $\pm$ 0,0083	0,3284	0,3072 $\pm$ 0,0081	0,3229
661,7	0,2842 $\pm$ 0,0063	0,2940	0,2742 $\pm$ 0,0060	0,2885	0,2706 $\pm$ 0,0059	0,2832
1173,2	0,2113 $\pm$ 0,0050	0,2209	0,2103 $\pm$ 0,0049	0,2164	0,2068 $\pm$ 0,0048	0,2120
1274,5	0,2037 $\pm$ 0,0052	0,2110	0,1981 $\pm$ 0,0051	0,2067	0,1930 $\pm$ 0,0049	0,2025
1332,5	0,1990 $\pm$ 0,0045	0,2069	0,1959 $\pm$ 0,0044	0,2027	0,1917 $\pm$ 0,0043	0,1986



Şekil 5.10. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.11. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.12. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait lineer azaltma katsayısı sonuçlarının enerji ile değişimi

5.4. Yarı Kalınlık Değeri, Onda-bir Kalınlık Değeri ve Ortalama Serbest Yol Araştırma Bulguları

Yarı kalınlık değeri, radyasyon kaynağından çıkan ilk radyasyon şiddetinin yarısını soğurmak için gerekli olan soğurucu madde kalınlığıdır. Onda-bir kalınlık değeri radyasyon kaynağından çıkan ilk radyasyon şiddetinin ona-birini geçiren soğurucu madde kalınlığı iken ortalama serbest yol ise ilk radyasyon şiddetinin %36,8'sini geçiren soğurucu madde kalınlığı olarak tanımlanır. Bu üç parametrenin birimi cm'dir. Bu iyonlaştırıcı radyasyon zırlama parametreleri lineer azaltma katsayısı ile direkt ilişkilidir ve aralarında ters orantı vardır. Bu parametrelerin küçük değerleri soğurucunun iyonlaştırıcı radyasyonu daha iyi azalttığını gösterir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin yarı ve onda-bir kalınlık değerleri ve ortalama serbest yol sonuçları sırasıyla denklem (4.7), (4.8) ve (4.9) ile elde edilmiştir. Güçlendirilmiş üçlü kompozitler için deneysel ve teorik olarak belirlenen yarı kalınlık değerleri, onda-bir kalınlık değerleri ve ortalama serbest yol sonuçları sırasıyla Tablo 5.13-

5.15, Tablo 5.16-5.18 ve Tablo 5.19-5.21’de listelenmiştir. Bu sonuçların foton enerjisi ile değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.13-5.15, Şekil 5.16-5.18 ve Şekil 5.19-5.21’de görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.13. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)

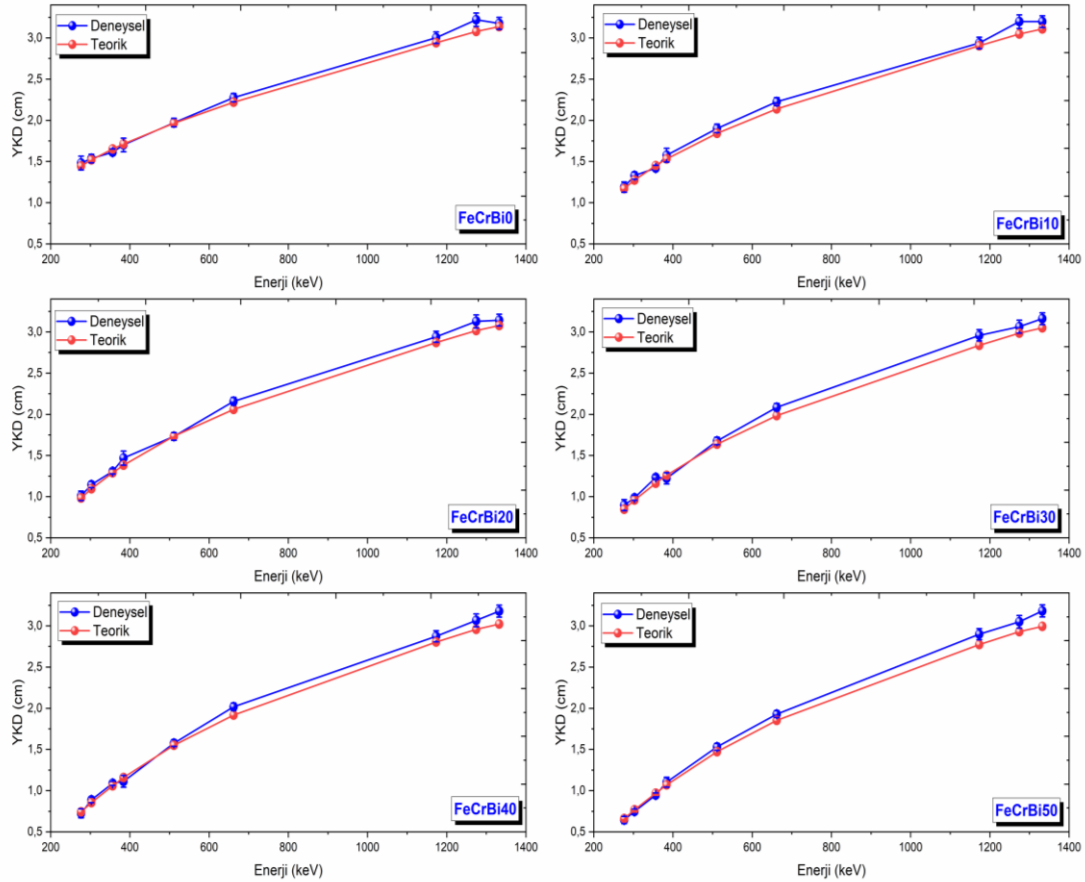
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,4815±0,0848	1,4443	1,1897±0,0633	1,1708	1,0098±0,0569	0,9830
302,9	1,5366±0,0522	1,5203	1,3297±0,0441	1,2742	1,1465±0,0374	1,0952
356,0	1,6141±0,0379	1,6521	1,4201±0,0330	1,4507	1,3082±0,0311	1,2918
383,9	1,7011±0,0832	1,7150	1,5763±0,0841	1,5329	1,4691±0,0848	1,3845
511,0	1,9712±0,0515	1,9655	1,9021±0,0510	1,8434	1,7325±0,0459	1,7347
661,7	2,2760±0,0497	2,2212	2,2260±0,0484	2,1374	2,1578±0,0474	2,0591
1173,2	3,0020±0,0704	2,9404	2,9387±0,0687	2,9057	2,9413±0,0681	2,8716
1274,5	3,2216±0,0815	3,0776	3,1986±0,0825	3,0469	3,1278±0,0792	3,0165
1332,5	3,1765±0,0721	3,1378	3,1975±0,0724	3,1084	3,1436±0,0713	3,0792
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	0,8969±0,0680	0,8467	0,7247±0,0550	0,7437	0,6440±0,0428	0,6624
302,9	0,9862±0,0306	0,9599	0,8893±0,0342	0,8546	0,7495±0,0274	0,7693
356,0	1,2365±0,0287	1,1639	1,0892±0,0253	1,0592	0,9485±0,0230	0,9711
383,9	1,2234±0,0686	1,2620	1,1135±0,0705	1,1595	1,1032±0,0605	1,0717
511,0	1,6762±0,0445	1,6378	1,5779±0,0412	1,5513	1,5320±0,0416	1,4729
661,7	2,0865±0,0456	1,9860	2,0196±0,0446	1,9181	1,9294±0,0429	1,8544
1173,2	2,9588±0,0687	2,8381	2,8748±0,0669	2,8054	2,8994±0,0673	2,7738
1274,5	3,0647±0,0784	2,9867	3,0670±0,0777	2,9575	3,0492±0,0780	2,9291
1332,5	3,1617±0,0717	3,0504	3,1797±0,0720	3,0222	3,1813±0,0723	2,9949

Tablo 5.14. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)

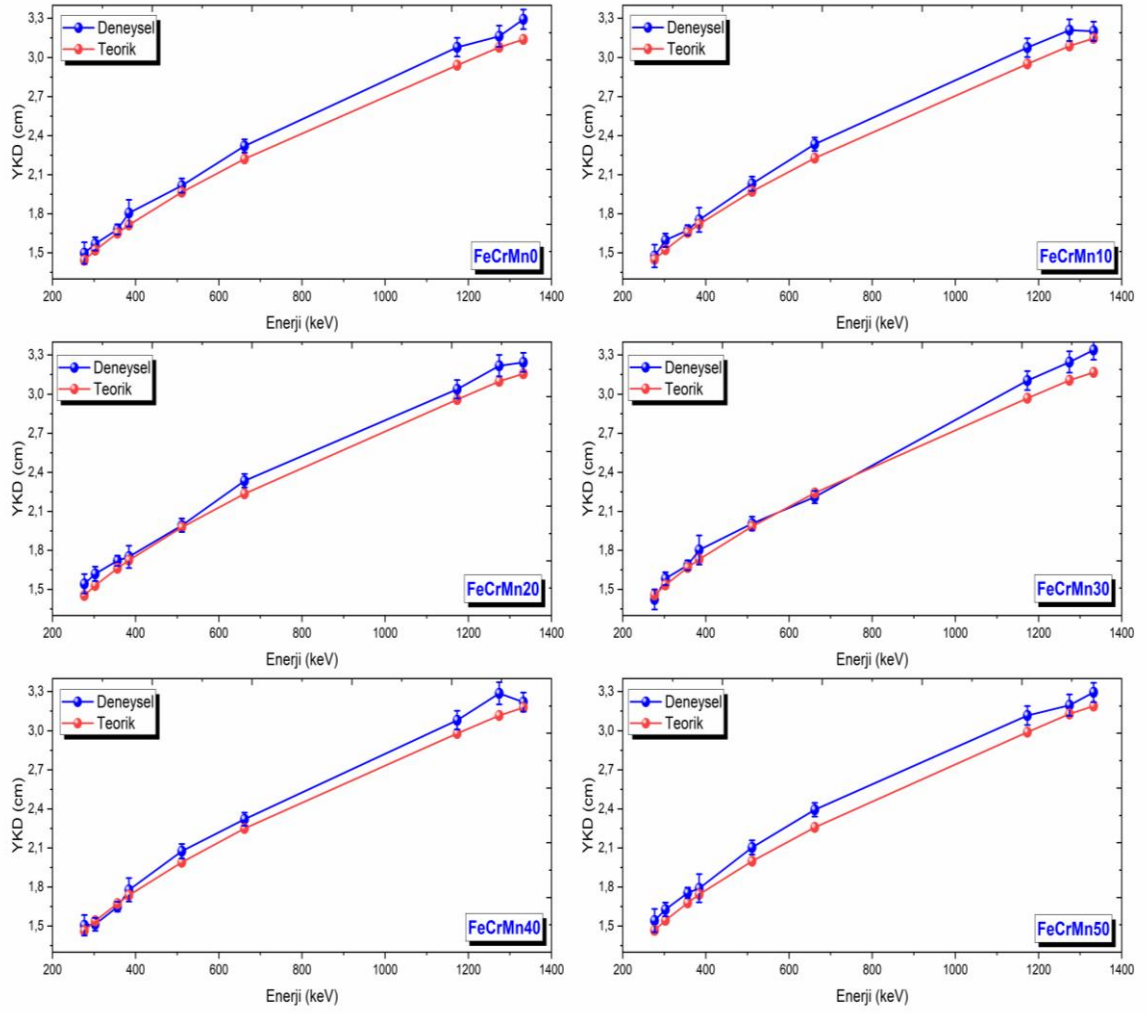
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,4987±0,0823	1,4443	1,4766±0,0866	1,4491	1,5436±0,0735	1,4538
302,9	1,5688±0,0506	1,5203	1,5970±0,0514	1,5253	1,6203±0,0546	1,5303
356,0	1,6811±0,0385	1,6521	1,6749±0,0383	1,6574	1,7203±0,0394	1,6628
383,9	1,8058±0,1021	1,7150	1,7536±0,0935	1,7205	1,7507±0,0864	1,7261
511,0	2,0173±0,0545	1,9655	2,0307±0,0545	1,9718	1,9930±0,0515	1,9781
661,7	2,3214±0,0507	2,2212	2,3339±0,0509	2,2282	2,3353±0,0516	2,2354
1173,2	3,0788±0,0715	2,9404	3,0750±0,0716	2,9497	3,0372±0,0707	2,9590
1274,5	3,1634±0,0808	3,0776	3,2096±0,0824	3,0874	3,2183±0,0821	3,0973
1332,5	3,2927±0,0748	3,1378	3,2006±0,0729	3,1478	3,2441±0,0736	3,1579
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,4238±0,0774	1,4587	1,5063±0,0790	1,4635	1,5433±0,0895	1,4686
302,9	1,5831±0,0500	1,5353	1,5139±0,0490	1,5403	1,6281±0,0532	1,5457
356,0	1,6859±0,0383	1,6682	1,6490±0,0380	1,6736	1,7555±0,0398	1,6794
383,9	1,8038±0,1120	1,7317	1,7780±0,0902	1,7373	1,7907±0,1083	1,7433
511,0	2,0067±0,0533	1,9845	2,0746±0,0556	1,9909	2,1033±0,0545	1,9977
661,7	2,2107±0,0481	2,2425	2,3201±0,0506	2,2496	2,3936±0,0524	2,2573
1173,2	3,1050±0,0729	2,9684	3,0806±0,0718	2,9778	3,1162±0,0730	2,9880
1274,5	3,2468±0,0826	3,1072	3,2865±0,0842	3,1171	3,1962±0,0818	3,1278
1332,5	3,3394±0,0758	3,1681	3,2193±0,0731	3,1782	3,2939±0,0745	3,1891

Tablo 5.15. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçları (cm)

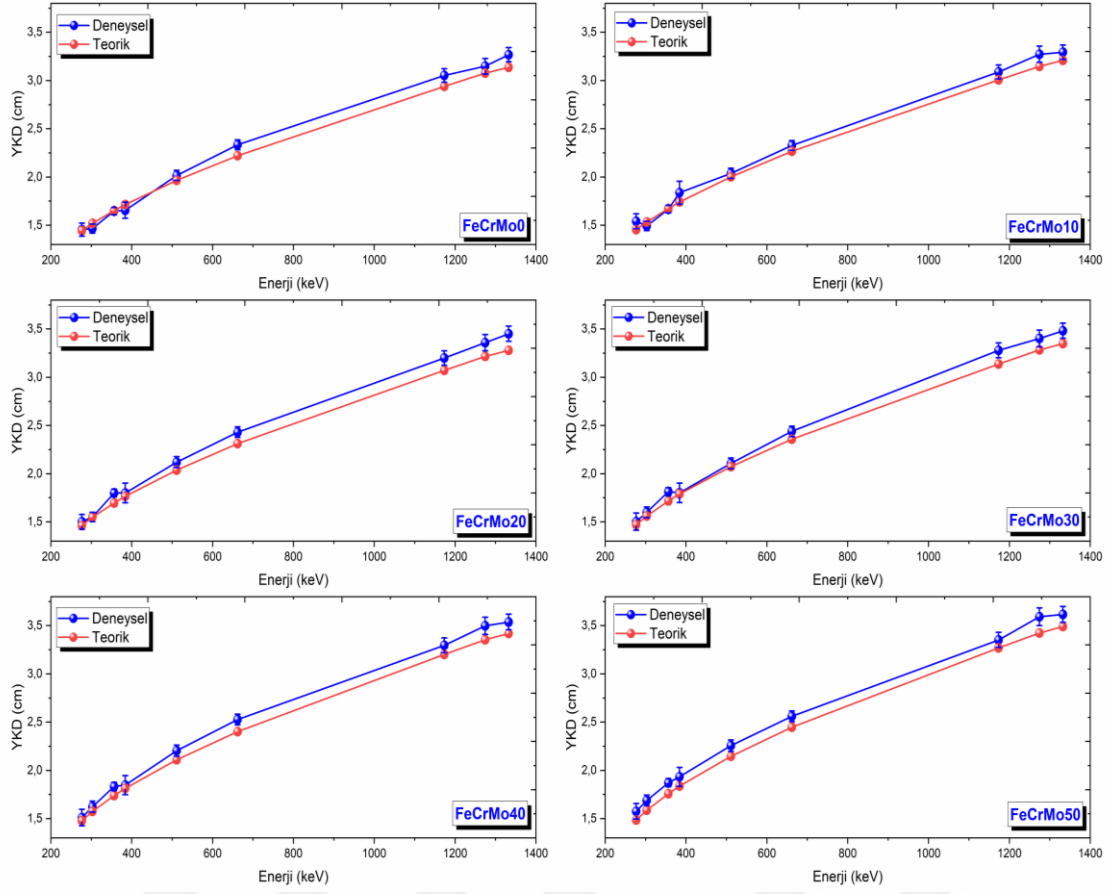
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	1,4542±0,0680	1,4443	1,5411±0,0763	1,4531	1,5006±0,0773	1,4617
302,9	1,4656±0,0475	1,5203	1,4932±0,0479	1,5343	1,5515±0,0486	1,5481
356,0	1,6466±0,0376	1,6521	1,6656±0,0386	1,6741	1,7994±0,0407	1,6958
383,9	1,6550±0,0829	1,7150	1,8369±0,1193	1,7404	1,7998±0,1022	1,7655
511,0	2,0169±0,0519	1,9655	2,0367±0,0531	2,0021	2,1201±0,0568	2,0386
661,7	2,3335±0,0511	2,2212	2,3270±0,0507	2,2667	2,4318±0,0531	2,3123
1173,2	3,0530±0,0706	2,9404	3,0883±0,0722	3,0060	3,1997±0,0744	3,0718
1274,5	3,1483±0,0801	3,0776	3,2725±0,0833	3,1466	3,3587±0,0854	3,2158
1332,5	3,2677±0,0739	3,1378	3,2936±0,0747	3,2083	3,4510±0,0785	3,2790
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	1,5025±0,0896	1,4700	1,5107±0,0849	1,4780	1,5757±0,0811	1,4861
302,9	1,5990±0,0553	1,5614	1,6242±0,0555	1,5743	1,6888±0,0540	1,5873
356,0	1,8123±0,0411	1,7171	1,8326±0,0433	1,7378	1,8716±0,0423	1,7587
383,9	1,8006±0,1012	1,7902	1,8468±0,0992	1,8144	1,9334±0,0975	1,8387
511,0	2,1068±0,0552	2,0747	2,2034±0,0582	2,1104	2,2564±0,0596	2,1464
661,7	2,4392±0,0541	2,3576	2,5277±0,0550	2,4024	2,5615±0,0556	2,4478
1173,2	3,2798±0,0771	3,1376	3,2961±0,0771	3,2028	3,3520±0,0782	3,2691
1274,5	3,4029±0,0863	3,2850	3,4988±0,0902	3,3536	3,5923±0,0918	3,4233
1332,5	3,4824±0,0786	3,3496	3,5382±0,0801	3,4196	3,6167±0,0820	3,4908



Şekil 5.13. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.14. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.15. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait yarı kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.16. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)

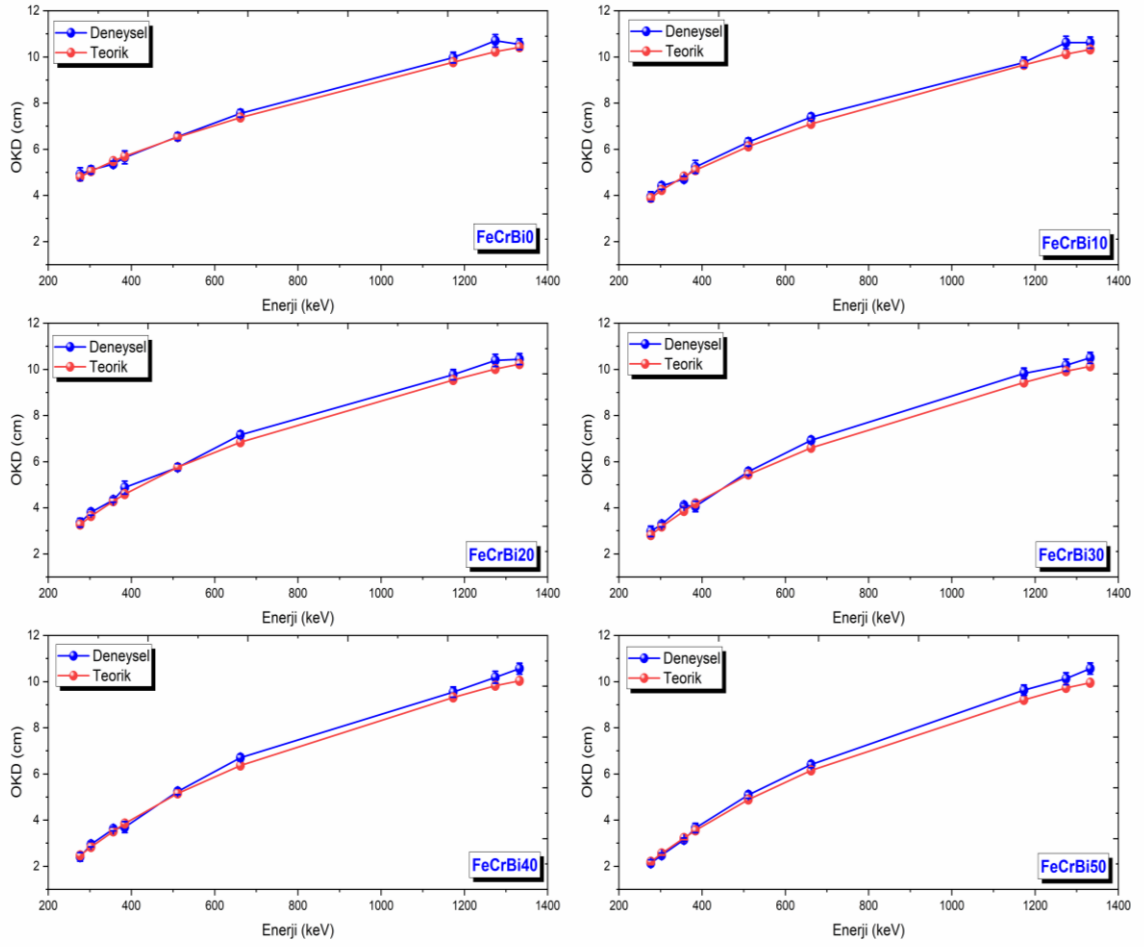
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	4,9213±0,2816	4,7979	3,9521±0,2101	3,8893	3,3545±0,1890	3,2654
302,9	5,1044±0,1736	5,0504	4,4172±0,1466	4,2327	3,8087±0,1243	3,6382
356,0	5,3620±0,1260	5,4881	4,7173±0,1097	4,8192	4,3456±0,1033	4,2914
383,9	5,6511±0,2764	5,6971	5,2364±0,2795	5,0922	4,8801±0,2816	4,5993
511,0	6,5482±0,1712	6,5291	6,3186±0,1695	6,1237	5,7553±0,1525	5,7625
661,7	7,5607±0,1650	7,3786	7,3946±0,1609	7,1004	7,1682±0,1574	6,8401
1173,2	9,9723±0,2338	9,7677	9,7623±0,2282	9,6525	9,7709±0,2263	9,5391
1274,5	10,7018±0,2708	10,2234	10,6256±0,2740	10,1215	10,3904±0,2630	10,0207
1332,5	10,5520±0,2394	10,4237	10,6219±0,2406	10,3257	10,4428±0,2369	10,2287
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	2,9794±0,2258	2,8126	2,4074±0,1826	2,4707	2,1395±0,1423	2,2005
302,9	3,2761±0,1017	3,1888	2,9541±0,1135	2,8389	2,4898±0,0912	2,5557
356,0	4,1077±0,0953	3,8664	3,6184±0,0840	3,5187	3,1508±0,0763	3,2259
383,9	4,0641±0,2279	4,1922	3,6988±0,2342	3,8519	3,6648±0,2009	3,5603
511,0	5,5683±0,1477	5,4405	5,2416±0,1369	5,1532	5,0893±0,1382	4,8928
661,7	6,9311±0,1515	6,5974	6,7089±0,1480	6,3718	6,4093±0,1426	6,1600
1173,2	9,8290±0,2284	9,4279	9,5498±0,2224	9,3195	9,6315±0,2237	9,2143
1274,5	10,1808±0,2604	9,9215	10,1883±0,2583	9,8245	10,1292±0,2591	9,7303
1332,5	10,5028±0,2381	10,1332	10,5627±0,2392	10,0397	10,5680±0,2403	9,9489

