



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

**BAZI METAL İÇEREN KOMPOZİTLERİN RADYASYON
ZIRHLAMA DEĞERLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK
HESAPLANMASI**

DOKTORA TEZİ

ARZU COŞKUN

ARALIK

ARZU COŞKUN

FİZİK ANABİLİM DALI

ARALIK 2023

**BAZI METAL İÇEREN KOMPOZİTLERİN RADYASYON ZIRHLAMA
DEĞERLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK HESAPLANMASI**

Arzu COŞKUN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Danışman
Prof. Dr. Betül ÇETİN**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2023

Doktora Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Arzu COŞKUN tarafından hazırlanan “Bazı Metal İçeren Kompozitlerin Radyasyon Zırhlama Değerlerinin DeneySEL ve Teorik Olarak Hesaplanması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Betül ÇETİN

Fizik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin TOPAKLI

Fizik Anabilim Dalı, Tarsus Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Fikret YILMAZ

Fizik Anabilim Dalı, Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Doç. Dr. Serpil ERYILMAZ

Fizik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Doç. Dr. Betül CANIMKURBEY

Fizik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 04/12/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

Arzu COŞKUN

04.12.2023

BAZI METAL İÇEREN KOMPOZİTLERİN RADYASYON ZIRHLAMA DEĞERLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK HESAPLANMASI

(Doktora Tezi)

Arzu COŞKUN

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Canlılar yaşamları boyunca doğal radyasyon kaynaklarının yanı sıra tıbbi, zirai ve endüstriyel alanlar başta olmak üzere birçok alanda radyasyona maruz kalmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile radyoaktif kaynak ve radyasyon kullanımı artmaktadır. Özellikle tıpta tanı ve tedavi amacı ile iyonlaştırıcı radyasyonların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. İyonize radyasyonun canlı organizmada biyolojik etkilere neden olmaktadır. İyonize radyasyon çeşidi olan gama ışınlarının oluşturduğu etkileri ve zararlarını en aza indirebilmek amacı ile doz sınırlamanın yanında zırhlama amacı ile malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu sebeple çalışmada, farklı oranlarda CuO, ZnO, TiO₂, ZrB₂ ve PbO nano tozları sol-gel yöntemi ile spin coater kullanılarak cam malzemelere kaplanmıştır. Kaplanan numunelerin radyasyon zırhlama özellikleri Na-22, Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynakları kullanılarak 511 keV, 662 keV, 1173 keV, 1274 keV ve 1332 keV enerjilerinde NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometresi ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda PbO'e yapılan katkılarda özellikle %50PbO.%50CuO ve %50TiO₂PbO.%30CuO.%10ZrB₂.%10TiO₂ karışımlarından oluşan camlara ait lineer soğurma katsayısı yüksek bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen lineer soğurma katsayıları, GATE ve XCOM programları kullanılarak teorik olarak hesaplanmış ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen teorik veriler ile deneysel verilerin birbiri ile uyumlu olduğu izlenmiştir.

Sayfa Adedi : 99
Anahtar Kelimeler : Radyasyon Zırhlama, Kompozit, Soğurma, NaI (Tl)
Danışman : Prof. Dr. Betül ÇETİN

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL CALCULATION OF THE RADIATION SHIELDING VALUES OF SOME METAL CONTAINING COMPOSITES

(Doctoral Thesis)

Arzu COŞKUN

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

Living beings are exposed to radiation throughout their lives in many areas, especially medical, agricultural and industrial areas, as well as natural radiation sources. With the development of technology, the use of radioactive sources and radiation is increasing. The use of ionizing radiation, especially for diagnosis and treatment purposes in medicine, is increasing day by day. Ionizing radiation causes biological effects in living organisms. To minimize the effects and damage caused by gamma rays, which are a type of ionizing radiation, materials are being developed for shielding purposes as well as dose limitation. For this reason, in the study, different ratios of CuO, ZnO, TiO₂, ZrB₂ and PbO nano powders were coated on glass materials using a spin coater with the sol-gel method. The radiation shielding properties of the coated samples were examined with a gamma spectrometer with NaI(Tl) detector at energies of 511keV, 662 keV, 1173 keV, 1274 keV and 1332 keV using Na-22, Cs-137 and Co-60 radioactive sources. As a result of the study, the linear absorption coefficient of the glasses consisting of 50%PbO.50%CuO and 50%TiO₂PbO. 30%CuO.10%ZrB₂.10%TiO₂ mixtures was found to be high in the additives made to PbO. The linear absorption coefficients obtained experimentally were calculated theoretically using GATE and XCOM programs and compared with experimental data. It has been observed that the obtained theoretical data and experimental data are compatible with each other.

Number of pages : 99
Keywords : Radiation Shielding, Composite, Absorption, NaI (Tl)
Supervisor : Prof. Dr. Betül ÇETİN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince her zaman bana destek olan, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak çalışmamı özenli bir şekilde yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Betül ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ders ve tez dönemi aşamaları boyunca kıymetli katkılarından dolayı Gaziosmanpaşa Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. İbrahim YİĞİTOĞLU'na, numune hazırlık aşamasında katkılarından dolayı Amasya Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Betül CANIMKURBEY'e, teorik hesaplamalar aşamasında katkılarından dolayı Tarsus Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Hüseyin TOPAKLI'ya ve ayrıca Tez İzleme Komitesi üyesi Gaziosmanpaşa Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Fikret YILMAZ' a ve tez jürisinde bulunup değerli katkılar sunan Amasya Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Serpil ERYILMAZ' a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	lix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	4
2.1 Radyasyonun Tanımı.....	14
2.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon	15
2.1.2 İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar	211
2.2 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi	23
2.2.1 Fotoelektrik olay.....	24
2.2.2 Koherent saçılma	25
2.2.3 İnkoherent saçılma (Compton olayı)	25
2.2.4 Çift oluşumu	27
2.3 Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması.....	28
2.3.1 Lineer soğurma katsayısı (μ)	29
2.3.2 Kütle soğurma katsayısı (μ_m).....	30
2.3.3 Ortalama serbest yol (mfp).....	31
2.3.4 Yarı-değer kalınlığı (HVL).....	31
2.4 Radyasyon Dedektörleri	33

2.4.1	İyonizasyon odaları	34
2.4.2	Orantılı sayıcılar	36
2.4.3	Geiger-Mueller tüpleri.....	36
2.4.4	Nötron dedektörleri	37
2.4.5	Sintilasyon sayıcıları	38
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1	Nal(Tl) Dedektörü	39
3.2	Elektronik Aygıtlar ve Yazılım	40
3.3	Gama Kaynakları.....	41
3.4	Teorik Hesaplama.....	42
3.4.1	XCOM.....	42
3.4.2	GATE	42
3.5	Numune hazırlama.....	45
4.	BULGULAR.....	47
5.	SONUÇ VE TARTIŞMA	86
	KAYNAKLAR	90
	ÖZGEÇMİŞ.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Radyasyon madde etkileşimleri	24
Çizelge 2.2. Farklı tür gazlar için iyon başına enerji dağılım değerleri.....	34
Çizelge 3.1. Bazı gama kaynaklarının genel özellikleri	41
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri	43
Çizelge 3.3. Kimyasalların bileşim oran ve yoğunlukları.....	444
Çizelge 3.4. Hazırlanan materyallerin teorik XCOM yazılımı lineer soğurma katsayıları .	47
Çizelge 3.5. Hazırlanan materyallerin deneysel lineer soğurma katsayıları (LAC)	48
Çizelge 3.6. Hazırlanan materyallerin GATE simülasyonundan elde edilen lineer soğurma katsayıları (LAC)	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Radyasyon ve çeşitleri	15
Şekil 2.2. Gama bozunması	17
Şekil 2.3. Sürekli X-ışınlarının oluşumu.....	18
Şekil 2.4. Karakteristik X- ışını oluşumu.....	19
Şekil 2.5. Fotoelektrik olay	24
Şekil 2.6. Compton olayı	26
Şekil 2.7. Çift oluşumu	28
Şekil 2.8. Radyasyondan korunma yolları	28
Şekil 2.9. Radyasyon çeşitlerine göre soğurma materyalleri	29
Şekil 2.10. Beer-Lambert yasası	30
Şekil 2.11. Çeşitli tiplerdeki gazlı dedektörlerde gaz amplifikasyonu	33
Şekil 2.12. Gazlı dedektör	35
Şekil 2.13. Orantılı sayacı	36
Şekil 2.14. Geiger Müller Sayacı.....	36
Şekil 2.15. Tipik bir gazlı nötron dedektörü	37
Şekil 2.16. Sintilasyon sayıcısı	38
Şekil 3.1. NaI(Tl) dedektörü	39
Şekil 3.2. DSPEC LF modülü (üstte) ve yüksek gerilim modülü	40
Şekil 3.3. MAESTRO-32 yazılımı ile elde edilmiş olan örnek bir spektrum	41
Şekil 3.4. Deneysel ve teorik düzenek	43
Şekil 3.5. PbO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği.....	49
Şekil 3.6. CuO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	50
Şekil 3.7. ZnO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	50