Tablo 5.17. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)

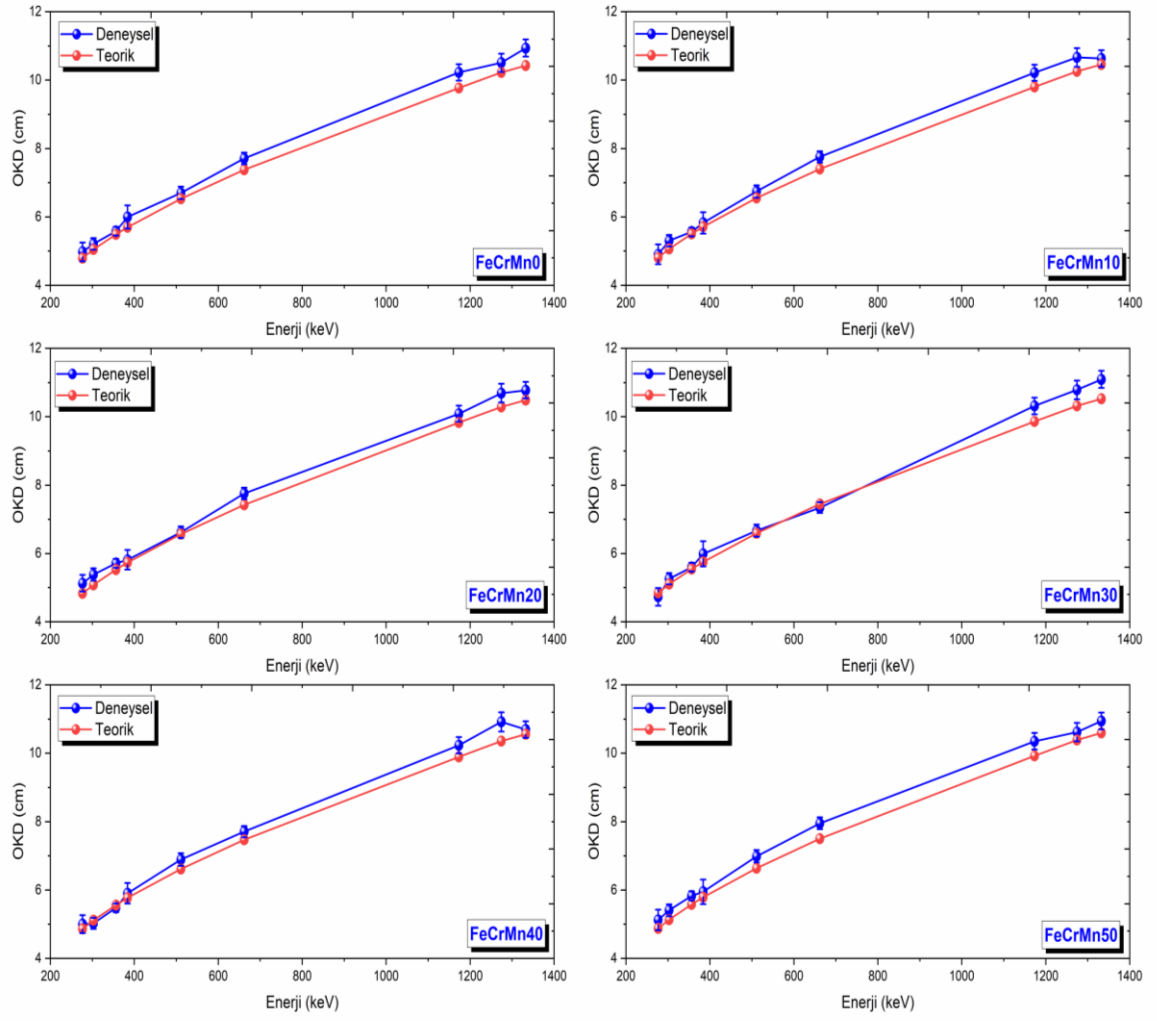
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	4,9787±0,2735	4,7979	4,9052±0,2875	4,8136	5,1277±0,2440	4,8296
302,9	5,2113±0,1680	5,0504	5,3053±0,1706	5,0669	5,3827±0,1813	5,0835
356,0	5,5844±0,1280	5,4881	5,5638±0,1273	5,5058	5,7148±0,1308	5,5237
383,9	5,9989±0,3392	5,6971	5,8254±0,3104	5,7155	5,8156±0,2871	5,7340
511,0	6,7013±0,1810	6,5291	6,7458±0,1810	6,5501	6,6206±0,1712	6,5712
661,7	7,7115±0,1685	7,3786	7,7532±0,1692	7,4020	7,7578±0,1714	7,4257
1173,2	10,2275±0,2376	9,7677	10,2149±0,2379	9,7986	10,0895±0,2349	9,8297
1274,5	10,5085±0,2686	10,2234	10,6621±0,2736	10,2560	10,6909±0,2726	10,2889
1332,5	10,9380±0,2484	10,4237	10,6321±0,2423	10,4569	10,7767±0,2446	10,4905
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	4,7299±0,2572	4,8456	5,0037±0,2626	4,8615	5,1266±0,2974	4,8787
302,9	5,2589±0,1661	5,1002	5,0289±0,1627	5,1168	5,4084±0,1767	5,1348
356,0	5,6004±0,1273	5,5417	5,4779±0,1261	5,5596	5,8317±0,1323	5,5789
383,9	5,9922±0,3721	5,7526	5,9064±0,2996	5,7712	5,9486±0,3599	5,7911
511,0	6,6660±0,1771	6,5924	6,8917±0,1847	6,6135	6,9871±0,1809	6,6363
661,7	7,3439±0,1598	7,4494	7,7071±0,1679	7,4731	7,9512±0,1742	7,4987
1173,2	10,3146±0,2423	9,8610	10,2337±0,2386	9,8922	10,3517±0,2424	9,9258
1274,5	10,7855±0,2742	10,3219	10,9175±0,2797	10,3548	10,6175±0,2719	10,3902
1332,5	11,0932±0,2518	10,5241	10,6944±0,2430	10,5577	10,9421±0,2474	10,5939

Tablo 5.18. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçları (cm)

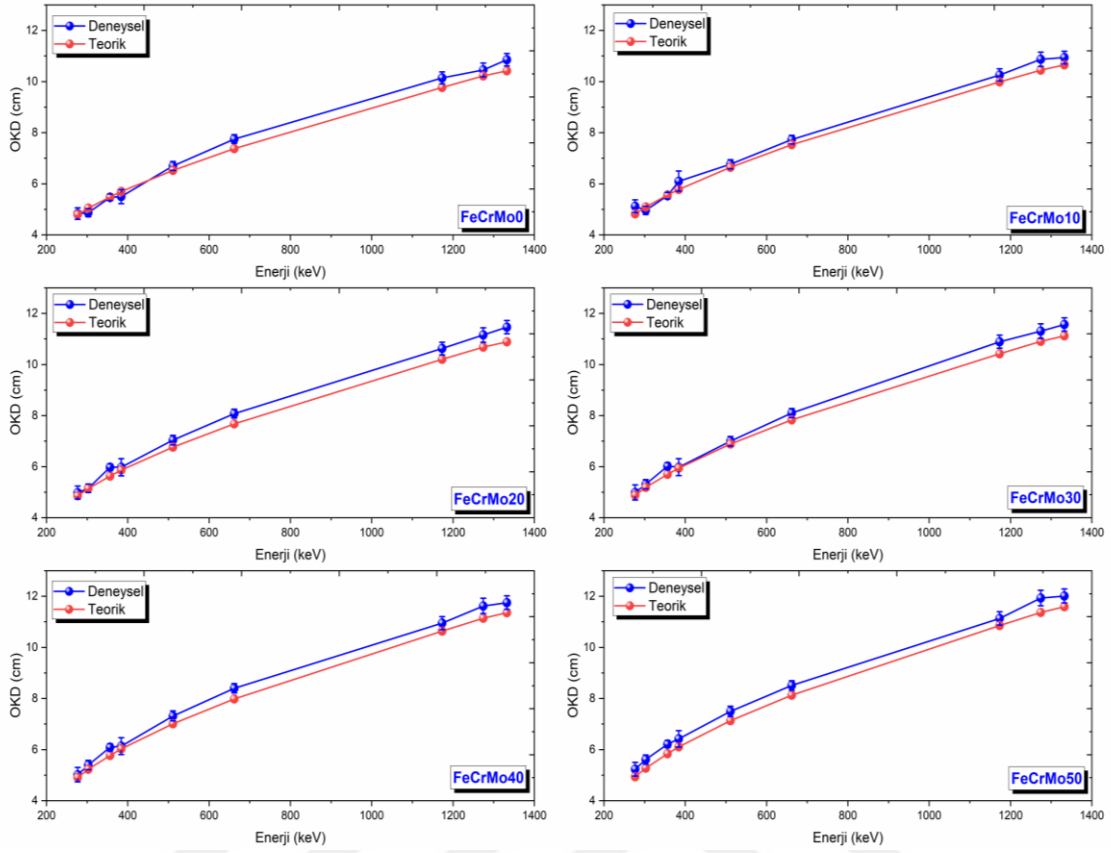
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	4,8306±0,2258	4,7979	5,1193±0,2533	4,8272	4,9848±0,2567	4,8557
302,9	4,8685±0,1577	5,0504	4,9602±0,1592	5,0969	5,1539±0,1615	5,1425
356,0	5,4699±0,1248	5,4881	5,5330±0,1281	5,5612	5,9776±0,1351	5,6333
383,9	5,4977±0,2753	5,6971	6,1019±0,3963	5,7815	5,9788±0,3394	5,8649
511,0	6,7001±0,1724	6,5291	6,7659±0,1765	6,6508	7,0428±0,1886	6,7720
661,7	7,7518±0,1698	7,3786	7,7302±0,1684	7,5299	8,0783±0,1764	7,6812
1173,2	10,1417±0,2346	9,7677	10,2592±0,2398	9,9856	10,6291±0,2471	10,2044
1274,5	10,4584±0,2662	10,2234	10,8711±0,2768	10,4526	11,1573±0,2837	10,6827
1332,5	10,8551±0,2455	10,4237	10,9410±0,2483	10,6576	11,4640±0,2608	10,8925
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	4,9911±0,2977	4,8833	5,0184±0,2819	4,9099	5,2345±0,2695	4,9367
302,9	5,3117±0,1836	5,1869	5,3954±0,1845	5,2298	5,6100±0,1792	5,2729
356,0	6,0204±0,1366	5,7040	6,0877±0,1437	5,7730	6,2172±0,1404	5,8423
383,9	5,9815±0,3361	5,9469	6,1351±0,3295	6,0272	6,4225±0,3237	6,1080
511,0	6,9987±0,1835	6,8922	7,3196±0,1933	7,0105	7,4955±0,1981	7,1301
661,7	8,1028±0,1797	7,8317	8,3970±0,1828	7,9806	8,5091±0,1845	8,1314
1173,2	10,8952±0,2561	10,4228	10,9495±0,2560	10,6395	11,1351±0,2596	10,8596
1274,5	11,3043±0,2868	10,9124	11,6229±0,2995	11,1404	11,9335±0,3049	11,3721
1332,5	11,5682±0,2610	11,1270	11,7536±0,2662	11,3598	12,0143±0,2724	11,5962



Şekil 5.16. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.17. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.18. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait onda-bir kalınlık değeri sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.19. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)

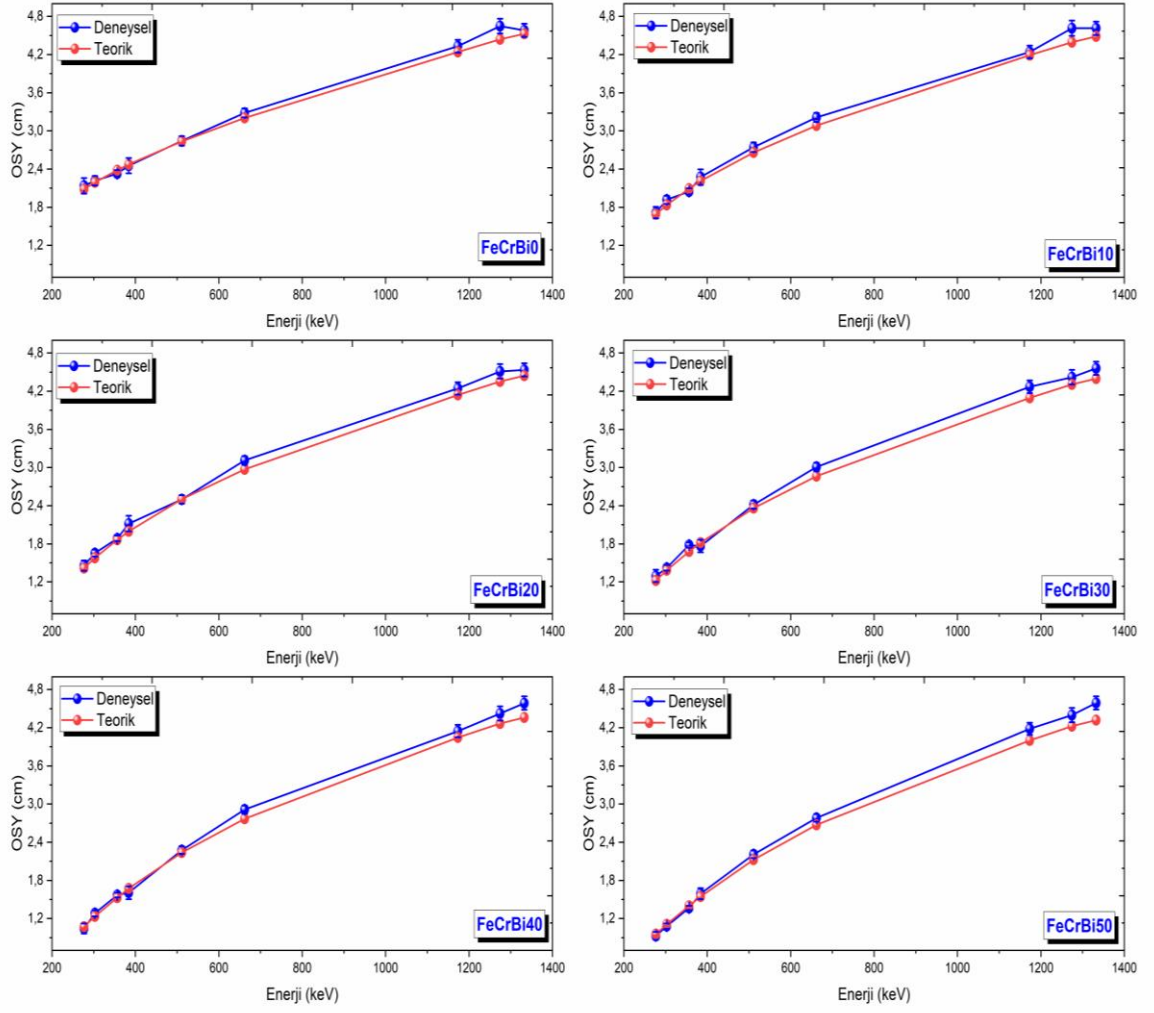
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	2,1373±0,1223	2,0837	1,7164±0,0913	1,6891	1,4568±0,0821	1,4181
302,9	2,2168±0,0754	2,1933	1,9184±0,0637	1,8382	1,6541±0,0540	1,5801
356,0	2,3287±0,0547	2,3834	2,0487±0,0477	2,0929	1,8873±0,0449	1,8637
383,9	2,4542±0,1201	2,4742	2,2742±0,1214	2,2115	2,1194±0,1223	1,9975
511,0	2,8439±0,0744	2,8356	2,7441±0,0736	2,6595	2,4995±0,0662	2,5026
661,7	3,2836±0,0717	3,2045	3,2114±0,0699	3,0837	3,1131±0,0684	2,9706
1173,2	4,3309±0,1015	4,2420	4,2397±0,0991	4,1920	4,2434±0,0983	4,1428
1274,5	4,6477±0,1176	4,4400	4,6146±0,1190	4,3957	4,5125±0,1142	4,3519
1332,5	4,5827±0,1040	4,5269	4,6130±0,1045	4,4844	4,5352±0,1029	4,4423
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	1,2940±0,0981	1,2215	1,0455±0,0793	1,0730	0,9292±0,0618	0,9557
302,9	1,4228±0,0442	1,3849	1,2829±0,0493	1,2329	1,0813±0,0396	1,1099
356,0	1,7839±0,0414	1,6792	1,5714±0,0365	1,5281	1,3684±0,0331	1,4010
383,9	1,7650±0,0990	1,8206	1,6064±0,1017	1,6729	1,5916±0,0872	1,5462
511,0	2,4183±0,0642	2,3628	2,2764±0,0595	2,2380	2,2102±0,0600	2,1249
661,7	3,0101±0,0658	2,8652	2,9136±0,0643	2,7673	2,7835±0,0619	2,6753
1173,2	4,2687±0,0992	4,0945	4,1474±0,0966	4,0474	4,1829±0,0972	4,0017
1274,5	4,4214±0,1131	4,3088	4,4247±0,1122	4,2667	4,3991±0,1125	4,2258
1332,5	4,5613±0,1034	4,4008	4,5873±0,1039	4,3602	4,5896±0,1044	4,3207

Tablo 5.20. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)

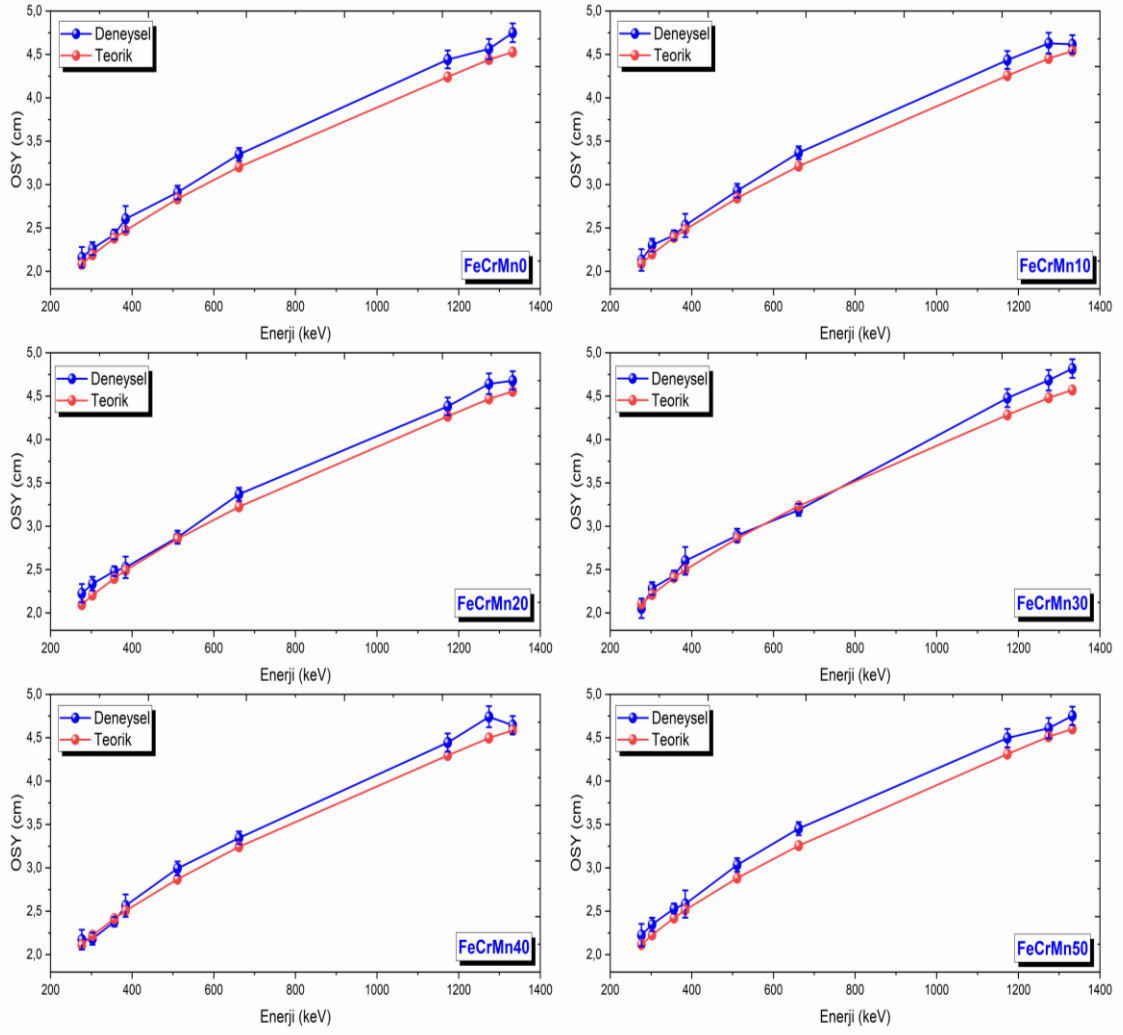
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	2,1622±0,1188	2,0837	2,1303±0,1249	2,0905	2,2269±0,1060	2,0975
302,9	2,2633±0,0729	2,1933	2,3041±0,0741	2,2005	2,3377±0,0787	2,2077
356,0	2,4253±0,0556	2,3834	2,4163±0,0553	2,3911	2,4819±0,0568	2,3989
383,9	2,6053±0,1473	2,4742	2,5299±0,1348	2,4822	2,5257±0,1247	2,4902
511,0	2,9103±0,0786	2,8356	2,9297±0,0786	2,8447	2,8753±0,0744	2,8538
661,7	3,3491±0,0732	3,2045	3,3672±0,0735	3,2147	3,3692±0,0744	3,2249
1173,2	4,4417±0,1032	4,2420	4,4363±0,1033	4,2555	4,3818±0,1020	4,2690
1274,5	4,5638±0,1166	4,4400	4,6305±0,1188	4,4541	4,6430±0,1184	4,4684
1332,5	4,7503±0,1079	4,5269	4,6174±0,1052	4,5414	4,6802±0,1062	4,5560
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	2,0542±0,1117	2,1044	2,1731±0,1140	2,1113	2,2265±0,1292	2,1188
302,9	2,2839±0,0722	2,2150	2,1840±0,0707	2,2222	2,3488±0,0767	2,2300
356,0	2,4322±0,0553	2,4067	2,3790±0,0548	2,4145	2,5327±0,0574	2,4229
383,9	2,6024±0,1616	2,4983	2,5651±0,1301	2,5064	2,5834±0,1563	2,5151
511,0	2,8950±0,0769	2,8630	2,9930±0,0802	2,8722	3,0344±0,0786	2,8821
661,7	3,1894±0,0694	3,2353	3,3472±0,0729	3,2455	3,4532±0,0756	3,2566
1173,2	4,4796±0,1052	4,2826	4,4444±0,1036	4,2961	4,4957±0,1053	4,3107
1274,5	4,6841±0,1191	4,4827	4,7414±0,1215	4,4970	4,6111±0,1181	4,5124
1332,5	4,8177±0,1093	4,5706	4,6445±0,1055	4,5851	4,7521±0,1075	4,6009

Tablo 5.21. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol değeri sonuçları (cm)