Şekil 3.8. ZrB_2 kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	51
Şekil 3.9. TiO_2 kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	51
Şekil 3.10. %50 ZrB_2 .%50 PbO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	52
Şekil 3.11. %50 ZnO .%50 PbO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	52
Şekil 3.12. %50 ZnO . %50 CuO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	53
Şekil 3.13. %50 CuO .%50 PbO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	53
Şekil 3.14. %50 ZrB_2 .%50 CuO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	534
Şekil 3.15. %50 ZrB_2 .%50 ZnO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	534
Şekil 3.16. %50 CuO .%50 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	55
Şekil 3.17. %50 TiO_2 .%50 PbO oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	55
Şekil 3.18. %50 ZnO .%50 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	56
Şekil 3.19. %50 ZrB_2 .%50 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	56
Şekil 3.20. %50 ZrB_2 . PbO %10 CuO %10 ZnO %30 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	57
Şekil 3.21. %50 ZrB_2 . PbO %30 CuO %10 ZnO %10 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	57
Şekil 3.22. %50 ZrB_2 . PbO %10 CuO %30 ZnO %10 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	58
Şekil 3.23. %50 TiO_2 . PbO %30 CuO %10 ZnO %10 TiO_2 oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	58

Şekil 3.24. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	59
Şekil 3.25. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂ oranında kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayısı grafiği	59
Şekil 3.26. PbO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	60
Şekil 3.27. ZrB ₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	60
Şekil 3.28. CuO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	61
Şekil 3.29. ZnO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	61
Şekil 3.30. TiO ₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	62
Şekil 3.31. 50%ZrB ₂ .50%PbO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	62
Şekil 3.32. 50%ZnO.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	63
Şekil 3.33. 50%ZnO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	63
Şekil 3.34. 50%PbO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	64
Şekil 3.35. 50%ZrB ₂ .50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	64
Şekil 3.36. 50%ZrB ₂ .50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	65
Şekil 3.37. 50%TiO ₂ .50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik HVL(yarıdeğer kalınlık) değeri grafiği.....	65
Şekil 3.38. 50%TiO ₂ .50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	66
Şekil 3.39. 50%TiO ₂ .50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	66
Şekil 3.40. 50%TiO ₂ .50%ZrB ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği.....	67

Şekil 3.41. %50ZrB ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	67
Şekil 3.42. %50ZrB ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	68
Şekil 3.43 %50ZrB ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	68
Şekil 3.44. %50TiO ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	69
Şekil 3.45. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	69
Şekil 3.46. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği	70
Şekil 3.47. PbO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği ..	70
Şekil 3.48. ZrB ₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği..	71
Şekil 3.49. CuO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği..	71
Şekil 3.50. ZnO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği ..	72
Şekil 3.51. TiO ₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği..	72
Şekil 3.52. 50%ZrB ₂ .50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	73
Şekil 3.53. 50%ZnO.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	73
Şekil 3.54. 50%ZnO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	74
Şekil 3.55. 50%PbO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	74
Şekil 3.56. 50% ZrB ₂ .50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	75
Şekil 3.57. 50% ZrB ₂ .50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	75

Şekil 3.58. 50%TiO ₂ .50%CuO oranında kaplanmış cam numunelere ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	76
Şekil 3.59. 50%TiO ₂ .50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	76
Şekil 3.60. 50%TiO ₂ .50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	77
Şekil 3.61. 50%TiO ₂ .50%ZrB ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği.....	77
Şekil 3.62. %50ZrB ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği	78
Şekil 3.63. %50ZrB ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik MFP(ortalama serbest yol) değeri grafiği.....	78
Şekil 3.64. %50ZrB ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği	79
Şekil 3.65. %50TiO ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği	79
Şekil 3.66. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği	80
Şekil 3.67. %50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği	80
Şekil 3.68. PbO,CuO,ZnO,ZrB ₂ ,TiO ₂ bileşikleri ile kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği	81
Şekil 3.69. %50 oranında PbO,CuO,ZnO,ZrB ₂ ,TiO ₂ ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği	81
Şekil 3.70. %50ZrB ₂ .PbO ve %50TiO ₂ .PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği	82
Şekil 3.71. PbO,CuO,ZnO,ZrB ₂ ,TiO ₂ bileşikleri ile kaplanmış cam numuneye ait yarıdeğer kalınlık grafiği.....	82
Şekil 3.72. PbO,CuO,ZnO,ZrB ₂ ,TiO ₂ bileşikleri ile kaplanmış cam numuneye ait ortalama serbest yol grafiği.....	83

- Şekil 3.73. %50 oranında alınarak oluşturulan cam numunelere ait deneysel yarıdeğer kalınlık grafiği.....833
- Şekil 3.74. %50 oranında alınarak oluşturulan cam numunelere ait deneysel ortalama serbest yol grafiği.....84
- Şekil 3.75. %50ZrB₂.PbO ve %50TiO₂.PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış cam numunelere ait deneysel yarıdeğer kalınlık grafiği.....84
- Şekil 3.76. %50ZrB₂.PbO ve %50TiO₂.PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış cam numunelere ait deneysel ortalama serbest yol grafiği.....85



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
g	Gram
keV	Kilo elektron volt
MeV	Mega elektron volt
s	Saniye
fm	Femtometre
nm	Nanometre
cm	Santimetre
Gy	Grey
μ s	Mikrosaniye
V	Volt
mm	Milimetre
GeV	Giga elektron volt
$^{\circ}$ C	Santigrat derece
ml	Mililitre
μ_m	Kütle soğurma katsayısı
μ	Lineer soğurma katsayısı
I_0	Gelen fotonun şiddeti
I	Maddeden geçen fotonun şiddeti
$x_{1/2}$	Yarı değer kalınlık
x	Malzeme kalınlığı

Kısaltmalar**Açıklama**

HVL

Yarıdeğer kalınlık

MFP

Ortalama serbest yol

LAC

Lineer soğurma katsayısı

TVL

Onda bir kalınlık

 Z_{eff}

Etkin atom numarası

PET

Pozitron emisyon tomografisi

SPECT

Tek foton emisyonlu bilgisayarlı tomografi

CT

Bilgisayarlı tomografi

XCOM

Foton kesiti veritabanı

GATE

Emisyon tomografi sintigrafisi

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki tüm canlılar, havada, suda ve toprakta bulunan doğal radyasyona ve çeşitli yollarla üretilen yapay radyasyona maruz kalmaktadır. Son yüzyılda nükleer enerjinin, bilimsel, endüstriyel, tıbbi ve zirai gibi çeşitli alanlarda kullanımının artmasıyla canlıların radyasyona maruz kalma miktarları da artmıştır. İyonlaştırma özelliği olan, yüksek enerjili, nüfuz etme kabiliyeti yüksek radyasyonlar, DNA üzerinde mutasyona ve nesilden nesile aktararak kalıtsal hastalıklara neden olabilirler. Canlılarda mutasyona neden olan değişimleri deterministik ve stokastik etkiler olmak üzere iki başlıkta incelemek mümkündür. Yüksek dozda radyasyona maruziyet sonrası, kısa bir süre sonra meydana gelen ve sonuçları ölüme yol açabilen deterministik etkilerin hücreye verdiği zarar, maruz kalınan dozun şiddetine ve hızına bağlıdır. Radyasyona maruz kalındıktan yıllar sonra bile etkisini gösterebilen stokastik etkiler ise düşük dozda uzun süre maruziyet sonrası hücre hasarına neden olur ve hücrenin kendisini yenilemesini engelleyerek ya da yavaşlatarak kanser oluşmasına sebep olur.

Teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak hemen her alanda radyasyon ile çalışan cihazların artması ile radyasyondan korunma daha da önemli hale gelmiştir. Radyasyondan korunmanın en önemli yöntemlerinden biri olan zırhlama, radyasyondan korunmak veya maruziyeti en aza indirmek amacıyla radyoaktif kaynak ile araya bir zırhlama materyali konulması sonucu radyasyonun şiddetinin minimum düzeylere indirilmesidir. Zırhlama yapıldığında, kaynaktan çıkan radyasyon, zırhlama malzemesinin atomlarıyla etkileşip iyonlaştırma meydana getirir ve bu yolla enerjisini tamamen veya kısmen kaybeder.