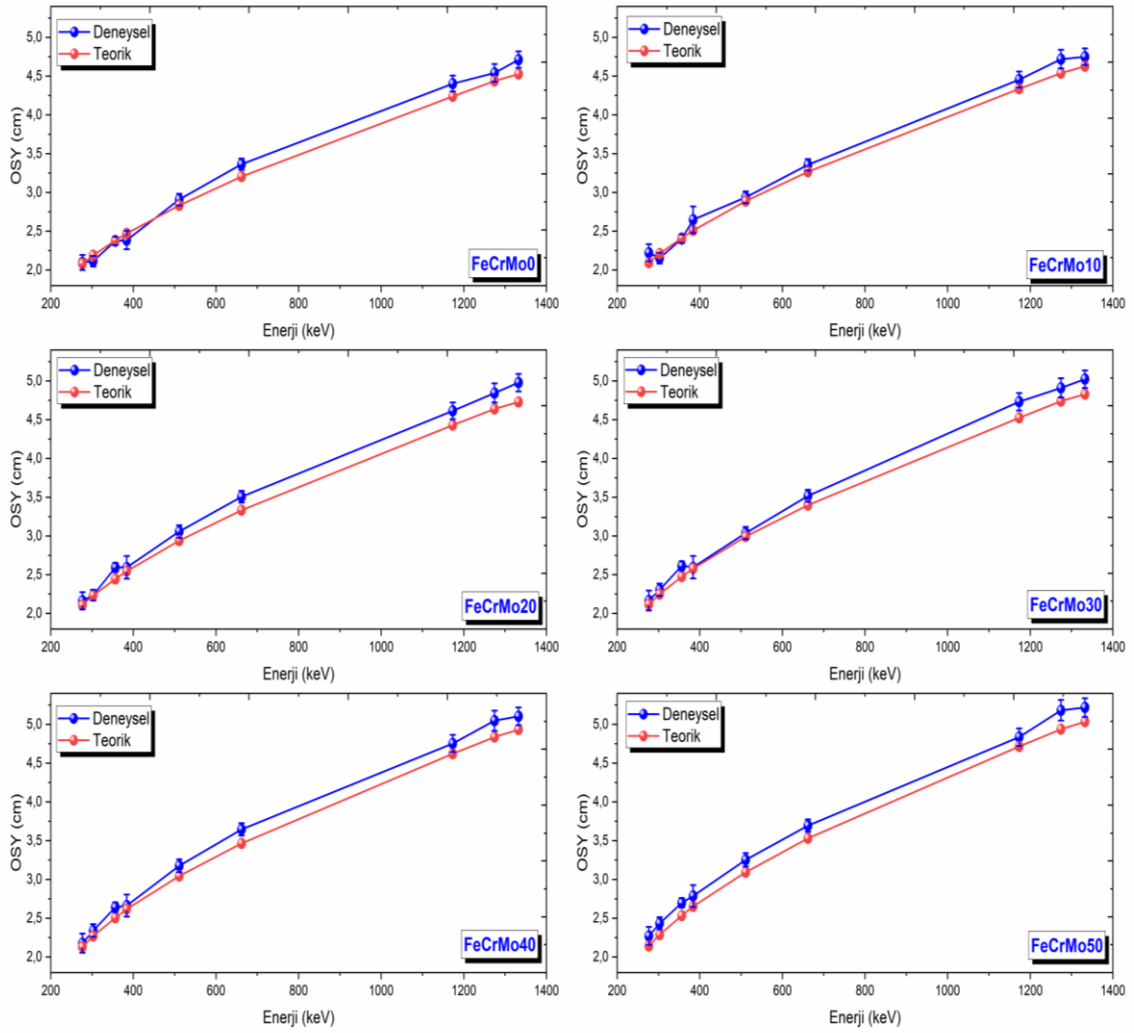
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	2,0979±0,0981	2,0837	2,2233±0,1100	2,0964	2,1649±0,1115	2,1088
302,9	2,1144±0,0685	2,1933	2,1542±0,0691	2,2136	2,2383±0,0701	2,2334
356,0	2,3755±0,0542	2,3834	2,4029±0,0556	2,4152	2,5960±0,0587	2,4465
383,9	2,3876±0,1196	2,4742	2,6500±0,1721	2,5109	2,5966±0,1474	2,5471
511,0	2,9098±0,0749	2,8356	2,9384±0,0766	2,8884	3,0587±0,0819	2,9411
661,7	3,3666±0,0737	3,2045	3,3572±0,0731	3,2702	3,5084±0,0766	3,3359
1173,2	4,4045±0,1019	4,2420	4,4555±0,1042	4,3367	4,6162±0,1073	4,4317
1274,5	4,5420±0,1156	4,4400	4,7213±0,1202	4,5395	4,8456±0,1232	4,6394
1332,5	4,7143±0,1066	4,5269	4,7516±0,1078	4,6286	4,9787±0,1133	4,7306
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	2,1676±0,1293	2,1208	2,1794±0,1224	2,1323	2,2733±0,1170	2,1440
302,9	2,3068±0,0797	2,2526	2,3432±0,0801	2,2713	2,4364±0,0778	2,2900
356,0	2,6146±0,0593	2,4772	2,6439±0,0624	2,5072	2,7001±0,0610	2,5373
383,9	2,5977±0,1459	2,5827	2,6644±0,1431	2,6176	2,7892±0,1406	2,6527
511,0	3,0395±0,0797	2,9932	3,1788±0,0839	3,0446	3,2552±0,0860	3,0966
661,7	3,5190±0,0780	3,4013	3,6468±0,0794	3,4659	3,6955±0,0801	3,5314
1173,2	4,7317±0,1112	4,5266	4,7553±0,1112	4,6207	4,8359±0,1128	4,7163
1274,5	4,9094±0,1246	4,7392	5,0478±0,1301	4,8382	5,1827±0,1324	4,9388
1332,5	5,0240±0,1133	4,8324	5,1045±0,1156	4,9335	5,2178±0,1183	5,0362



Şekil 5.19. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.20. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.21. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait ortalama serbest yol sonuçlarının enerji ile değişimi

5.5. Moleküler, Atomik ve Elektronik Tesir Kesitleri Araştırma Bulguları

Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri kütle azaltma katsayısı yardımıyla belirlenen iyonlaştırıcı radyasyon zırhlama parametreleridir. Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla gelen fotonun malzemenin molekülü, molekül içindeki atomu veya atom içindeki elektron ile etkileşme ihtimaliyetlerini belirten parametrelerdir ve bunların birimleri sırasıyla molekül/cm², atom/cm² ve elektron/cm² şeklindedir. Bu parametrelerin yüksek değerleri soğurucunun iyonlaştırıcı radyasyonu daha iyi azalttığını gösterir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla denklem (4.10), (4.11) ve (4.12) ile elde edilmiştir. Denklemlerden de görüldüğü gibi moleküler ve atomik

tesir kesitleri direkt olarak birbirleriyle ilişkilidir ve bunların deneysel ve teorik sonuçları ilgili denklemler ile belirlenmiştir. Elektronik tesir kesiti denklemi incelendiğinde ise bu parametrenin hesaplanmasında malzeme içindeki her bir elementin kütle azaltma katsayısının dikkate alınması gerekmektedir. İncelenen kompozitler içinde hidrojen, oksijen gibi düşük atom numaralı ve saf halde temin edilebilse bile ölçümlerinin gerçekleştirilmesi çok zor olduğundan, elektronik tesir kesiti parametresinin sadece teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin deneysel ve teorik olarak belirlenen moleküler ve atomik tesir kesitleri sonuçları sırasıyla Tablo 5.22-5.24 ve Tablo 5.25-5.27’de ve teorik olarak belirlenen elektronik tesir kesitleri sonuçları ise Tablo 5.28-5.30’da listelenmiştir. Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri parametrelerinin foton enerjisi ile değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.22-5.24, Şekil 5.25-5.27 ve Şekil 5.28-5.30’da sunulmuştur.

Tablo 5.22. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-19}$) (molekül/cm²)

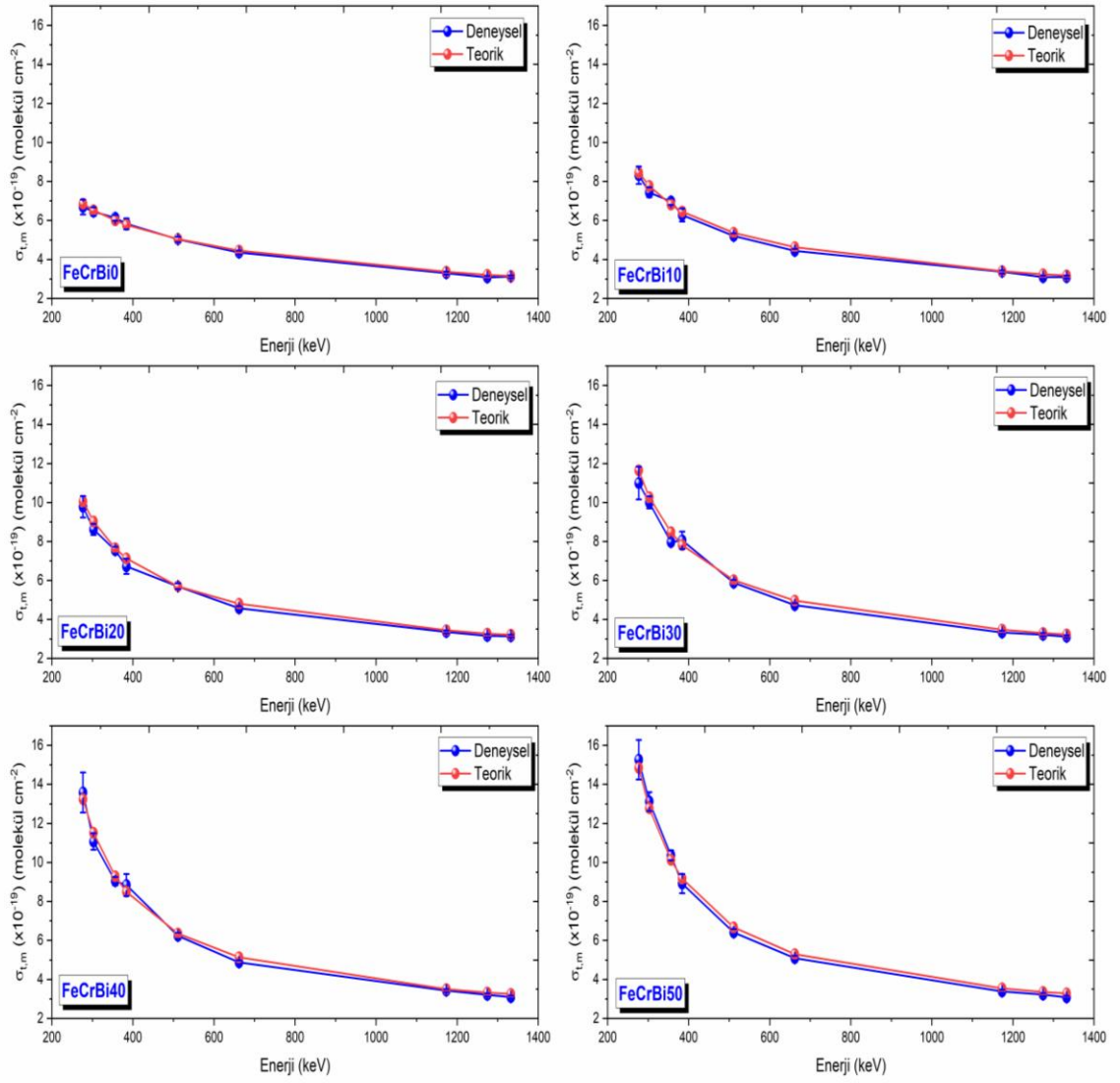
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	6,6939±0,3830	6,8661	8,3209±0,4424	8,4552	9,7861±0,5513	10,0532
302,9	6,4537±0,2194	6,5228	7,4448±0,2471	7,7694	8,6192±0,2813	9,0230
356,0	6,1436±0,1444	6,0026	6,9712±0,1622	6,8238	7,5542±0,1795	7,6497
383,9	5,8294±0,2852	5,7823	6,2801±0,3352	6,4580	6,7268±0,3882	7,1375
511,0	5,0307±0,1316	5,0455	5,2045±0,1396	5,3702	5,7039±0,1511	5,6968
661,7	4,3571±0,0951	4,4646	4,4472±0,0968	4,6315	4,5796±0,1006	4,7993
1173,2	3,3034±0,0774	3,3726	3,3686±0,0787	3,4069	3,3597±0,0778	3,4414
1274,5	3,0782±0,0779	3,2223	3,0949±0,0798	3,2490	3,1594±0,0800	3,2760
1332,5	3,1219±0,0708	3,1604	3,0960±0,0701	3,1848	3,1436±0,0713	3,2093
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	10,9987±0,8335	11,6513	13,5884±1,0307	13,2404	15,2665±1,0154	14,8429
302,9	10,0027±0,3104	10,2766	11,0738±0,4253	11,5231	13,1184±0,4805	12,7802
356,0	7,9778±0,1851	8,4756	9,0408±0,2099	9,2969	10,3662±0,2510	10,1250
383,9	8,0632±0,4522	7,8169	8,8440±0,5599	8,4926	8,9124±0,4885	9,1740
511,0	5,8851±0,1561	6,0233	6,2410±0,1631	6,3481	6,4178±0,1742	6,6755
661,7	4,7280±0,1033	4,9671	4,8760±0,1076	5,1340	5,0960±0,1134	5,3022
1173,2	3,3340±0,0775	3,4759	3,4255±0,0798	3,5101	3,3912±0,0788	3,5447
1274,5	3,2188±0,0823	3,3029	3,2108±0,0814	3,3297	3,2245±0,0825	3,3567
1332,5	3,1201±0,0707	3,2339	3,0970±0,0701	3,2583	3,0906±0,0703	3,2830

Tablo 5.23. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-19}$) (molekül/cm²)

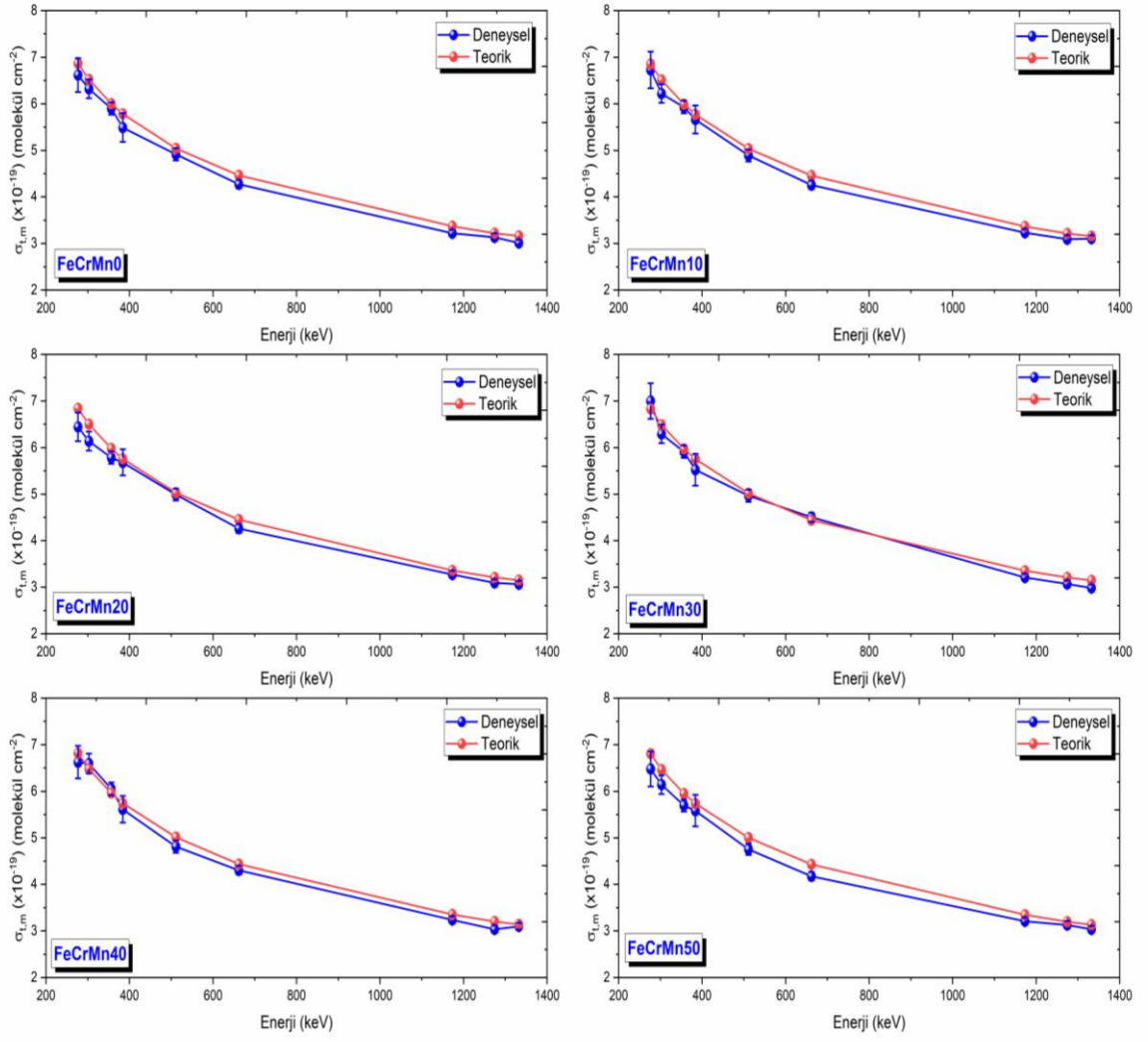
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	6,6167±0,3634	6,8661	6,7265±0,3943	6,8545	6,4450±0,3067	6,8428
302,9	6,3213±0,2037	6,5228	6,2193±0,2000	6,5120	6,1397±0,2068	6,5011
356,0	5,8990±0,1352	6,0026	5,9303±0,1357	5,9928	5,7829±0,1323	5,9829
383,9	5,4914±0,3105	5,7823	5,6640±0,3018	5,7729	5,6827±0,2805	5,7635
511,0	4,9158±0,1328	5,0455	4,8912±0,1313	5,0374	4,9917±0,1291	5,0292
661,7	4,2719±0,0934	4,4646	4,2557±0,0928	4,4576	4,2600±0,0941	4,4505
1173,2	3,2210±0,0748	3,3726	3,2301±0,0752	3,3673	3,2755±0,0763	3,3621
1274,5	3,1348±0,0801	3,2223	3,0946±0,0794	3,2171	3,0912±0,0788	3,2120
1332,5	3,0117±0,0684	3,1604	3,1034±0,0707	3,1553	3,0666±0,0696	3,1503
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	6,9982±0,3806	6,8312	6,6258±0,3477	6,8196	6,4787±0,3759	6,8079
302,9	6,2943±0,1989	6,4901	6,5926±0,2133	6,4793	6,1412±0,2006	6,4684
356,0	5,9105±0,1343	5,9731	6,0522±0,1393	5,9633	5,6954±0,1292	5,9534
383,9	5,5240±0,3430	5,7541	5,6132±0,2847	5,7447	5,5835±0,3378	5,7352
511,0	4,9656±0,1319	5,0211	4,8106±0,1289	5,0130	4,7536±0,1231	5,0048
661,7	4,5073±0,0981	4,4434	4,3017±0,0937	4,4364	4,1772±0,0915	4,4293
1173,2	3,2091±0,0754	3,3568	3,2397±0,0755	3,3515	3,2085±0,0751	3,3462
1274,5	3,0690±0,0780	3,2069	3,0367±0,0778	3,2018	3,1282±0,0801	3,1966
1332,5	2,9839±0,0677	3,1452	3,1001±0,0704	3,1402	3,0354±0,0686	3,1352

Tablo 5.24. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-19}$) (molekül/cm²)

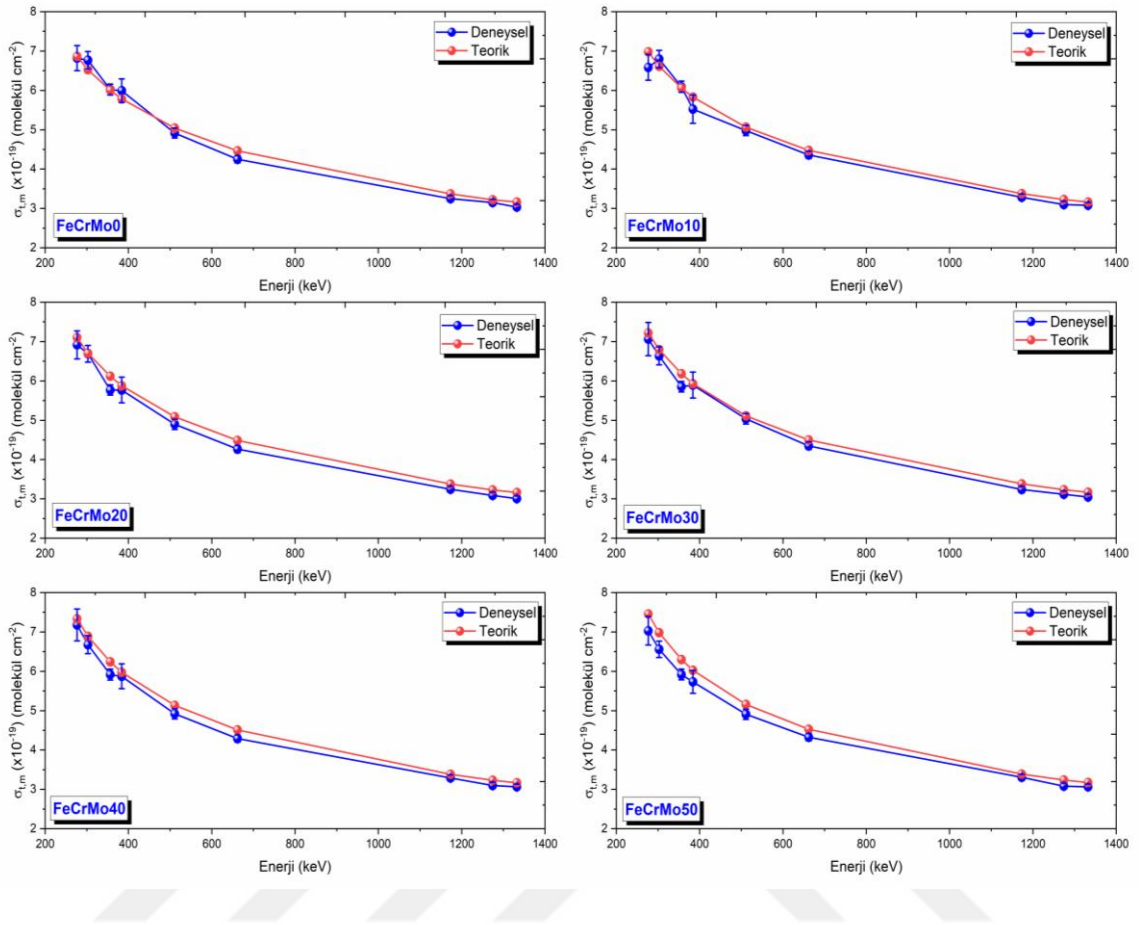
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	6,8195±0,3188	6,8661	6,5849±0,3259	6,9834	6,9175±0,3562	7,1013
302,9	6,7664±0,2192	6,5228	6,7961±0,2181	6,6138	6,6905±0,2096	6,7052
356,0	6,0225±0,1375	6,0026	6,0925±0,1411	6,0617	5,7685±0,1304	6,1211
383,9	5,9920±0,3001	5,7823	5,5245±0,3588	5,8307	5,7673±0,3274	5,8794
511,0	4,9167±0,1265	5,0455	4,9824±0,1300	5,0686	4,8960±0,1311	5,0918
661,7	4,2497±0,0931	4,4646	4,3608±0,0950	4,4768	4,2684±0,0932	4,4891
1173,2	3,2482±0,0751	3,3726	3,2858±0,0768	3,3758	3,2441±0,0754	3,3791
1274,5	3,1498±0,0802	3,2223	3,1009±0,0789	3,2250	3,0905±0,0786	3,2278
1332,5	3,0347±0,0686	3,1604	3,0811±0,0699	3,1630	3,0078±0,0684	3,1656
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	7,0633±0,4213	7,2192	7,1779±0,4032	7,3365	7,0307±0,3620	7,4547
302,9	6,6370±0,2294	6,7967	6,6762±0,2283	6,8877	6,5600±0,2096	6,9794
356,0	5,8557±0,1328	6,1805	5,9170±0,1397	6,2396	5,9194±0,1337	6,2992
383,9	5,8938±0,3311	5,9280	5,8713±0,3153	5,9764	5,7302±0,2888	6,0252
511,0	5,0372±0,1321	5,1150	4,9212±0,1300	5,1382	4,9099±0,1298	5,1615
661,7	4,3508±0,0965	4,5014	4,2898±0,0934	4,5136	4,3250±0,0938	4,5259
1173,2	3,2357±0,0761	3,3824	3,2897±0,0769	3,3856	3,3050±0,0771	3,3889
1274,5	3,1186±0,0791	3,2306	3,0992±0,0799	3,2334	3,0839±0,0788	3,2362
1332,5	3,0475±0,0688	3,1683	3,0647±0,0694	3,1709	3,0632±0,0694	3,1736