Kurşun (Pb) elementi ve çeşitli oksit bileşenlerinin radyasyon soğurma yeteneğinin yüksek olması ve kolay şekil alabilir olması, özellikle tıbbi uygulamalarda zırhlama materyali olarak kurşun içerikli koruyucu giysilerin kullanımını ön plana çıkarmıştır (Eder, 2006; Ballsieper, 2006). Fakat kurşun maliyet ve teknik açıdan her alanda kullanılamadığından dolayı bilim çevresince yeni zırhlama malzemesi arayışı devam etmektedir. Özellikle radyasyon çalışanlarının radyasyona maruziyetinin müsaade edilebilir dozu aşabilme ihtimali, bilim camiasını, maruz kalınan dozu azaltabilmenin yollarını aramaya mecbur etmiştir. Buna ek olarak, toksik bir materyal olması, insan sağlığı ve çevre açısından zararlı olması nedeniyle kullanımı, 1976 yılında Birleşik Devletler Kongresi'nde (The United States Congress) pek çok alanda sınırlandırılmış hatta bazı alanlarda yasaklanmıştır

(Dodoo-Amoo ve diğeri., 2003) ve sonucunda kurşunsuz zırhlama materyallerinin soğurma etkinliğini ortaya koyabilmek için “eşdeğer kalınlık” parametresi ortaya atılmıştır. Bunun için uluslararası doz sınırlama standartlarının yanında her ülkenin belirlediği radyasyon sınırlama standartları da vardır (Eder ve diğeri., 2005, 2010). Türkiye’de ise kurşunsuz zırh materyalleri ve yeni materyal tasarlanmasında rehberlik amacıyla Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından TS EN 61331-1 Tıpta Teşhis Amacıyla Kullanılan X- Işınına Karşı Koruyucu Cihazlar/Bölüm 1: Malzemelerin Zayıflatma Özelliklerinin Belirlenmesi’ standardı geliştirilmiştir (TS EN 61331-1).

Pb kullanımını minimum düzeye çekebilmek amacıyla iyonlaştırıcı radyasyondan korunmak için farklı materyal geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Zırhlama materyallerindeki Pb oranı düşürülerek farklı materyallerin karıştırılması ile yeni kompozit malzemeler üretilmiş ve Pb’un toksik etkisi azaltılarak malzeme ağırlığı da düşürülmüştür. Örneğin; Pb’la karıştırılan Ba, Sn ve I’tan oluşan karışım ile kurşun ile eşdeğerde bir soğurma sağlanırken % 20-30 oranında da hafiflik kazanılmıştır (ICRP 103, Valentin, 2007).

Polyurethane içerikli zırh materyalleri (Ni ve diğeri., 2016), epoxy reçine (Mkhaiber ve Dheyaa, 2018), kurşun ve kurşunsuz kompozit malzemeler kullanılarak karşılaştırılmıştır (Eder ve diğeri., 2010). Ayrıca X ve γ -ışınını zırhlatabilmek için yüksek yoğunluklu barit cevheri, nötron parçacıklarını durdurabilmek içinde bor içerikli kolemanit cevheri ve epoksi ile PbO₂ tozu karışımı yapılarak yeni kompozit zırh malzemesinin üretimi yapılmıştır (Demir, 2009). Başka bir çalışmada farklı kalınlıklarda PbO₂ numunelerinin mamografi çekimlerindeki radyasyon miktarı ve ISO s-¹³⁷Cs (0.662 MeV) kaynağı ile radyasyon soğurma özellikleri araştırılmıştır (Demirel, 2019).

Ayrıca, nükleer atıkların güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamaya yönelik çalışmalar da yoğun bir şekilde devam etmekte olup son çalışmalar “camlaştırma” yöntemi üzerine yoğunlaşmaya başlamış ve “camlaştırma” yöntemi bu amaçla yapılan diğer yöntemler arasında öne çıkan çalışmalar arasında önemli bir yer edinmiştir. Bu çalışmalar kapsamında dayanıklılığı artıracak ve radyasyon absorpsiyonunu sağlayacak alternatif cam kaplama yöntemi farklı kompozit bileşenler ile yapılmaktadır.