Şekil 5.22. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.23. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.24. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait moleküler tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.25. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-24}$) (atom/cm²)

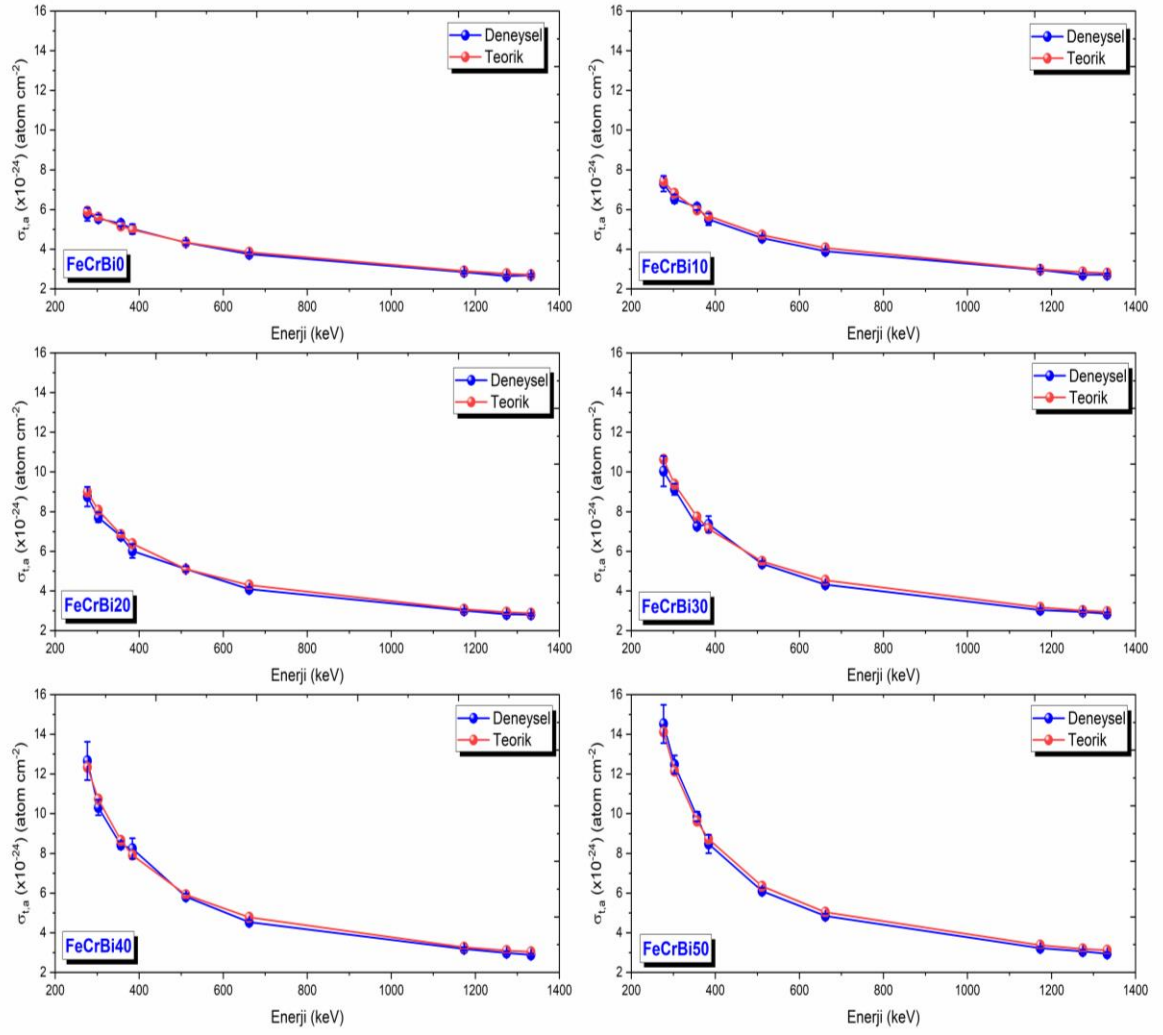
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	5,7641±0,3298	5,9124	7,3031±0,3883	8,4552	8,7587±0,4934	8,9977
302,9	5,5573±0,1890	5,6168	6,5342±0,2169	7,7694	7,7143±0,2517	8,0756
356,0	5,2903±0,1243	5,1688	6,1184±0,1423	6,8238	6,7611±0,1607	6,8466
383,9	5,0197±0,2456	4,9792	5,5119±0,2942	6,4580	6,0205±0,3474	6,3881
511,0	4,3320±0,1133	4,3446	4,5679±0,1226	5,3702	5,1051±0,1352	5,0987
661,7	3,7519±0,0819	3,8445	3,9032±0,0849	4,6315	4,0988±0,0900	4,2954
1173,2	2,8446±0,0667	2,9042	2,9566±0,0691	3,4069	3,0070±0,0696	3,0801
1274,5	2,6507±0,0671	2,7747	2,7163±0,0700	3,2490	2,8277±0,0716	2,9320
1332,5	2,6883±0,0610	2,7214	2,7173±0,0616	3,1848	2,8135±0,0638	2,8724
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	10,0422±0,7610	10,6380	12,6603±0,9603	12,3360	14,5231±0,9659	14,1201
302,9	9,1328±0,2834	9,3829	10,3175±0,3963	10,7361	12,4796±0,4571	12,1579
356,0	7,2840±0,1690	7,7385	8,4233±0,1956	8,6619	9,8614±0,2388	9,6320
383,9	7,3620±0,4129	7,1372	8,2400±0,5216	7,9126	8,4785±0,4647	8,7273
511,0	5,3733±0,1426	5,4995	5,8147±0,1519	5,9145	6,1053±0,1657	6,3505
661,7	4,3168±0,0944	4,5351	4,5430±0,1002	4,7833	4,8479±0,1078	5,0440
1173,2	3,0441±0,0707	3,1736	3,1915±0,0743	3,2704	3,2260±0,0749	3,3721
1274,5	2,9389±0,0752	3,0157	2,9915±0,0758	3,1023	3,0675±0,0785	3,1933

1332,5 2,8488±0,0646 2,9527 2,8855±0,0654 3,0358 2,9401±0,0669 3,1231
 Tablo 5.26. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-24}$) (atom/cm²)

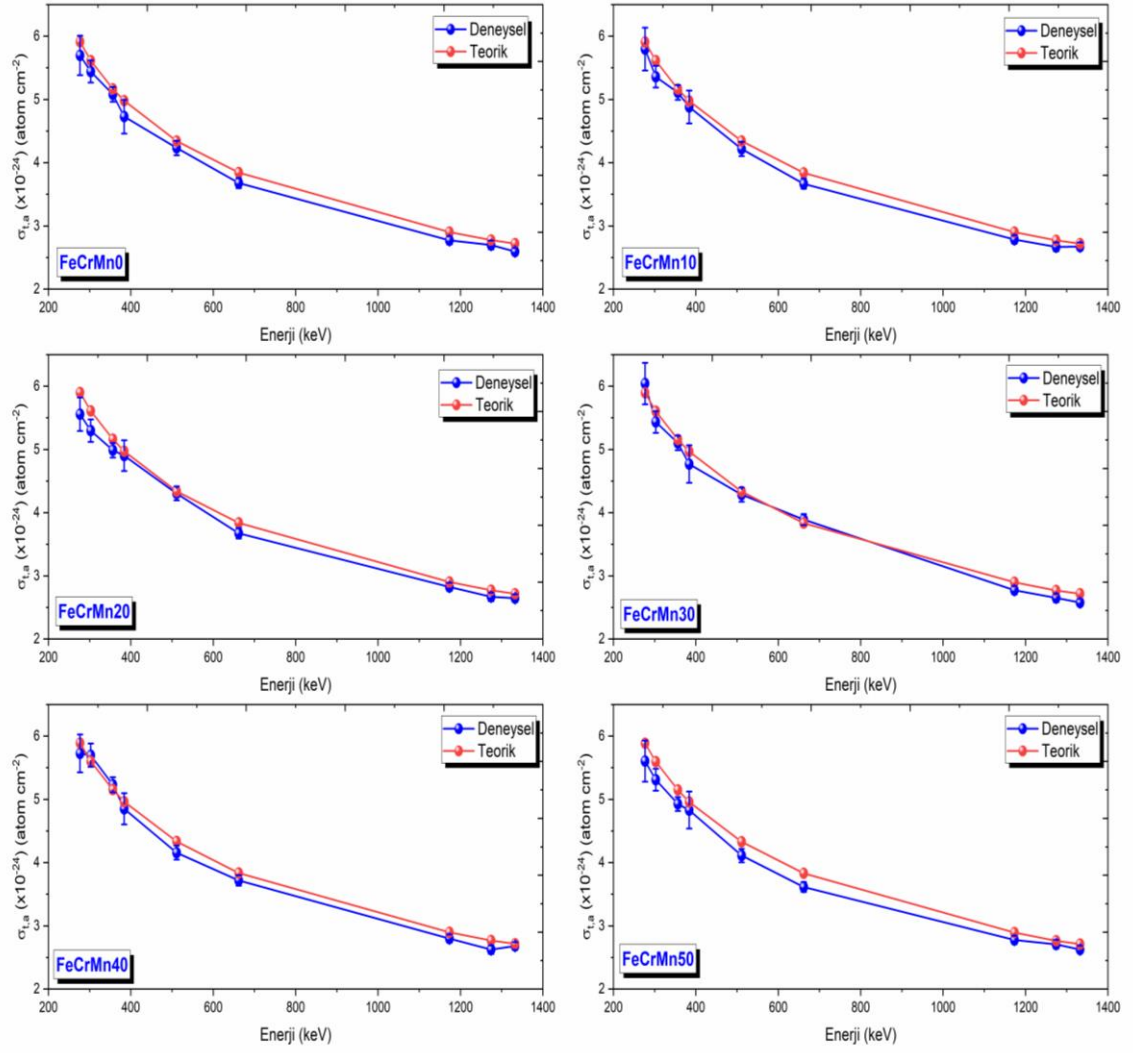
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	5,6976±0,3130	5,9124	5,7976±0,3398	5,9079	5,5601±0,2646	5,9033
302,9	5,4433±0,1754	5,6168	5,3604±0,1724	5,6126	5,2967±0,1784	5,6084
356,0	5,0796±0,1164	5,1688	5,1113±0,1169	5,1651	4,9889±0,1142	5,1615
383,9	4,7287±0,2674	4,9792	4,8818±0,2602	4,9757	4,9024±0,2420	4,9722
511,0	4,2330±0,1144	4,3446	4,2157±0,1131	4,3417	4,3063±0,1114	4,3387
661,7	3,6785±0,0804	3,8445	3,6680±0,0800	3,8420	3,6751±0,0812	3,8394
1173,2	2,7736±0,0644	2,9042	2,7840±0,0648	2,9023	2,8258±0,0658	2,9004
1274,5	2,6994±0,0690	2,7747	2,6672±0,0684	2,7729	2,6668±0,0680	2,7710
1332,5	2,5934±0,0589	2,7214	2,6748±0,0610	2,7196	2,6456±0,0600	2,7178
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	6,0430±0,3287	5,8987	5,7267±0,3005	5,8942	5,6048±0,3252	5,8896
302,9	5,4351±0,1717	5,6043	5,6980±0,1843	5,6001	5,3128±0,1736	5,5959
356,0	5,1037±0,1160	5,1578	5,2309±0,1204	5,1541	4,9271±0,1117	5,1504
383,9	4,7700±0,2962	4,9687	4,8515±0,2461	4,9652	4,8303±0,2922	4,9616
511,0	4,2878±0,1139	4,3357	4,1578±0,1114	4,3327	4,1124±0,1065	4,3297
661,7	3,8921±0,0847	3,8369	3,7179±0,0810	3,8344	3,6137±0,0792	3,8318
1173,2	2,7711±0,0651	2,8986	2,8000±0,0653	2,8967	2,7757±0,0650	2,8948
1274,5	2,6501±0,0674	2,7691	2,6246±0,0673	2,7673	2,7062±0,0693	2,7654
1332,5	2,5766±0,0585	2,7159	2,6794±0,0609	2,7141	2,6260±0,0594	2,7123

Tablo 5.27. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-24}$) (atom/cm²)

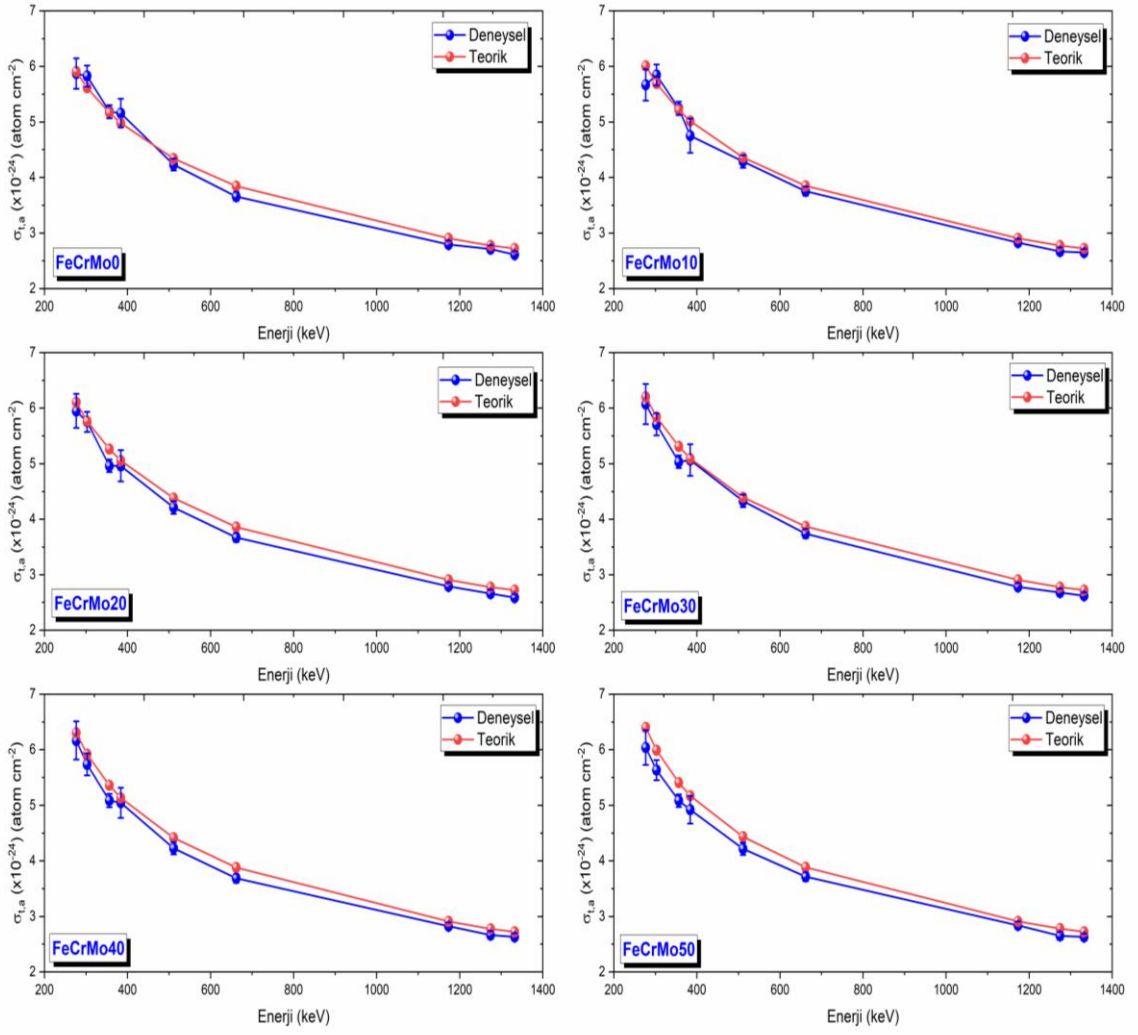
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	5,8723±0,2745	5,9124	5,6673±0,2804	6,0102	5,9503±0,3064	6,1085
302,9	5,8266±0,1887	5,6168	5,8490±0,1877	5,6921	5,7551±0,1803	5,7678
356,0	5,1860±0,1184	5,1688	5,2435±0,1214	5,2169	4,9620±0,1122	5,2653
383,9	5,1598±0,2584	4,9792	4,7547±0,3088	5,0182	4,9610±0,2816	5,0574
511,0	4,2338±0,1090	4,3446	4,2881±0,1119	4,3622	4,2115±0,1128	4,3799
661,7	3,6594±0,0802	3,8445	3,7531±0,0818	3,8530	3,6717±0,0802	3,8615
1173,2	2,7970±0,0647	2,9042	2,8279±0,0661	2,9054	2,7905±0,0649	2,9067
1274,5	2,7123±0,0690	2,7747	2,6688±0,0679	2,7756	2,6584±0,0676	2,7765
1332,5	2,6132±0,0591	2,7214	2,6517±0,0602	2,7222	2,5873±0,0589	2,7231
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	6,0726±0,3622	6,2066	6,1678±0,3465	6,3041	6,0382±0,3109	6,4023
302,9	5,7061±0,1972	5,8434	5,7368±0,1962	5,9185	5,6339±0,1800	5,9942
356,0	5,0344±0,1142	5,3136	5,0844±0,1200	5,3616	5,0837±0,1148	5,4099
383,9	5,0671±0,2847	5,0966	5,0452±0,2709	5,1355	4,9212±0,2481	5,1746
511,0	4,3307±0,1135	4,3976	4,2287±0,1117	4,4151	4,2167±0,1114	4,4328
661,7	3,7406±0,0830	3,8700	3,6861±0,0803	3,8785	3,7144±0,0806	3,8870
1173,2	2,7818±0,0654	2,9079	2,8268±0,0661	2,9092	2,8385±0,0662	2,9105
1274,5	2,6812±0,0680	2,7775	2,6631±0,0686	2,7784	2,6486±0,0677	2,7793
1332,5	2,6200±0,0591	2,7239	2,6334±0,0596	2,7247	2,6307±0,0596	2,7256



Şekil 5.25. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.26. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.27. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait atomik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.28. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-25}$) (elektron/cm²)

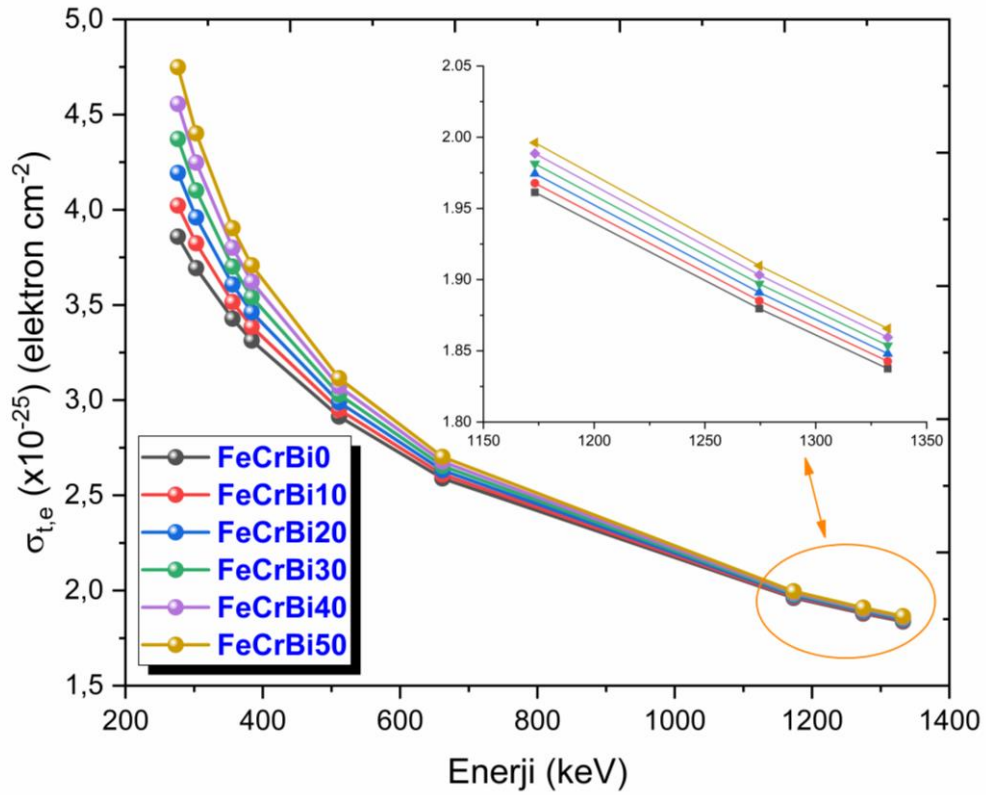
Enerji (keV)	FeCrBi0	FeCrBi10	FeCrBi20	FeCrBi30	FeCrBi40	FeCrBi50
276,4	3,8588	4,0226	4,1937	4,3718	4,5562	4,7499
302,9	3,6938	3,8239	3,9600	4,1015	4,2480	4,4019
356,0	3,4285	3,5158	3,6070	3,7019	3,8002	3,9034
383,9	3,3135	3,3862	3,4621	3,5410	3,6228	3,7087
511,0	2,9144	2,9513	2,9899	3,0301	3,0717	3,1153
661,7	2,5898	2,6104	2,6320	2,6545	2,6778	2,7023
1173,2	1,9613	1,9677	1,9744	1,9814	1,9886	1,9962
1274,5	1,8797	1,8852	1,8910	1,8970	1,9033	1,9098
1332,5	1,8375	1,8427	1,8481	1,8537	1,8595	1,8656

Tablo 5.29. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-25}$) (elektron/cm²)

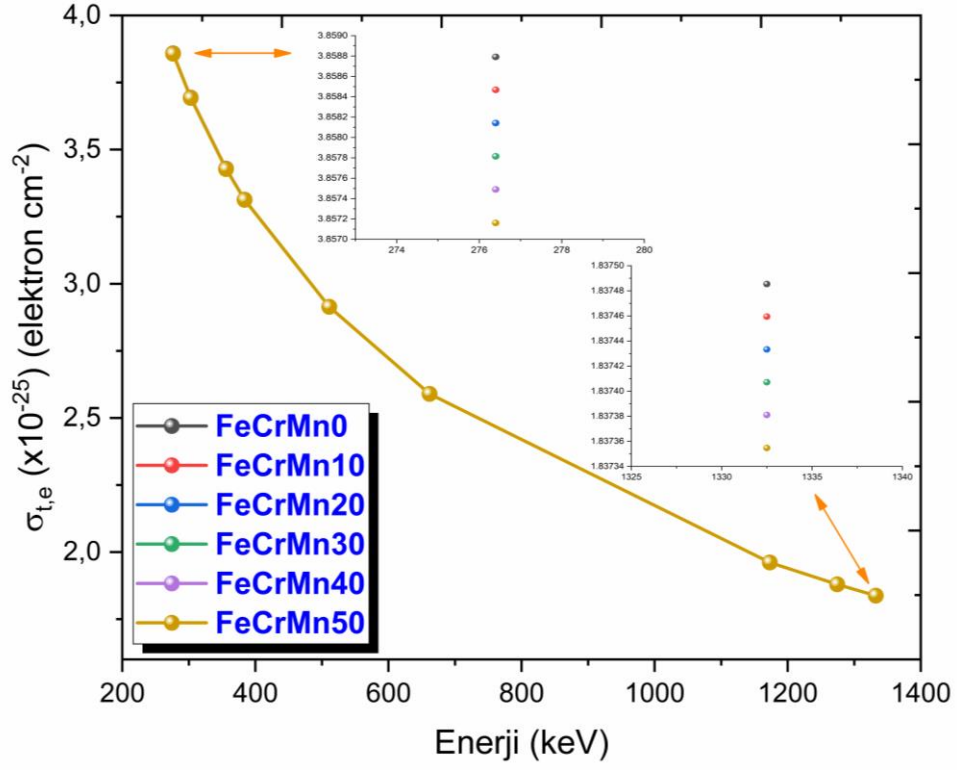
Enerji (keV)	FeCrMn0	FeCrMn10	FeCrMn20	FeCrMn30	FeCrMn40	FeCrMn50
276,4	3,8588	3,8585	3,8581	3,8578	3,8575	3,8572
302,9	3,6938	3,6935	3,6933	3,6930	3,6928	3,6925
356,0	3,4285	3,4284	3,4282	3,4281	3,4279	3,4278
383,9	3,3135	3,3134	3,3133	3,3131	3,3130	3,3129
511,0	2,9144	2,9143	2,9142	2,9141	2,9141	2,9140
661,7	2,5898	2,5897	2,5897	2,5897	2,5897	2,5896
1173,2	1,9613	1,9613	1,9613	1,9613	1,9613	1,9613
1274,5	1,8797	1,8796	1,8796	1,8796	1,8796	1,8795
1332,5	1,8375	1,8375	1,8374	1,8374	1,8374	1,8374

Tablo 5.30. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçları ($\times 10^{-25}$) (elektron/cm²)

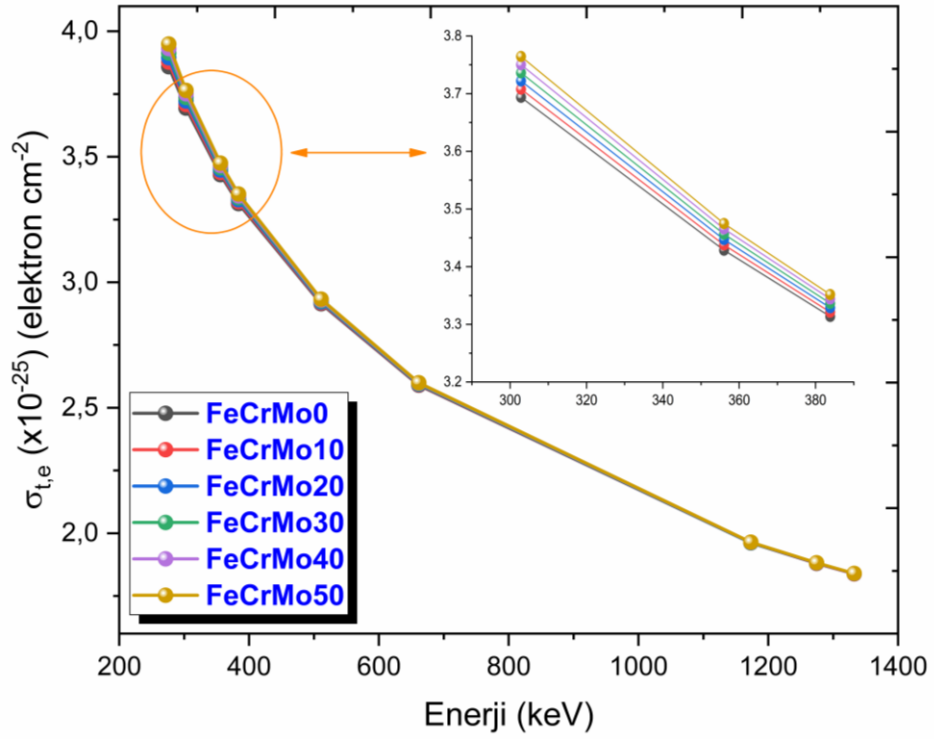
Enerji (keV)	FeCrMo0	FeCrMo10	FeCrMo20	FeCrMo30	FeCrMo40	FeCrMo50
276,4	3,8588	3,8769	3,8950	3,9131	3,9311	3,9493
302,9	3,6938	3,7079	3,7221	3,7362	3,7503	3,7645
356,0	3,4285	3,4378	3,4470	3,4563	3,4655	3,4748
383,9	3,3135	3,3211	3,3287	3,3364	3,3439	3,3515
511,0	2,9144	2,9180	2,9217	2,9254	2,9291	2,9328
661,7	2,5898	2,5918	2,5938	2,5958	2,5978	2,5999
1173,2	1,9613	1,9619	1,9625	1,9631	1,9637	1,9643
1274,5	1,8797	1,8802	1,8807	1,8812	1,8817	1,8823
1332,5	1,8375	1,8380	1,8385	1,8389	1,8394	1,8399



Şekil 5.28. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.29. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.30. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait elektronik tesir kesiti sonuçlarının enerji ile değişimi

5.6. Etkin Atom Numarası, Elektron Yoğunluğu ve İletkenlik Araştırma Bulguları

Etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik parametreleri temelinde kütle azaltma katsayısı bulunan parametrelerdir. Etkin atom numarası birden fazla element içeren malzemelerde belirlenen, birimi olmayan bir parametredir ve atomik tesir kesitinin elektronik tesir kesitine oranından hesaplanabilmektedir. Etkin elektron yoğunluğu etkin atom numarasından belirlenebilen ve aralarında doğru orantı olan bir parametredir. Birim kütledeki elektron sayısını belirten bu parametrenin birimi elektron/g'dır. Etkin iletkenlik ise etkin elektron yoğunluğu ile ilişkili bir parametredir ve S/m boyutundadır. Bu üç parametrenin büyük değerleri soğurucunun daha iyi bir iyonlaştırıcı radyasyon zırh malzemesi olduğunu gösterir. Etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik parametreleri sırasıyla denklem (4.13), (4.14) ve (4.15) ile belirlenmiştir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin deneysel ve teorik olarak belirlenen etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik parametrelerine ait sonuçlar sırasıyla Tablo 5.31-5.33, Tablo 5.34-5.36 ve Tablo 5.37-5.39'da listelenmiştir. Bu parametrelerin foton enerjisi ile değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.31-5.33, Şekil 5.34-5.36 ve Şekil 5.37-39'da görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 5.31. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları

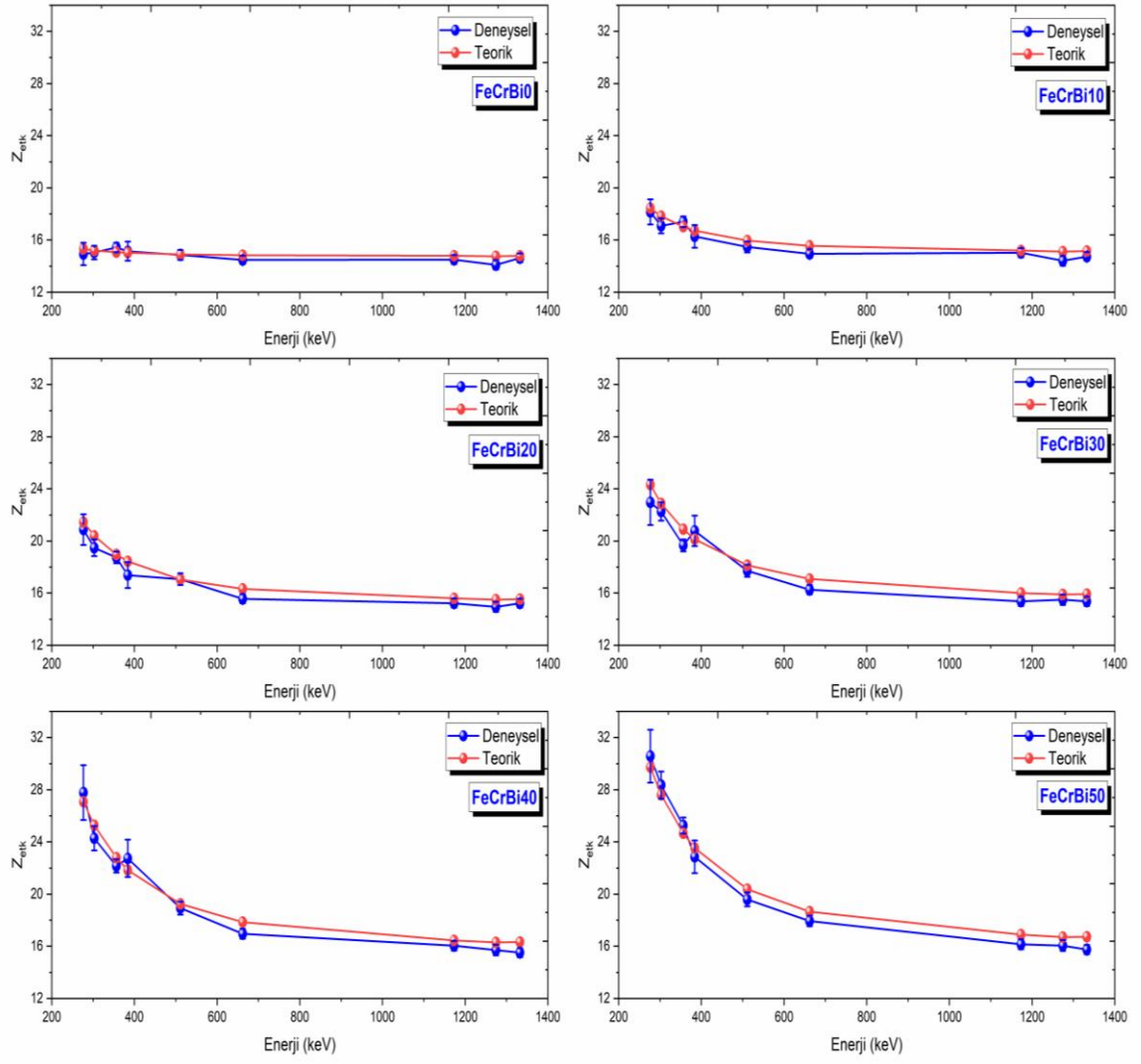
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	14,9376±0,8546	15,3219	18,1554±0,9653	18,4483	20,8850±1,1765	21,4551
302,9	15,0450±0,5116	15,2061	17,0876±0,5671	17,8326	19,4806±0,6357	20,3932
356,0	15,4301±0,3626	15,0758	17,4026±0,4048	17,0348	18,7441±0,4455	18,9811
383,9	15,1491±0,7411	15,0267	16,2777±0,8689	16,7389	17,3899±1,0035	18,4517
511,0	14,8643±0,3887	14,9077	15,4776±0,4153	15,9703	17,0744±0,4524	17,0529
661,7	14,4874±0,3163	14,8449	14,9524±0,3254	15,5719	15,5727±0,3419	16,3196
1173,2	14,5033±0,3400	14,8072	15,0252±0,3512	15,1960	15,2298±0,3527	15,5998
1274,5	14,1018±0,3568	14,7616	14,4087±0,3715	15,1263	14,9535±0,3785	15,5052
1332,5	14,6302±0,3320	14,8104	14,7465±0,3340	15,1695	15,2242±0,3453	15,5427
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik	Deneyisel	Teorik
276,4	22,9704±1,7407	24,3332	27,7871±2,1078	27,0755	30,5759±2,0336	29,7275
302,9	22,2671±0,6910	22,8768	24,2879±0,9329	25,2734	28,3504±1,0383	27,6196
356,0	19,6761±0,4564	20,9039	22,1654±0,5147	22,7933	25,2637±0,6118	24,6760
383,9	20,7906±1,1659	20,1555	22,7448±1,4399	21,8411	22,8611±1,2529	23,5320
511,0	17,7332±0,4705	18,1498	18,9302±0,4946	19,2550	19,5976±0,5320	20,3845
661,7	16,2620±0,3555	17,0845	16,9653±0,3743	17,8628	17,9401±0,3991	18,6660
1173,2	15,3632±0,3569	16,0169	16,0490±0,3737	16,4456	16,1610±0,3754	16,8927
1274,5	15,4921±0,3963	15,8970	15,7177±0,3984	16,2999	16,0618±0,4109	16,7203
1332,5	15,3681±0,3485	15,9286	15,5173±0,3514	16,3257	15,7595±0,3583	16,7402

Tablo 5.32. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları

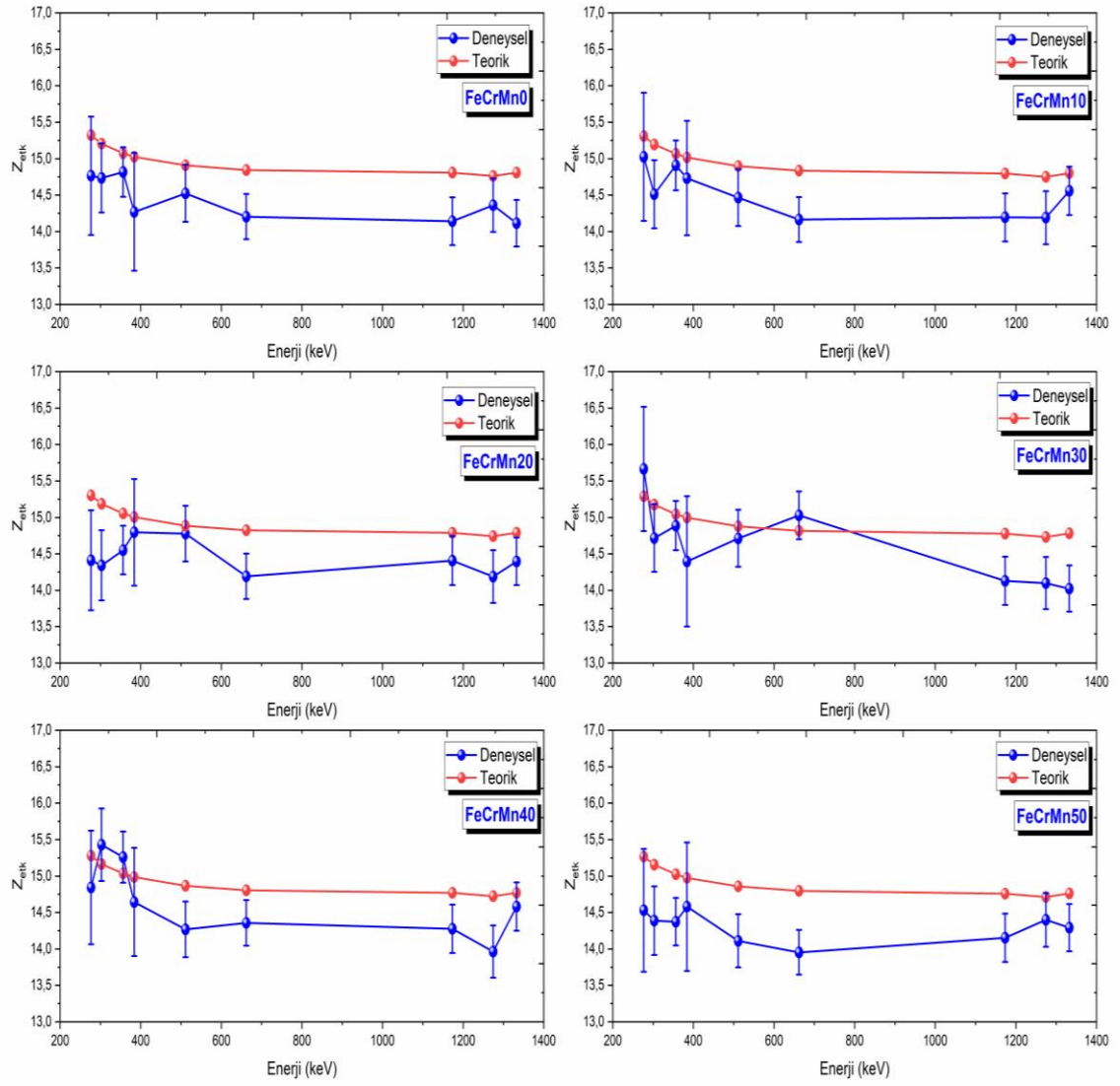
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	14,7653±0,8110	15,3219	15,0256±0,8807	15,3114	14,4113±0,6859	15,3009
302,9	14,7364±0,4749	15,2061	14,5130±0,4667	15,1959	14,3415±0,4830	15,1856
356,0	14,8156±0,3395	15,0758	14,9088±0,3411	15,0658	14,5523±0,3330	15,0557
383,9	14,2708±0,8069	15,0267	14,7335±0,7852	15,0168	14,7964±0,7305	15,0068
511,0	14,5247±0,3924	14,9077	14,4656±0,3882	14,8980	14,7770±0,3822	14,8881
661,7	14,2041±0,3104	14,8449	14,1635±0,3090	14,8353	14,1911±0,3136	14,8257
1173,2	14,1415±0,3285	14,8072	14,1945±0,3306	14,7977	14,4075±0,3355	14,7882
1274,5	14,3612±0,3670	14,7616	14,1901±0,3641	14,7520	14,1880±0,3618	14,7424
1332,5	14,1139±0,3205	14,8104	14,5569±0,3318	14,8007	14,3982±0,3268	14,7910
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	15,6642±0,8519	15,2904	14,8456±0,7790	15,2799	14,5308±0,8430	15,2692
302,9	14,7172±0,4650	15,1752	15,4300±0,4991	15,1649	14,3879±0,4701	15,1545
356,0	14,8879±0,3383	15,0456	15,2598±0,3512	15,0356	14,3742±0,3260	15,0254
383,9	14,3972±0,8940	14,9968	14,6437±0,7428	14,9868	14,5804±0,8822	14,9767
511,0	14,7139±0,3909	14,8783	14,2683±0,3823	14,8685	14,1126±0,3654	14,8585
661,7	15,0290±0,3271	14,8160	14,3568±0,3128	14,8064	13,9544±0,3056	14,7967
1173,2	14,1286±0,3318	14,7786	14,2762±0,3328	14,7691	14,1522±0,3314	14,7595
1274,5	14,0994±0,3585	14,7327	13,9641±0,3578	14,7230	14,3983±0,3687	14,7133
1332,5	14,0230±0,3182	14,7813	14,5828±0,3313	14,7716	14,2920±0,3232	14,7618

Tablo 5.33. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçları

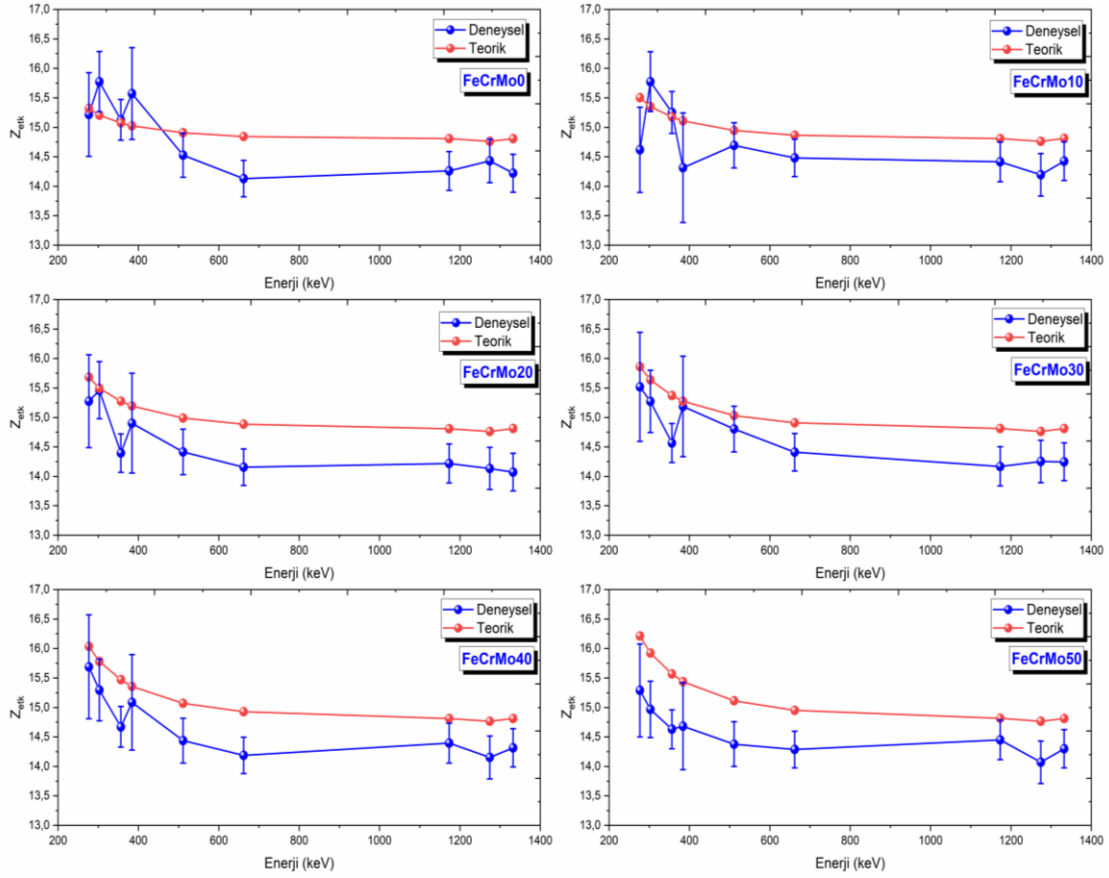
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	15,2180±0,7115	15,3219	14,6182±0,7234	15,5028	15,2769±0,7866	15,6829
302,9	15,7740±0,5109	15,2061	15,7745±0,5063	15,3514	15,4621±0,4844	15,4962
356,0	15,1259±0,3452	15,0758	15,2527±0,3532	15,1754	14,3950±0,3254	15,2748
383,9	15,5717±0,7798	15,0267	14,3164±0,9298	15,1099	14,9035±0,8460	15,1931
511,0	14,5273±0,3739	14,9077	14,6950±0,3833	14,9492	14,4144±0,3861	14,9908
661,7	14,1302±0,3095	14,8449	14,4809±0,3155	14,8661	14,1555±0,3091	14,8874
1173,2	14,2610±0,3298	14,8072	14,4141±0,3370	14,8090	14,2191±0,3305	14,8109
1274,5	14,4299±0,3673	14,7616	14,1942±0,3614	14,7625	14,1353±0,3594	14,7633
1332,5	14,2217±0,3217	14,8104	14,4274±0,3274	14,8110	14,0733±0,3202	14,8117
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik	Deneyysel	Teorik
276,4	15,5186±0,9255	15,8611	15,6898±0,8814	16,0364	15,2893±0,7872	16,2115
302,9	15,2722±0,5278	15,6398	15,2968±0,5231	15,7813	14,9659±0,4782	15,9228
356,0	14,5659±0,3304	15,3737	14,6715±0,3463	15,4713	14,6305±0,3303	15,5692
383,9	15,1876±0,8533	15,2758	15,0875±0,8102	15,3576	14,6835±0,7401	15,4396
511,0	14,8034±0,3881	15,0322	14,4368±0,3813	15,0732	14,3778±0,3800	15,1145
661,7	14,4099±0,3196	14,9085	14,1893±0,3090	14,9296	14,2870±0,3099	14,9507
1173,2	14,1705±0,3331	14,8128	14,3952±0,3365	14,8146	14,4500±0,3369	14,8165
1274,5	14,2524±0,3616	14,7641	14,1521±0,3647	14,7650	14,0711±0,3595	14,7658
1332,5	14,2474±0,3214	14,8124	14,3167±0,3242	14,8130	14,2982±0,3242	14,8137



Şekil 5.31. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.32. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.33. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin atom numarası sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.34. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları ($\times 10^{27}$) (elektron/g)

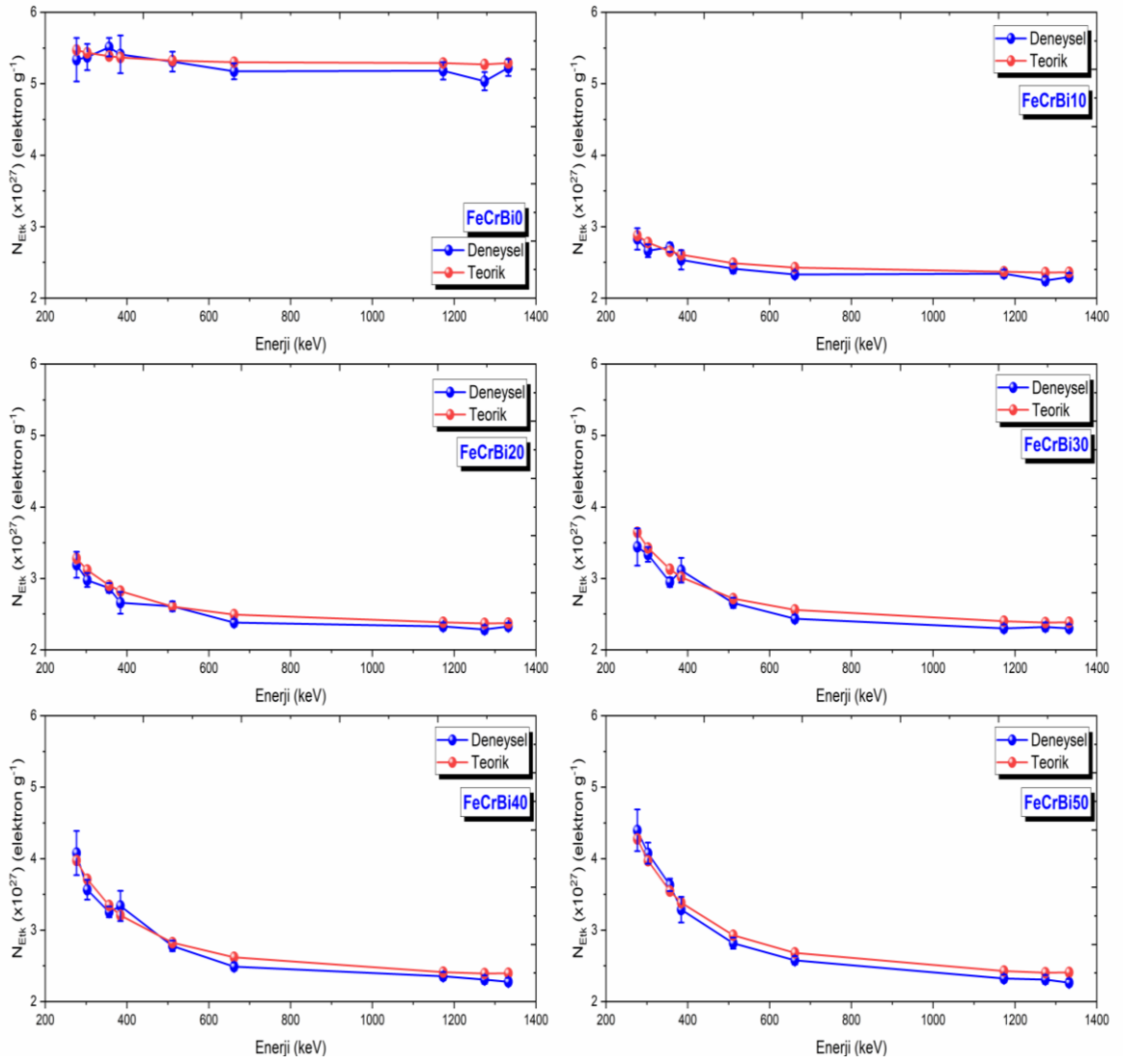
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	5,3356 $\pm$ 0,3053	5,4728	2,8297 $\pm$ 0,1504	2,8754	3,1921 $\pm$ 0,1798	3,2793
302,9	5,3740 $\pm$ 0,1827	5,4315	2,6633 $\pm$ 0,0884	2,7794	2,9775 $\pm$ 0,0972	3,1170
356,0	5,5115 $\pm$ 0,1295	5,3850	2,7124 $\pm$ 0,0631	2,6551	2,8649 $\pm$ 0,0681	2,9011
383,9	5,4111 $\pm$ 0,2647	5,3674	2,5371 $\pm$ 0,1354	2,6089	2,6579 $\pm$ 0,1534	2,8202
511,0	5,3094 $\pm$ 0,1388	5,3249	2,4124 $\pm$ 0,0647	2,4892	2,6097 $\pm$ 0,0691	2,6064
661,7	5,1748 $\pm$ 0,1130	5,3025	2,3305 $\pm$ 0,0507	2,4271	2,3802 $\pm$ 0,0523	2,4944
1173,2	5,1804 $\pm$ 0,1215	5,2890	2,3419 $\pm$ 0,0547	2,3685	2,3278 $\pm$ 0,0539	2,3843
1274,5	5,0370 $\pm$ 0,1275	5,2727	2,2458 $\pm$ 0,0579	2,3576	2,2855 $\pm$ 0,0578	2,3699
1332,5	5,2258 $\pm$ 0,1186	5,2901	2,2984 $\pm$ 0,0521	2,3643	2,3269 $\pm$ 0,0528	2,3756
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	3,4416 $\pm$ 0,2608	3,6457	4,0798 $\pm$ 0,3095	3,9754	4,3968 $\pm$ 0,2924	4,2748
302,9	3,3362 $\pm$ 0,1035	3,4275	3,5661 $\pm$ 0,1370	3,7108	4,0768 $\pm$ 0,1493	3,9717
356,0	2,9480 $\pm$ 0,0684	3,1320	3,2544 $\pm$ 0,0756	3,3466	3,6329 $\pm$ 0,0880	3,5484
383,9	3,1150 $\pm$ 0,1747	3,0198	3,3395 $\pm$ 0,2114	3,2068	3,2874 $\pm$ 0,1802	3,3839
511,0	2,6569 $\pm$ 0,0705	2,7193	2,7794 $\pm$ 0,0726	2,8271	2,8181 $\pm$ 0,0765	2,9313
661,7	2,4365 $\pm$ 0,0533	2,5597	2,4909 $\pm$ 0,0550	2,6227	2,5798 $\pm$ 0,0574	2,6842
1173,2	2,3018 $\pm$ 0,0535	2,3998	2,3564 $\pm$ 0,0549	2,4146	2,3239 $\pm$ 0,0540	2,4292
1274,5	2,3211 $\pm$ 0,0594	2,3818	2,3078 $\pm$ 0,0585	2,3932	2,3097 $\pm$ 0,0591	2,4044
1332,5	2,3025 $\pm$ 0,0522	2,3865	2,2783 $\pm$ 0,0516	2,3970	2,2662 $\pm$ 0,0515	2,4072

Tablo 5.35. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları ($\times 10^{27}$) (elektron/g)

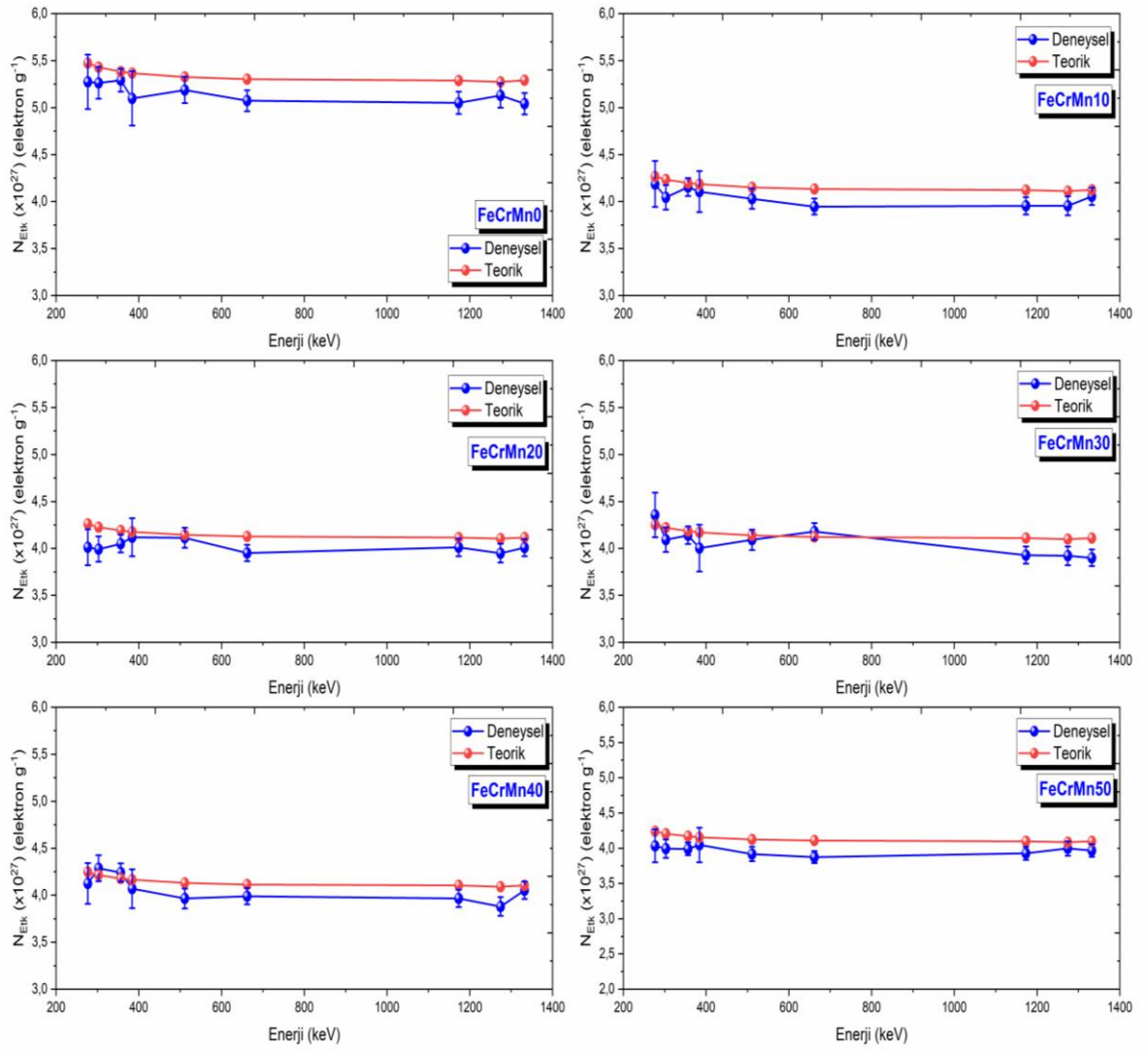
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	5,2741 $\pm$ 0,2897	5,4728	4,1872 $\pm$ 0,2454	4,2668	4,0122 $\pm$ 0,1910	4,2599
302,9	5,2637 $\pm$ 0,1696	5,4315	4,0443 $\pm$ 0,1300	4,2346	3,9928 $\pm$ 0,1345	4,2278
356,0	5,2920 $\pm$ 0,1213	5,3850	4,1546 $\pm$ 0,0951	4,1984	4,0515 $\pm$ 0,0927	4,1917
383,9	5,0974 $\pm$ 0,2882	5,3674	4,1058 $\pm$ 0,2188	4,1847	4,1195 $\pm$ 0,2034	4,1780
511,0	5,1881 $\pm$ 0,1402	5,3249	4,0311 $\pm$ 0,1082	4,1516	4,1141 $\pm$ 0,1064	4,1450
661,7	5,0736 $\pm$ 0,1109	5,3025	3,9469 $\pm$ 0,0861	4,1342	3,9509 $\pm$ 0,0873	4,1276
1173,2	5,0512 $\pm$ 0,1173	5,2890	3,9556 $\pm$ 0,0921	4,1237	4,0112 $\pm$ 0,0934	4,1172
1274,5	5,1297 $\pm$ 0,1311	5,2727	3,9544 $\pm$ 0,1015	4,1109	3,9501 $\pm$ 0,1007	4,1044
1332,5	5,0414 $\pm$ 0,1145	5,2901	4,0566 $\pm$ 0,0925	4,1245	4,0086 $\pm$ 0,0910	4,1180
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	4,3570 $\pm$ 0,2370	4,2530	4,1255 $\pm$ 0,2165	4,2462	4,0343 $\pm$ 0,2340	4,2393
302,9	4,0936 $\pm$ 0,1293	4,2210	4,2879 $\pm$ 0,1387	4,2142	3,9946 $\pm$ 0,1305	4,2074
356,0	4,1411 $\pm$ 0,0941	4,1850	4,2406 $\pm$ 0,0976	4,1783	3,9908 $\pm$ 0,0905	4,1716
383,9	4,0046 $\pm$ 0,2487	4,1714	4,0694 $\pm$ 0,2064	4,1647	4,0480 $\pm$ 0,2449	4,1580
511,0	4,0927 $\pm$ 0,1087	4,1384	3,9651 $\pm$ 0,1062	4,1318	3,9181 $\pm$ 0,1014	4,1252
661,7	4,1803 $\pm$ 0,0910	4,1211	3,9897 $\pm$ 0,0869	4,1146	3,8742 $\pm$ 0,0849	4,1081
1173,2	3,9299 $\pm$ 0,0923	4,1107	3,9673 $\pm$ 0,0925	4,1042	3,9291 $\pm$ 0,0920	4,0977
1274,5	3,9218 $\pm$ 0,0997	4,0979	3,8805 $\pm$ 0,0994	4,0914	3,9974 $\pm$ 0,1024	4,0849
1332,5	3,9005 $\pm$ 0,0885	4,1114	4,0525 $\pm$ 0,0921	4,1049	3,9679 $\pm$ 0,0897	4,0984

Tablo 5.36. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçları ($\times 10^{27}$) (elektron/g)

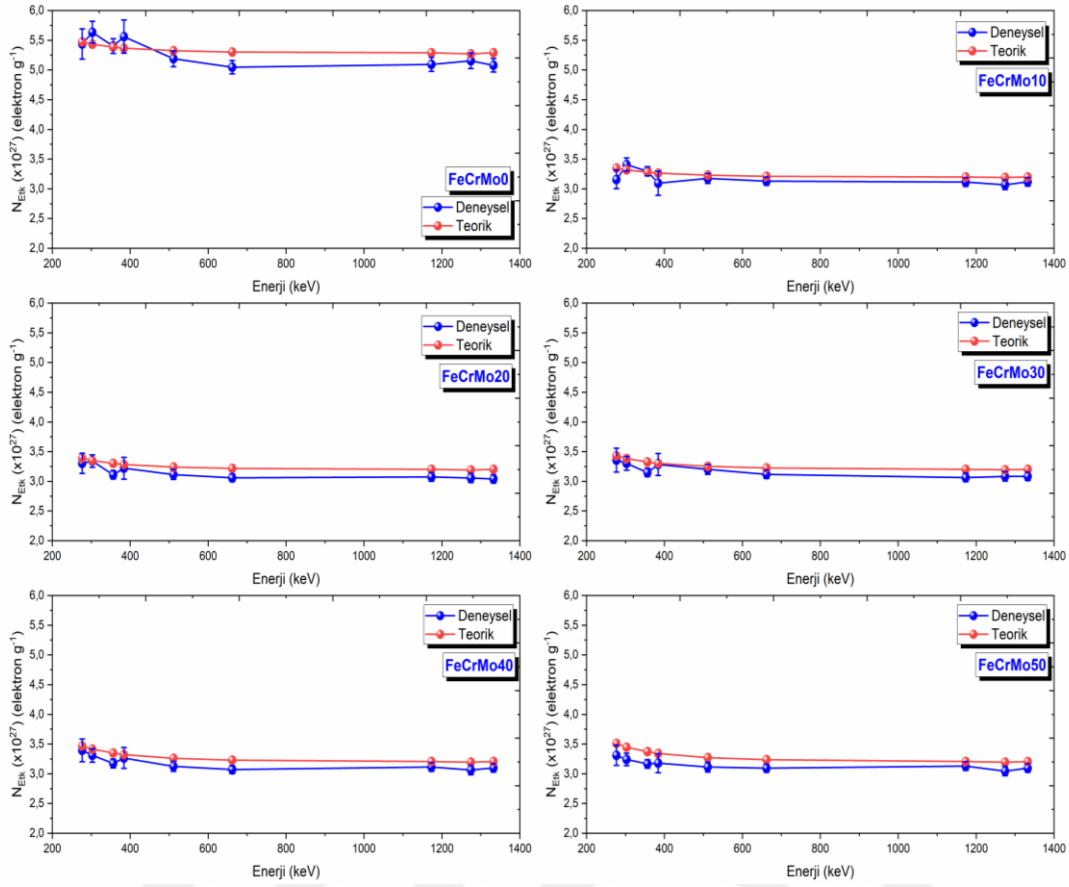
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	5,4358 $\pm$ 0,2541	5,4728	3,1590 $\pm$ 0,1563	3,3501	3,3031 $\pm$ 0,1701	3,3908
302,9	5,6343 $\pm$ 0,1825	5,4315	3,4089 $\pm$ 0,1094	3,3174	3,3431 $\pm$ 0,1047	3,3505
356,0	5,4029 $\pm$ 0,1233	5,3850	3,2961 $\pm$ 0,0763	3,2794	3,1124 $\pm$ 0,0703	3,3026
383,9	5,5621 $\pm$ 0,2785	5,3674	3,0938 $\pm$ 0,2009	3,2652	3,2223 $\pm$ 0,1829	3,2849
511,0	5,1890 $\pm$ 0,1336	5,3249	3,1756 $\pm$ 0,0828	3,2305	3,1166 $\pm$ 0,0835	3,2412
661,7	5,0472 $\pm$ 0,1105	5,3025	3,1293 $\pm$ 0,0682	3,2125	3,0606 $\pm$ 0,0668	3,2188
1173,2	5,0939 $\pm$ 0,1178	5,2890	3,1149 $\pm$ 0,0728	3,2002	3,0744 $\pm$ 0,0715	3,2023
1274,5	5,1542 $\pm$ 0,1312	5,2727	3,0673 $\pm$ 0,0781	3,1902	3,0562 $\pm$ 0,0777	3,1920
1332,5	5,0799 $\pm$ 0,1149	5,2901	3,1177 $\pm$ 0,0707	3,2006	3,0428 $\pm$ 0,0692	3,2025
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	3,3571 $\pm$ 0,2002	3,4312	3,3959 $\pm$ 0,1908	3,4710	3,3110 $\pm$ 0,1705	3,5107
302,9	3,3038 $\pm$ 0,1142	3,3833	3,3109 $\pm$ 0,1132	3,4157	3,2410 $\pm$ 0,1035	3,4482
356,0	3,1510 $\pm$ 0,0715	3,3258	3,1755 $\pm$ 0,0750	3,3486	3,1683 $\pm$ 0,0715	3,3716
383,9	3,2855 $\pm$ 0,1846	3,3046	3,2656 $\pm$ 0,1754	3,3240	3,1798 $\pm$ 0,1603	3,3435
511,0	3,2024 $\pm$ 0,0840	3,2519	3,1247 $\pm$ 0,0825	3,2625	3,1136 $\pm$ 0,0823	3,2731
661,7	3,1173 $\pm$ 0,0691	3,2251	3,0711 $\pm$ 0,0669	3,2314	3,0939 $\pm$ 0,0671	3,2377
1173,2	3,0655 $\pm$ 0,0721	3,2044	3,1157 $\pm$ 0,0728	3,2065	3,1292 $\pm$ 0,0730	3,2086
1274,5	3,0832 $\pm$ 0,0782	3,1939	3,0631 $\pm$ 0,0789	3,1958	3,0472 $\pm$ 0,0778	3,1976
1332,5	3,0821 $\pm$ 0,0695	3,2043	3,0987 $\pm$ 0,0702	3,2062	3,0964 $\pm$ 0,0702	3,2080



Şekil 5.34. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.35. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.36. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin elektron yoğunluğu sonuçlarının enerji ile değişimi

Tablo 5.37. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları ($\times 10^{10}$) (S/m)

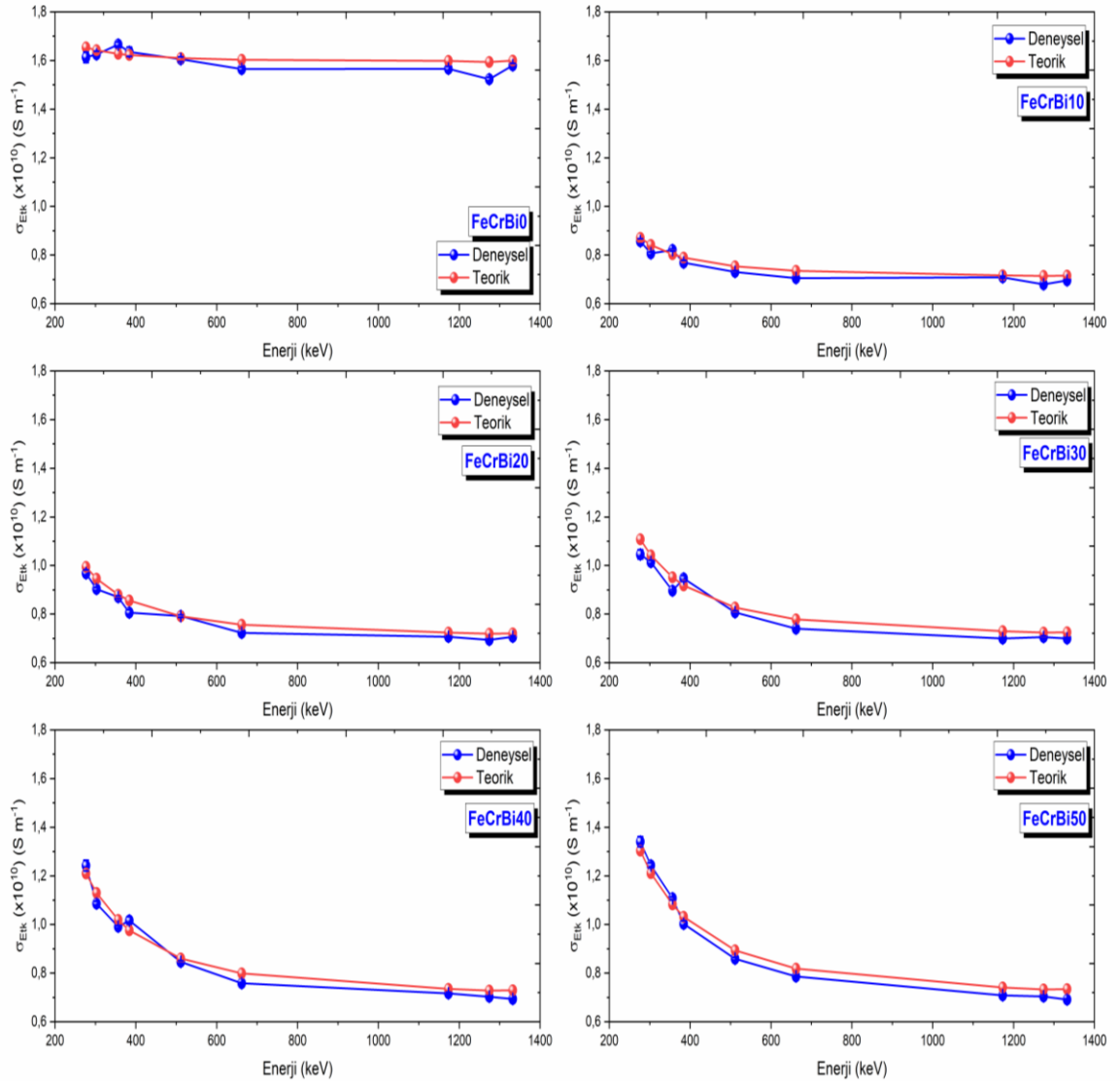
Enerji (keV)	FeCrBi0		FeCrBi10		FeCrBi20	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	1,6131 $\pm$ 0,0219	1,6546	0,8570 $\pm$ 0,0108	0,8708	0,9685 $\pm$ 0,0129	0,9949
302,9	1,6247 $\pm$ 0,0131	1,6421	0,8066 $\pm$ 0,0063	0,8418	0,9033 $\pm$ 0,0070	0,9457
356,0	1,6663 $\pm$ 0,0093	1,6281	0,8215 $\pm$ 0,0045	0,8041	0,8692 $\pm$ 0,0049	0,8802
383,9	1,6360 $\pm$ 0,0190	1,6228	0,7684 $\pm$ 0,0097	0,7901	0,8064 $\pm$ 0,0110	0,8556
511,0	1,6052 $\pm$ 0,0100	1,6099	0,7306 $\pm$ 0,0046	0,7539	0,7918 $\pm$ 0,0050	0,7908
661,7	1,5645 $\pm$ 0,0081	1,6031	0,7058 $\pm$ 0,0036	0,7351	0,7221 $\pm$ 0,0037	0,7568
1173,2	1,5662 $\pm$ 0,0087	1,5990	0,7093 $\pm$ 0,0039	0,7173	0,7062 $\pm$ 0,0039	0,7234
1274,5	1,5229 $\pm$ 0,0091	1,5941	0,6802 $\pm$ 0,0042	0,7140	0,6934 $\pm$ 0,0041	0,7190
1332,5	1,5799 $\pm$ 0,0085	1,5994	0,6961 $\pm$ 0,0037	0,7161	0,7060 $\pm$ 0,0038	0,7207
Enerji (keV)	FeCrBi30		FeCrBi40		FeCrBi50	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
276,4	1,0460 $\pm$ 0,0187	1,1080	1,2421 $\pm$ 0,0222	1,2103	1,3407 $\pm$ 0,0210	1,3035
302,9	1,0140 $\pm$ 0,0074	1,0417	1,0857 $\pm$ 0,0098	1,1298	1,2431 $\pm$ 0,0107	1,2111
356,0	0,8960 $\pm$ 0,0049	0,9519	0,9908 $\pm$ 0,0054	1,0189	1,1078 $\pm$ 0,0063	1,0820
383,9	0,9467 $\pm$ 0,0125	0,9178	1,0167 $\pm$ 0,0152	0,9763	1,0024 $\pm$ 0,0129	1,0318
511,0	0,8075 $\pm$ 0,0051	0,8265	0,8462 $\pm$ 0,0052	0,8607	0,8593 $\pm$ 0,0055	0,8938
661,7	0,7405 $\pm$ 0,0038	0,7780	0,7584 $\pm$ 0,0039	0,7985	0,7867 $\pm$ 0,0041	0,8185
1173,2	0,6996 $\pm$ 0,0038	0,7293	0,7174 $\pm$ 0,0039	0,7352	0,7086 $\pm$ 0,0039	0,7407
1274,5	0,7054 $\pm$ 0,0043	0,7239	0,7026 $\pm$ 0,0042	0,7286	0,7043 $\pm$ 0,0042	0,7332
1332,5	0,6998 $\pm$ 0,0037	0,7253	0,6937 $\pm$ 0,0037	0,7298	0,6910 $\pm$ 0,0037	0,7340

Tablo 5.38. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları ($\times 10^{10}$) (S/m)

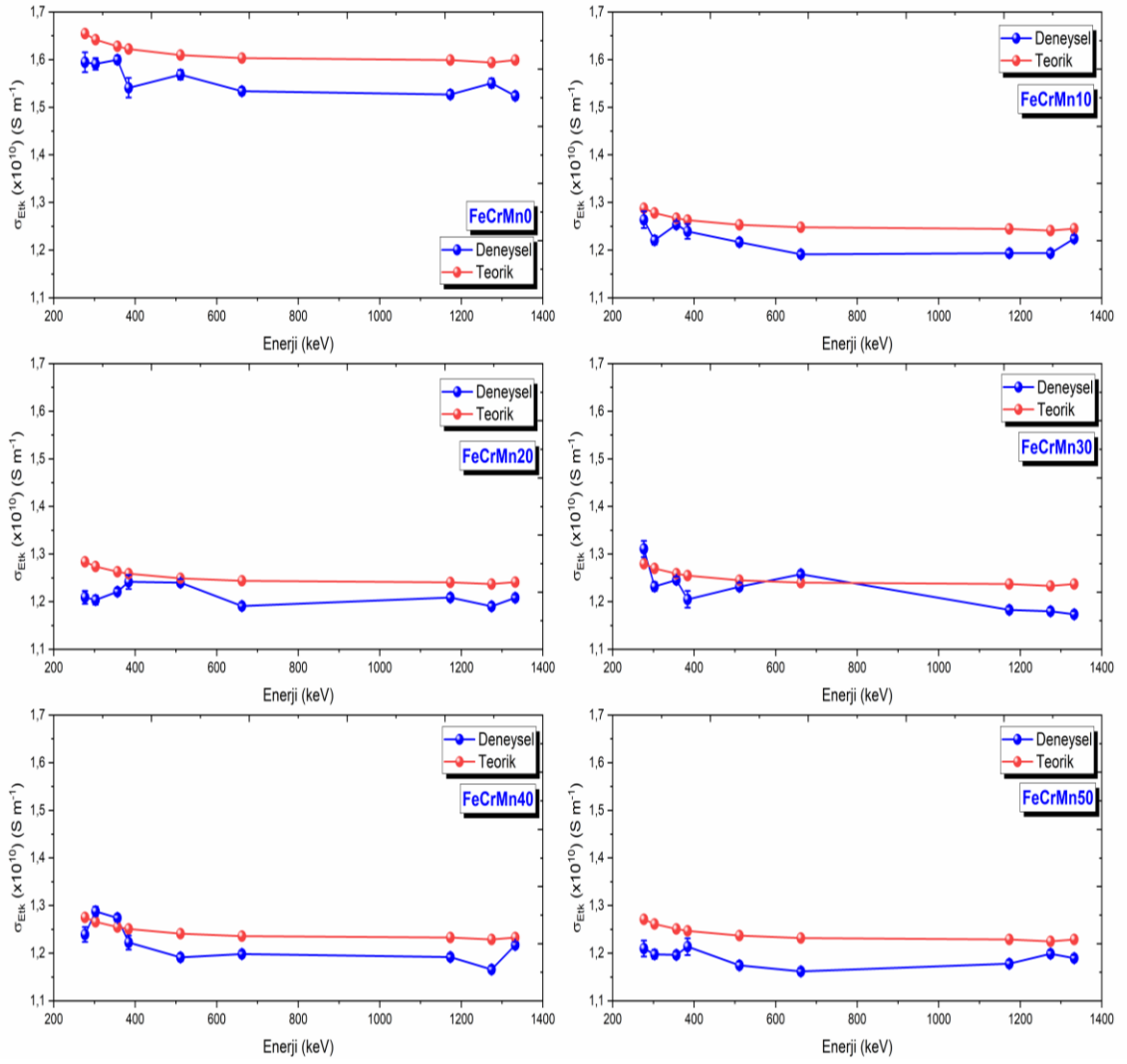
Enerji (keV)	FeCrMn0		FeCrMn10		FeCrMn20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,5945 $\pm$ 0,0208	1,6546	1,2639 $\pm$ 0,0176	1,2880	1,2092 $\pm$ 0,0137	1,2838
302,9	1,5914 $\pm$ 0,0122	1,6421	1,2208 $\pm$ 0,0093	1,2782	1,2033 $\pm$ 0,0096	1,2741
356,0	1,6000 $\pm$ 0,0087	1,6281	1,2541 $\pm$ 0,0068	1,2673	1,2210 $\pm$ 0,0066	1,2632
383,9	1,5411 $\pm$ 0,0207	1,6228	1,2393 $\pm$ 0,0157	1,2632	1,2415 $\pm$ 0,0146	1,2591
511,0	1,5685 $\pm$ 0,0101	1,6099	1,2168 $\pm$ 0,0078	1,2532	1,2399 $\pm$ 0,0076	1,2492
661,7	1,5339 $\pm$ 0,0080	1,6031	1,1914 $\pm$ 0,0062	1,2479	1,1907 $\pm$ 0,0063	1,2439
1173,2	1,5272 $\pm$ 0,0084	1,5990	1,1940 $\pm$ 0,0066	1,2447	1,2088 $\pm$ 0,0067	1,2408
1274,5	1,5509 $\pm$ 0,0094	1,5941	1,1936 $\pm$ 0,0073	1,2409	1,1904 $\pm$ 0,0072	1,2369
1332,5	1,5242 $\pm$ 0,0082	1,5994	1,2245 $\pm$ 0,0066	1,2450	1,2081 $\pm$ 0,0065	1,2410
Enerji (keV)	FeCrMn30		FeCrMn40		FeCrMn50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,3110 $\pm$ 0,0170	1,2797	1,2393 $\pm$ 0,0155	1,2756	1,2097 $\pm$ 0,0168	1,2712
302,9	1,2317 $\pm$ 0,0093	1,2700	1,2881 $\pm$ 0,0099	1,2660	1,1978 $\pm$ 0,0094	1,2617
356,0	1,2460 $\pm$ 0,0068	1,2592	1,2739 $\pm$ 0,0070	1,2552	1,1967 $\pm$ 0,0065	1,2509
383,9	1,2049 $\pm$ 0,0178	1,2551	1,2225 $\pm$ 0,0148	1,2511	1,2139 $\pm$ 0,0176	1,2469
511,0	1,2314 $\pm$ 0,0078	1,2452	1,1911 $\pm$ 0,0076	1,2412	1,1749 $\pm$ 0,0073	1,2370
661,7	1,2578 $\pm$ 0,0065	1,2400	1,1985 $\pm$ 0,0062	1,2361	1,1617 $\pm$ 0,0061	1,2319
1173,2	1,1825 $\pm$ 0,0066	1,2369	1,1918 $\pm$ 0,0066	1,2330	1,1782 $\pm$ 0,0066	1,2288
1274,5	1,1800 $\pm$ 0,0072	1,2330	1,1657 $\pm$ 0,0071	1,2291	1,1987 $\pm$ 0,0073	1,2249
1332,5	1,1736 $\pm$ 0,0063	1,2371	1,2174 $\pm$ 0,0066	1,2332	1,1899 $\pm$ 0,0064	1,2290

Tablo 5.39. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçları ($\times 10^{10}$) (S/m)

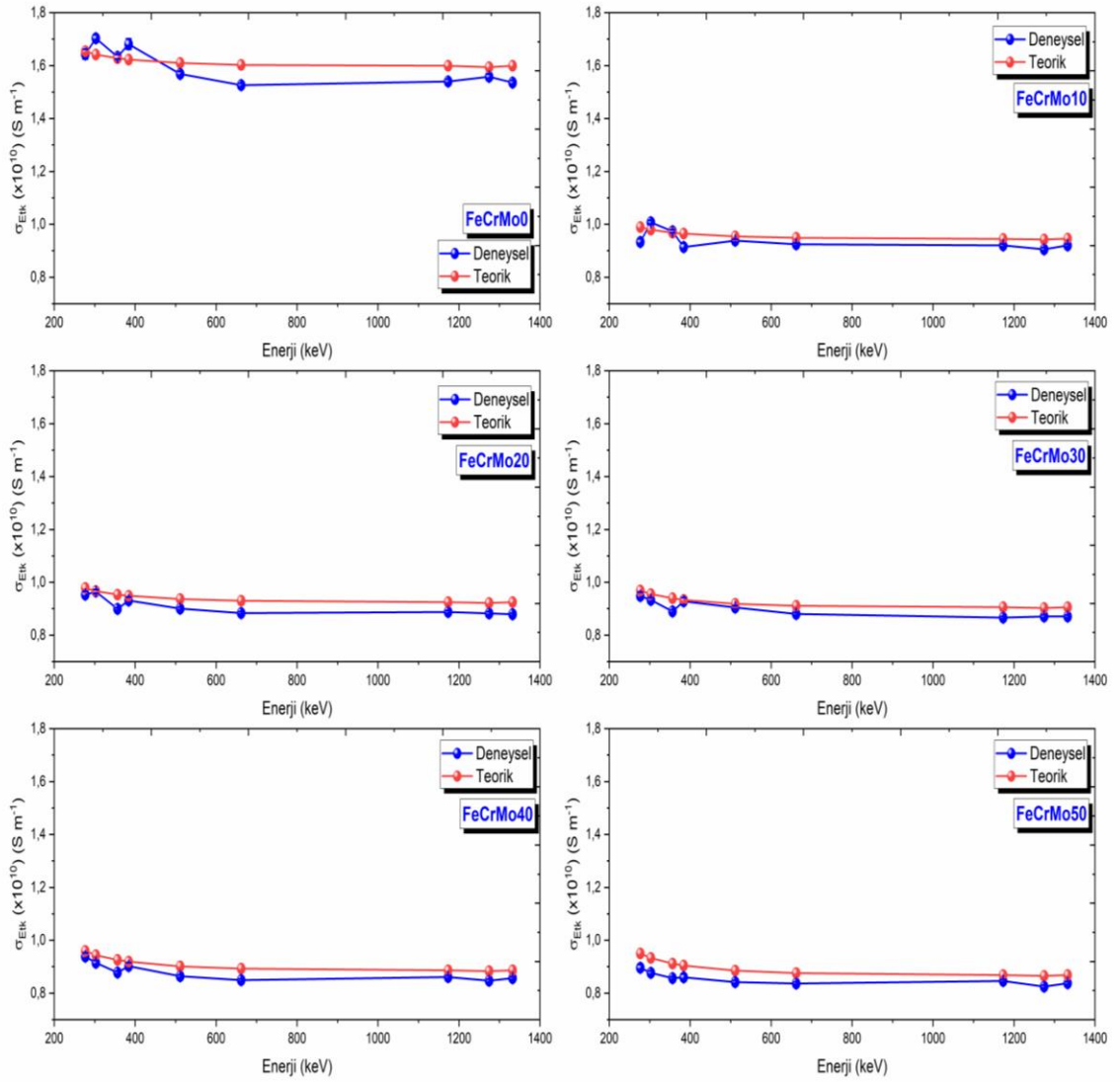
Enerji (keV)	FeCrMo0		FeCrMo10		FeCrMo20	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	1,6434 $\pm$ 0,0182	1,6546	0,9333 $\pm$ 0,0112	0,9898	0,9540 $\pm$ 0,0122	0,9794
302,9	1,7035 $\pm$ 0,0131	1,6421	1,0071 $\pm$ 0,0078	0,9801	0,9656 $\pm$ 0,0075	0,9677
356,0	1,6335 $\pm$ 0,0088	1,6281	0,9738 $\pm$ 0,0055	0,9689	0,8990 $\pm$ 0,0050	0,9539
383,9	1,6816 $\pm$ 0,0200	1,6228	0,9141 $\pm$ 0,0144	0,9647	0,9307 $\pm$ 0,0131	0,9488
511,0	1,5688 $\pm$ 0,0096	1,6099	0,9382 $\pm$ 0,0059	0,9545	0,9002 $\pm$ 0,0060	0,9362
661,7	1,5259 $\pm$ 0,0079	1,6031	0,9246 $\pm$ 0,0049	0,9492	0,8840 $\pm$ 0,0048	0,9297
1173,2	1,5401 $\pm$ 0,0085	1,5990	0,9203 $\pm$ 0,0052	0,9455	0,8880 $\pm$ 0,0051	0,9249
1274,5	1,5583 $\pm$ 0,0094	1,5941	0,9063 $\pm$ 0,0056	0,9425	0,8828 $\pm$ 0,0056	0,9220
1332,5	1,5358 $\pm$ 0,0082	1,5994	0,9211 $\pm$ 0,0051	0,9456	0,8789 $\pm$ 0,0050	0,9250
Enerji (keV)	FeCrMo30		FeCrMo40		FeCrMo50	
	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik	Deneyssel	Teorik
276,4	0,9484 $\pm$ 0,0144	0,9694	0,9390 $\pm$ 0,0137	0,9597	0,8961 $\pm$ 0,0122	0,9501
302,9	0,9334 $\pm$ 0,0082	0,9558	0,9154 $\pm$ 0,0081	0,9444	0,8771 $\pm$ 0,0074	0,9332
356,0	0,8902 $\pm$ 0,0051	0,9396	0,8780 $\pm$ 0,0054	0,9259	0,8574 $\pm$ 0,0051	0,9125
383,9	0,9282 $\pm$ 0,0132	0,9336	0,9029 $\pm$ 0,0126	0,9191	0,8605 $\pm$ 0,0115	0,9049
511,0	0,9047 $\pm$ 0,0060	0,9187	0,8640 $\pm$ 0,0059	0,9021	0,8426 $\pm$ 0,0059	0,8858
661,7	0,8807 $\pm$ 0,0050	0,9111	0,8492 $\pm$ 0,0048	0,8935	0,8373 $\pm$ 0,0048	0,8762
1173,2	0,8660 $\pm$ 0,0052	0,9053	0,8615 $\pm$ 0,0052	0,8866	0,8469 $\pm$ 0,0052	0,8683
1274,5	0,8710 $\pm$ 0,0056	0,9023	0,8469 $\pm$ 0,0057	0,8836	0,8247 $\pm$ 0,0056	0,8654
1332,5	0,8707 $\pm$ 0,0050	0,9053	0,8568 $\pm$ 0,0050	0,8865	0,8380 $\pm$ 0,0050	0,8682



Şekil 5.37. FeCrBi kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.38. FeCrMn kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi



Şekil 5.39. FeCrMo kodlu üçlü kompozitlere ait etkin iletkenlik sonuçlarının enerji ile değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin gama radyasyonu azaltma özelliklerini incelemek için radyasyon koruma verimleri, radyasyon geçirme oranı, kütle azaltma katsayıları, lineer azaltma katsayıları, yarı kalınlık değerleri, onda-bir kalınlık değerleri, ortalama serbest yol değerleri, moleküler tesir kesitleri, atomik tesir kesitleri, elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları, etkin elektron yoğunlukları ve etkin iletkenlik parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 276,4 keV ile 1332,5 keV foton enerjisi aralığında Na-22, Co-60, Ba-133 ve Cs-137 radyoaktif kaynaklarından yayımlanan enerjilerde ve HPGe detektör yardımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir deneysel sonuç teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak deneysel ve teorik veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin radyasyon zırlama özelliklerini belirlemek için incelenen ilk parametre radyasyon koruma verimidir ve bu parametre sadece deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 5.1-5.3'te ve Tablo 5.1-5.3'te FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış numunelere ait deneysel radyasyon koruma verimi sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, ağırlıkça %50 oranında güçlendirilmiş polimer kompozitlerin genellikle daha iyi bir zırlama malzemesi olduğu görülmektedir. Bunlar arasında FeCrBi50 kodlu numunenin diğer numunelere göre daha iyi bir zırlama malzemesi olduğu görülmektedir. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi FeCrMn30 kodlu numune yüksek enerjilerde, FeCrMn20 kodlu numune düşük enerjide daha iyi bir zırlama malzeme olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi FeCrMo30 kodlu kompozitin yüksek enerjilerde de düşük enerjide de daha iyi bir zırlama malzeme olduğu gözlenmiştir. İlgili şekillerden gözlemlenen diğer bir durum ise artan enerji ile radyasyon koruma verimi parametresinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.4-5.6'da radyasyon koruma veriminin tersi diyebileceğimiz radyasyon geçirme oranının deneysel verileri sunulmuştur. Tablo 5.4-5.6'da ise bu parametreye ait sonuçlar listelenmiştir. Bu parametre radyasyon koruma veriminin tersi olduğu için sonuçlar incelendiğinde beklenildiği gibi artan enerji ile arttığı ve artan katkılama miktarı ile genellikle azaldığı gözlemlenmiştir. Bu parametrede de radyasyon

koruma veriminde olduğu gibi FeCrBi50 kodlu numunenin diğer numunelere göre daha iyi bir zırhlama malzemesi olduğu görülmektedir.

Maddenin fiziksel halinden ve yoğunluğundan bağımsız ve radyasyon zırhlama çalışmalarında öncü parametre olan kütle azaltma katsayısı sonuçları deneysel olarak ve teorik olarak Şekil 5.7-5.9'da sunulmuş ve sonuçlar Tablo 5.7-5.9'da listelenmiştir. Bu parametre belirlendikten sonra bunlar yardımıyla lineer azaltma katsayısı, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik, yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol gibi birçok parametre belirlenebilir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin ait deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı sonuçları 276,4 keV ile 1332,5 keV foton enerjisi aralığında Şekil 5.7-5.9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kütle azaltma katsayılarının artan enerji ile azaldığı ve artan katkılama miktarı ile genellikle arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayılarında düşük enerji bölgesinde keskin bir azalış gözlemlenirken yüksek enerji bölgelerinde ise gözlemlenen azalış daha azdır. Özellikle Şekil 5.7'de FeCrBi ile kodlanmış polimer kompozitlerde düşük enerji bölgesinde keskin bir azalışın belirgin olduğu, yüksek enerjide ise gözlemlenen azalışın hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.7'de FeCrBi ile kodlanmış polimer kompozitlerin düşük enerjide deneysel ve teorik kütle azaltma katsayı sonuçları katkılama oranındaki artış ile arttığı görülmektedir. Ayrıca yine aynı şekilde artan enerji ile kütle azaltma katsayılarının azaldığı açıkça görülmektedir. Bu değişimlerin sebebi, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik tesir kesiti daha baskın iken orta ve yüksek enerji bölgelerinde Compton saçılması tesir kesiti ve çift oluşum tesir kesiti daha baskın olmasıdır. Fotoelektrik tesir kesiti Z^{4-5} (Z, atom numarası) ve $E^{-3,5}$ (E, foton enerjisi) ile, Compton saçılması tesir kesiti Z ve E^{-1} ile ve çift oluşum tesir kesiti Z^2 ve E ile orantılıdır. Bu bağımlılıklarda düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki azalmaları açıklamaktadır. Çalışılan tüm numuneler içinde FeCrBi50 kodlu numunenin en iyi kütle azaltma katsayılarına sahip olduğu ve bu yüzden de en iyi radyasyon zırhlama malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. İlgili şekillerden de görüleceği gibi üretilen kompozitlerin düşük enerji bölgesinde daha iyi bir zırhlama malzemesi olabileceği aşıkardır.

Kütle azaltma katsayısı kullanılarak farklı oranlarda ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için belirlenen sonraki parametre lineer azaltma katsayısıdır. Bu parametrede numunenin yoğunluğu da etkili olduğu için kullanışlı bir parametredir. Sunulan çalışmada güçlendirilmiş kompozitlerin lineer azaltma katsayıları, kütle azaltma katsayılarının numunenin yoğunluğu ile çarpılmasıyla belirlenmiştir. Elde edilen deneysel ve teorik lineer azaltma katsayıları FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo kodlu kompozitler için Şekil 5.10-5.12’de ve Tablo 5.10-5.12’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.10-5.12 incelendiğinde artan enerji ile lineer azaltma katsayısının genellikle azaldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo kodlu kompozitler için lineer azaltma katsayısının düşük enerji bölgesinde keskin azaldığı, daha sonraki enerji bölgelerindeki düşüşün daha az olduğu Tablo 5.10-5.12’deki sonuçlardan görülmektedir. FeCrBi ile kodlanmış kompozitler için özellikle düşük enerjide artan katkılama miktarı ile lineer azaltma katsayısının arttığı, yüksek enerjide ise artışın daha az olduğu gözlemlenmiştir. FeCrMn ve FeCrMo ile kodlanmış kompozitler için ise artan katkılama miktarı ile lineer azaltma katsayısının baskın bir şekilde değişmediği gözlemlenmiştir. Kütle azaltma katsayılarında da bahsedildiği gibi bu azalmalar ilgili bölgeye göre fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitlerinin baskınlığına göre değişmektedir. Şekil 5.10’da görüldüğü gibi FeCrBi50 kodlu kompozitin, diğer kompozitlere göre daha iyi bir radyasyon zırhlama malzemesi olduğu aşıkardır.

Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini incelemek için belirlenen sonraki parametreler daha pratik bilgiler sunması açısından ve lineer azaltma katsayısına bağlı olan yarı kalınlık değeri, onda-bir kalınlık değeri ve serbest ortalama yol parametreleridir. Bu parametreler ile lineer azaltma katsayısı arasında ters bir orantı vardır. FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış kompozitlerin yarı kalınlık değerleri Şekil 5.13-5.15’te ve Tablo 5.13-5.15’te; onda-bir kalınlık değerleri Şekil 5.16-5.18’de ve Tablo 5.16-5.18’de; ortalama serbest yol değerleri Şekil 5.19-5.21’de ve Tablo 5.19-5.21’de sunulmuştur. Yarı kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin yarıya düşmesi için gerekli numune kalınlığı, onda-bir kalınlık değeri başlangıç radyasyon şiddetinin %90’nını soğurmak için gerekli numune kalınlığı iken serbest ortalama yol başlangıç radyasyon şiddetinin

%36,8'sinin geçebileceği numune kalınlığı olarak ifade edilir. Tanımlardan da anlaşılacağı gibi bu parametreler ne kadar küçük olursa numunenin radyasyon zırhlama özelliği de o kadar iyi olacaktır. Bu parametrelere ait sonuçlar Şekil 5.13-5.21'de ve Tablo 5.13-5.21'de incelendiğinde artan foton enerjisi ile yarı kalınlık değerlerinin, onda-bir kalınlık değerlerinin ve serbest ortalama yol değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yine aynı şekillerden de görülebileceği gibi FeCrBi olarak kodlanmış kompozitlerin artan katkılama miktarına göre yarı kalınlık değerlerinin, onda-bir kalınlık değerlerinin ve serbest ortalama yol değerlerinin genellikle azaldığı görülmektedir. Bu durum, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış kompozitler için de yarı kalınlık, onda-bir kalınlık ve serbest ortalama yol değerlerinin genellikle benzer eğilimlere sahip olduğu görülmüştür. FeCrBi50 olarak kodlanmış polimer kompozitin diğerlerine göre daha iyi bir radyasyon zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir.

Bir malzemenin radyasyon zırhlama özelliğini incelemek için tercih edilebilecek diğer parametreler içerisinde moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri parametreleri tercih edilebilir. Moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla gelen foton enerjisinde numuneye ait molekül ile fotonun, atom ile fotonun ve elektron ile fotonun etkileşmesinin olasılığını belirten parametrelerdir. Dolayısıyla, gelen foton ile molekülün, atomun veya elektronun etkileşme olasılığı ne kadar büyük olursa malzemenin radyasyonu azaltma kabiliyeti de o kadar iyi olacaktır. Bu parametreler kütle azaltma katsayısı kullanılarak belirlenebilen ve etkin atom numarası, elektron yoğunluğu ve iletkenlik gibi parametrelerin hesabında kullanılan parametrelerdir. Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin 276,4 keV ile 1332,5 keV foton enerji aralığında moleküler, atomik ve elektronik tesir kesitleri sırasıyla Tablo 5.22-5.24'de ve Şekil 5.22-5.24'de deneysel ve teorik; Tablo 5.25-5.27'de ve Şekil 5.25-5.27'de deneysel ve teorik; Tablo 5.28-5.30'da ve Şekil 5.28-5.30'da teorik olarak sunulmuştur. İlgili şekillerden görülebileceği gibi her üç tesir kesiti için de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Yani, her üç tesir kesiti, artan foton enerjisi ile genellikle azalmakta ve artan katkılama oranı ile genellikle artmaktadır. Düşük, orta ve yüksek enerji bölgelerindeki ani ve düzgün azalmaların sebebi kütle azaltma katsayılarında da bahsedildiği gibi fotoelektrik, Compton saçılma ve çift oluşum tesir kesitleridir. FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış kompozitlerden FeCrBi50 olarak kodlanan kompozitin düşük enerji bölgesinde yüksek moleküler, atomik ve elektronik tesir

kesitlerine sahip olduğu ilgili şekil ve tablolardan görülmektedir. Dolayısıyla bu kompozit diğerlerinden daha iyi bir gama radyasyonu zırhlama malzemesidir. Bu tesir kesitlerinden gözlemlenen bir diğer nokta, önceki parametrelerde de gözlemlendiği gibi düşük enerji bölgesinde bütün numuneler iyi bir radyasyon zırh malzemesidir.

Ferro-krom ve manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür ile güçlendirilmiş üçlü kompozitlerin radyasyon zırhlama özelliklerini belirlemek için incelenen son üç parametre etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenliktir. Bu parametreler ne kadar yüksekse numunenin radyasyon zırhlama özelliği de o derece iyi olacaktır. Bu parametrelerden etkin iletkenlik, elektriksel iletkenliği göz önüne alındığı alanlarda ayrı bir öneme sahiptir. Etkin atom numarası, atomik ve elektronik tesir kesitleri yardımıyla belirlenebilen bir parametredir. Etkin elektron yoğunluğu, etkin atom numarası yardımı ile etkin iletkenlik ise etkin elektron yoğunluğu yardımıyla belirlenen parametrelerdir. Yani bu parametreler birbiri ile doğrudan ilişkilidir.

FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanan polimer kompozitler için 276,4 keV ile 1332,5 keV foton enerji aralığında etkin atom numaraları Tablo 5.31-5.33'te ve Şekil 5.31-5.33'te, etkin elektron yoğunlukları Tablo 5.34-5.36'da ve Şekil 5.34-5.36'da ve etkin iletkenlik sonuçları Tablo 5.37-5.39'da ve Şekil 5.37-Şekil 5.39'da teorik ve deneysel olarak sunulmuştur. Şekil 5.31'de FeCrBi kodlu polimer kompozitlerin etkin atom numarasına ait sonuçların, düşük enerjilerde artan katkılama oranının artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Yani düşük enerjilerde FeCrBi50 kodlu kompozite ait etkin atom numarası en büyük değere sahip olduğu gözlenmiştir. FeCrBi0 kodlu polimer kompozite ait etkin atom numaralarının düşük enerjide de yüksek enerjide de hemen hemen aynı değere sahip olduğu gözlenmiştir. Yani gama radyasyonu zırhlama özelliğinde önemli değişiklikler gözlenmemiştir. FeCrBi kodlu polimer kompozitlere ait etkin atom numaralarının foton enerjisinin artmasıyla azaldığı ve teorik ve deneysel sonuçlar arasında uyum olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.32'de FeCrMn kodlu polimer kompozitlerin etkin atom numaralarının katkılama oranı ile önemli derecede değişmediği gözlenmiştir. Şekil 5.33'te de FeCrMo kodlu polimer kompozitlerin etkin atom numaralarının katkılama oranı ile önemli derecede değişmediği gözlenmiştir. FeCrBi, FeCrMn ve FeCrMo olarak kodlanmış polimer kompozitler arasında, etkin atom numarasına göre en iyi gama radyasyonu zırh malzemelerinin FeCrBi kodlu numunelere ait olduğu ve FeCrBi kodlu kompozitler

arasında ise FeCrBi50 olarak kodlanmış kompozitin diğerlerinden daha iyi bir gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu ilgili şekiller ve tablolardan gözlemlenmiştir. Etkin atom numarası, etkin elektron yoğunluğu ve etkin iletkenlik parametreleri direkt olarak birbirine bağlı parametrelerdir. Etkin elektron yoğunluğu numunenin içindeki elementlerin atomik ağırlıkları toplamı ile ilişkili olduğundan bu parametrelerde farklı bir durum gözlemlenmiştir. Benzer durum etkin elektron yoğunluğuna bağlı olan etkin iletkenlik sonuçlarında da görülmüştür. Bu iki parametrelere göre sadece FeCr ile katkılanmış yani FeCrBi0, FeCrMn0 ve FeCrMo0 kodlu kompozitlerin daha iyi radyasyon zırh malzemesi olduğu görülmüştür. Ancak, manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür'ün katkılanmaya başladığı FeCrBi10, FeCrMn10 ve FeCrMo10 kompozitleri ile FeCrBi50, FeCrMn50 ve FeCrMo50 kompozitleri etkin elektron yoğunluğu ve iletkenlik parametreleri açısından karşılaştırıldığında FeCrBi50 kodlu kompozitin diğer parametrelerde olduğu gibi en iyi gama radyasyonu zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, yani manganez, molibden disülfür veya bizmut oksiklorür'ün katkılanmadığı kompozitlerin iyi zırh malzemesi olarak gözlemlenmesinin sebebi atom sayılarının hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Atom sayıları belirlenirken katkılama yapılan ve yapılmayan kompozitlerin farklı sayıda ve farklı elementlere sahip olmalarıdır. Atom sayıları kompozit içindeki elementlerin en düşük yüzde içeriğine bağlı olarak normalize edildiğinden böyle bir farklılığın ortalığa çıktığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, üretilen üçlü kompozitler içinde FeCrBi50 kodlu numunenin incelenen bütün gama radyasyonu parametreleri açısından en iyi zırh malzemesi olduğu gözlemlenmiştir. Nükleer santraller, radyasyonla ilgili hastane üniteleri ve araştırma laboratuvarları gibi radyasyondan korunmanın hayati önem taşıdığı ortamlarda bu kompozitin kullanımı geleneksel zırh malzemeleri alternatif olarak sunulabilir.

KAYNAKLAR

Abualroos, N. J., Yaacob, K. A., and Zainon, R. (2023). Radiation attenuation effectiveness of polymer-based radiation shielding materials for gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 111070.

Abulyazied, D. E., Issa, S. A., Alrowaily, A. W., Saudi, H. A., Zakaly, H. M., and Ali, E. S. (2023). Polylactic acid tungsten trioxide reinforced composites: A study of their thermal, optical, and gamma radiation attenuation performance. *Radiation Physics and Chemistry*, 205, 110705.

Adlienė, D., Gilys, L., and Griškonis, E. (2020). Development and characterization of new tungsten and tantalum containing composites for radiation shielding in medicine. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 467, 21-26.

Ahmed, B., Shah, G. B., Malik, A. H., and Rizwan, M. (2020). Gamma-ray shielding characteristics of flexible silicone tungsten composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 155, 108901.

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

Akman, F., Ogul, H., Kaçal, M. R., Polat, H., Dilsiz, K., and Turhan, M. F. (2020b). Impact of lead (II) iodide on radiation shielding properties of polyester composites. *Applied Physics A*, 126(4), 1-9.

Akman, F., Kaçal, M. R., Polat, H., Aktas, G., Gultekin, A., and Agar, O. (2021a). A comparative study on the nuclear shielding properties of BiBr₃ and PbSO₄ incorporated composites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 152, 109978.

Akman, F., Ogul, H., Kaçal, M. R., Polat, H., Dilsiz, K., and Agar, O. (2021b). Gamma attenuation characteristics of CdTe-doped polyester composites. *Progress in Nuclear Energy*, 131, 103608.

Akman, F., Ozkan, I., Kaçal, M. R., Polat, H., Issa, S. A., Tekin, H. O., and Agar, O. (2021c). Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 167, 109470.

Akman, F., Ogul, H., Ozkan, I., Kaçal, M. R., Agar, O., Polat, H., and Dilsiz, K. (2022). Study on gamma radiation attenuation and non-ionizing shielding effectiveness of niobium-reinforced novel polymer composite. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(1), 283-292.

Akman, F., Sayyed, M. I., Kaçal, M. R., and Tekin, H. O. (2019). Investigation of photon shielding performances of some selected alloys by experimental data, theoretical and MCNPX code in the energy range of 81 keV–1333 keV. *Journal of Alloys and Compounds*, 772, 516-524.

Aldhuhaibat, M. J., Amana, M. S., Jubier, N. J., and Salim, A. A. (2021). Improved gamma radiation shielding traits of epoxy composites: Evaluation of mass attenuation coefficient, effective atomic and electron number. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109183.

ALMisned, G., Akman, F., AbuShanab, W. S., Tekin, H. O., Kaçal, M. R., Issa, S. A., Polat, H., Oltulu, M., Ene, A., and Zakaly, H. M. (2021). Novel Cu/Zn reinforced polymer composites: Experimental characterization for radiation protection efficiency (RPE) and shielding properties for alpha, proton, neutron, and gamma radiations. *Polymers*, 13(18), 3157.

Ambika, M. R., Nagaiah, N., Harish, V., Lokanath, N. K., Sridhar, M. A., Renukappa, N. M., and Suman, S. K. (2017). Preparation and characterisation of Isophthalic-Bi₂O₃ polymer composite gamma radiation shields. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 351-358.

Azman, N. N., Siddiqui, S. A., and Low, I. M. (2013). Characterisation of micro-sized and nano- sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays. *Materials Science and Engineering: C*, 33(8), 4952-4957.

Bagheri, K., Razavi, S. M., Ahmadi, S. J., Kosari, M., and Abolghasemi, H. (2018). Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated polyester/nanoclay/PbO composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 146, 5-10.

Baykara, O., İrim, Ş. G., Wis, A. A., Keskin, M. A., Ozkoc, G., Avcı, A., and Doğru, M. (2020). Polyimide nanocomposites in ternary structure: “A novel simultaneous neutron and gamma- ray shielding material”. *Polymers for Advanced Technologies*, 31(11), 2466-2479.

Bayoumi, E. E., Abd El-Magied, M. O., Elshehy, E. A., Atia, B. M., Mahmoud, K. A., Khalil, L. H., and Mohamed, A. A. (2022). Lead–bismuth tungstate composite as a protective barrier against gamma rays. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125262.

Belgin, E. E., Aycik, G. A., Kalemtaş, A., Pelit, A., Dilek, D. A., and Kavak, M. T. (2015). Preparation and characterization of a novel ionizing electromagnetic radiation shielding material: hematite filled polyester based composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 115, 43-48.

Cao, D., Yang, G., Bourham, M., and Moneghan, D. (2020). Gamma radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate)/Bi₂O₃ composites. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(11), 2613-2619.

Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X., and Zhang, W. (2015). 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*, 356, 88-93.

Cherkashina, N. I., Pavlenko, V. I., and Noskov, A. V. (2019). Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 159, 111-117.

Choudhary, M. D., Akkurt, I., Almisned, G., and Tekin, H. O. (2022). Radiation-shielding properties of titanium dioxide-added composites. *Emerging Materials Research*, 11(3), 319-324.

Dilsiz, K., Ogul, H., Akman, F., Agar, O., Kaçal, M. R., Polat, H., and Dursun, İ. (2021). Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865.

El-Toony, M. M., Eid, G., Algarni, H. M., Alhuwaymel, T. F., and Abel-Hady, E. E. (2020). Synthesis and characterisation of smart poly vinyl ester/Pb₂O₃ nanocomposite for gamma radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 168, 108536.

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

Erwina, D., Heryanto, H., and Tahir, D. (2023). Composite cellulose/Fe₃O₄/Cu for effective X-ray radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 210, 111053.

Fan, G. H., Geng, L., Wang, G. S., and Zheng, Z. Z. (2009). A novel radiation protection material: BaPbO₃/Al composite. *Materials and Design*, 30(3), 862-866.

Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., and Leving, H. (2001). X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM. *Radiation Physics and Chemistry*, 60(1-2), 23-24.

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

Gilys, L., Griškonis, E., Griškevičius, P., and Adlienė, D. (2022). Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding. *Polymers*, 14(9), 1696.

Gruppen, C. (2010). *Introduction to radiation protection: practical knowledge for handling radioactive sources*. Springer science and Business media.

Harish, V., Nagaiah, N., Prabhu, T. N., and Varughese, K. T. (2009). Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1503- 1508.

Hosseini, M. A., Malekie, S., and Kazemi, F. (2021). Experimental evaluation of gamma radiation shielding characteristics of Polyvinyl Alcohol/Tungsten oxide composite: A comparison study of micro and nano sizes of the fillers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1026, 166214.

Intom, S., Kalkornsurapranee, E., Johns, J., Kaewjaeng, S., Kothan, S., Hongtong, W., Chaiphaksa, W., and Kaewkhao, J. (2020). Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi_2O_3 composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 172, 108772.

Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Akman, F., and Polat, H. (2021). Analysis of radiation attenuation properties for Polyester/ Li_2WO_4 composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109257.

Kaçal, M. R., Polat, H., Oltulu, M., Akman, F., Agar, O., and Tekin, H. O. (2020). Gamma shielding and compressive strength analyses of polyester composites reinforced with zinc: an experiment, theoretical, and simulation based study. *Applied Physics A*, 126(3), 1-15.

Kavanoz, H. B., Akçalı, Ö., Toker, O., Bilmez, B., Çağlar, M., and İçelli, O. (2019). A novel comprehensive utilization of vanadium slag/epoxy resin/antimony trioxide ternary composite as gamma ray shielding material by MCNP 6.2 and BXCOR. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108446.

Kiani, M. A., Ahmadi, S. J., Outokesh, M., Adeli, R., and Kiani, H. (2019). Study on physico- mechanical and gamma-ray shielding characteristics of new ternary nanocomposites. *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 141-148.

Kilicoglu, O., More, C. V., Akman, F., Dilsiz, K., Oğul, H., Kaçal, M. R., Polat, H., and Agar, O. (2022). Micro Pb filled polymer composites: Theoretical, experimental and simulation results for γ -ray shielding performance. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110039.

Körpınar, B., Öztürk, B. C., Çam, N. F., and Akat, H. (2020). Radiation shielding properties of poly (hydroxyethyl methacrylate)/Tungsten (VI) oxide composites. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 121986.

Mahmoud, K. G., Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., Arayro, J., and Maghrbi, Y. (2023a). Monte Carlo investigation of gamma radiation shielding features for Bi_2O_3 /epoxy composites. *Applied Sciences*, 13(3), 1757.

Mahmoud, K. G., Yasmin, S., Almuqrin, A. H., Sayyed, M. I., and Tashlykov, O. L. (2023b). Evaluation of the Tungsten trioxide performance on polyepoxides radiation shielding strength. *Radiation Physics and Chemistry*, 207, 110866.

Mahmoud, M. E., El-Khatib, A. M., Badawi, M. S., Rashad, A. R., El-Sharkawy, R. M., and Thabet, A. A. (2018). Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 160-173.

Mirji, R., and Lobo, B. (2020). Study of polycarbonate–bismuth nitrate composite for shielding against gamma radiation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324(1), 7-19.

Moonkum, N., Pilapong, C., Daowtak, K., and Tochaikul, G. (2022). Evaluation of silicone rubber shielding material composites enriched with BaSO₄ and Bi₂O₃ particles for radiation shielding properties. *Materials Research Innovations*, 1-8.

Muthamma, M. V., Bubbly, S. G., Gudennavar, S. B., and Narendranath, K. S. (2019). Poly (vinyl alcohol)–bismuth oxide composites for X-ray and γ -ray shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(37), 47949.

Nuñez-Briones, A. G., Benavides, R., Mendoza-Mendoza, E., Martínez-Pardo, M. E., Carrasco- Abrego, H., Kotzian, C., Saucedo-Zendejo, F. R., and García-Cerda, L. A. (2021). Preparation of PVC/Bi₂O₃ composites and their evaluation as low energy X-ray Radiation Shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109198.

Nuttall, P. M. (1980). *A handbook of radioactivity measurement procedures*. NCPR Report No:58.

Oğul, H., Polat, H., Akman, F., Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Bulut, F., and Agar, O. (2022). Gamma and Neutron Shielding Parameters of Polyester-based composites reinforced with boron and tin nanopowders. *Radiation Physics and Chemistry*, 201, 110474.

Oğul, H., Agar, O., Bulut, F., Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Polat, H., and Akman, F. (2023). A comparative neutron and gamma-ray radiation shielding investigation of molybdenum and boron filled polymer composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 194, 110731.

Olukotun, S. F., Gbenu, S. T., Oladejo, O. F., Sayyed, M. I., Tajudin, S. M., Amosun, A. A., Fadadun, O. G., and Fasasi, M. K. (2020). Investigation of gamma ray shielding capability of fabricated clay-polyethylene composites using EGS5, XCOM and Phy-X/PSD. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 109079.

Ozel, F., Akman, F., Kaçal, M. R., Ozen, A., Arslan, H., Polat, H., Yurtcan, S., and Agar, O. (2021). Production of microstructured BaZrO₃ and Ba₂P₂O₇-based polymer shields for protection against ionizing photons. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 158, 110238.

Özdemir, H. G., Kaçal, M. R., Akman, F., Polat, H., and Agar, O. (2023). Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110924.

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

Özkalaycı, F., Kaçal, M. R., Polat, H., Agar, O., Almousa, N., and Akman, F. (2022). Lead-free Sb-based polymer composite for γ -ray shielding purposes. *Radiochimica Acta*, 110(5), 393-402.

Podgoršak, E. B. (2006). *Radiation physics for medical physicists* (Vol. 1). Berlin: Springer.

Rashad, M., Hanafy, T. A., and Issa, S. A. (2020). Structural, electrical and radiation shielding properties of polyvinyl alcohol doped with different nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(18), 15192-15197.

Reengineering XCOM. *Radiation Physics and Chemistry*, 60 (1-2), 23-24.

Tekin, H. O., Akman, F., Issa, S. A., Kaçal, M. R., Kilicoglu, O., and Polat, H. (2020). Two-step investigation on fabrication and characterization of iron-reinforced novel composite materials for nuclear-radiation shielding applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 146, 109604.

Turhan, M. F., Akman, F., Polat, H., Kaçal, M. R., and Demirkol, İ. (2020). Gamma-ray attenuation behaviors of hematite doped polymer composites. *Progress in Nuclear Energy*, 129, 103504.

Turner, J. E. (1995). Atoms, radiation and radiation protection. In *Fuel and Energy Abstracts* Vol. 6, No. 36, p. 457.

Wu, Z., Li, Y., Yan, Q., Liu, G., Liu, Y., Wang, G., and He, L. (2022). Gamma radiation shielding properties of WO₃/Bi₂O₃/waterborne polyurethane composites. *Journal of the Korean Physical Society*, 81(3), 199-205.

Yu, L., Yap, P. L., Santos, A., Tran, D., and Losic, D. (2021). Lightweight Bismuth Titanate (Bi₄Ti₃O₁₂) Nanoparticle-Epoxy Composite for Advanced Lead-Free X-ray Radiation Shielding. *ACS Applied Nano Materials*, 4(7), 7471-7478.

Zakaly, H. M., Ashry, A., El-Taher, A., Abbady, A. G., Allam, E. A., El-Sharkawy, R. M., and Mahmoud, M. E. (2021). Role of novel ternary nanocomposites polypropylene in nuclear radiation attenuation properties: In-depth simulation study. *Radiation Physics and Chemistry*, 188, 109667.

Zhang, X., Yang, M., Zhang, X., Wu, H., Guo, S., and Wang, Y. (2017). Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure. *Composites Science and Technology*, 150, 16-23.