Geant4 tabanlı olarak çalışan GATE (Tomografik Emisyon için Geant4 Uygulaması) simülasyonu ile radyasyon zırh malzemelerinin kütle soğurma özelliklerinin araştırıldığı sınırlı sayıda çalışma vardır. GATE simülasyonu daha çok nükleer fiziğin medikal uygulamalarında, radyoloji ve radyoterapide kullanılmak üzere uluslararası düzeyde katılımcılar tarafından geliştirilerek açık erişimle kullanılabilen Monte Carlo hesaplamaları yapan bir yazılım programıdır. Yine radyasyon soğurma katsayılarının hesaplanabildiği XCOM programı ise; web altyapısını kullanan ve 1 keV ile 100 GeV aralığındaki enerji değerleri aralığında Compton saçılması, çift oluşum ve fotoelektrik etki olaylar için soğurma katsayıları hesaplanabilmektedir. XCOM programı ile, farklı materyal karışımlarının radyasyon absorplama özelliklerinin araştırıldığı pek çok bilimsel çalışma bulunmaktadır.

2. LİTERATÜR

Hubbell (1975); Akkurt ve diğerleri (2010) iyonlaştırıcı radyasyonun tıp, tarım ve nükleer santralde kullanımının artması ile etkilerini azaltabilmek için çeşitli malzemelerin kütle zayıflatma katsayılarının (μ/ρ) incelenmesine vurgu yapmışlardır (Hubbell, 1982; Akkurt ve diğerleri, 2010).

Singh ve diğerleri (2005) $\text{CaO-SrO-B}_2\text{O}_3$ camlarının 511–1332 keV foton enerjisi değerlerinde gama fotonu absorpsiyonuna bakarak radyasyon koruyucu olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Singh ve diğerleri, 2005).

Schlattl ve diğerleri (2007) tarafından Pb, Sn (Kalay) ve %80 Sn ve %20 Bi (Bizmut) içeren farklı koruyucu giysilerin radyasyon koruma etkinliğini karşılaştırdıklarında, özellikle Sn oranının düşük olduğu örneğin Pb önlüklere göre daha az koruma sağladığını belirlemişlerdir (Schlattl ve diğerleri, 2007).

Kirdsiri ve diğerleri (2009) $x\text{PbO}$ ve $(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ ’den oluşturdukları cam sisteminde deneysel sonuçları WinXCom bilgisayar programı ile hesaplayarak karşılaştırarak borat katkısının soğurma özelliğini artırdığını izlemişlerdir (Kirdsiri ve diğerleri, 2009).

Chang ve diğerleri (2009) Bi ile oluşturdukları yeni zırh malzemesi ile tanısal amaçlı tıpta kullanılan Bilgisayarlı tomografideki çekimlerinde oluşan doz azalımını Monte Carlo simülasyon programı ile ölçmüşlerdir (Chang ve diğerleri, 2009).

Kaundal ve diğerleri (2010) $\text{PbO-SrO-B}_2\text{O}_3$ karışımından oluşan camları eriyik söndürme tekniği kullanarak hazırlamışlardır. Hazırlanan numunelerin gama ışını zırlama özelliği olan kütle soğurma katsayılarını WinXCom bilgisayar programını kullanarak hesaplamışlardır (Kaundal ve diğerleri, 2010).

Akkurt ve diğerleri (2010) NaI (TI) detektörü kullanarak BaSO_4 ’ten üretilen betonların özellikle, 662, 1173 ve 1332 keV’de kütle soğurma katsayılarını deneysel olarak elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçları kurşunun soğurma özellikleri ile karşılaştırdıklarında BaSO_4 ’in inşaatlarda kullanılan betona göre daha yüksek radyasyon koruyucu özelliğine sahip olduğunu belirlemişlerdir (Akkurt ve diğerleri, 2010).

Literatürde radyasyon absorpsiyonunda kullanılan Lipowitz metali (cerrobend olarak da bilinir), %50 Bi, %26,7 Pb, %13,3 Sn ve %10 Cd içermektedir. İçerikte bulunan Cd'un toksik etkisinden dolayı, Kamal ve diğerleri (2011) farklı karışım oranı ile Cd elementini çıkartarak yaptıkları çalışmada (%50 Bi, %31,2 Pb and %18.8 Sn) ^{60}Co ve 6 MV X- ışını kullanarak kütle zayıflatma etkilerini inceleyerek yeni oranlarda yapılan materyalin Lipowitz metali yerine kullanılabileceğini görmüşlerdir (Kamal ve diğerleri, 2011).

Iftikhar ve diğerleri (2011) radyoterapi tedavisi sırasında, kritik organları koruyabilmek için Pb ve cerrobend bloklara tellurid içerikli tungsten camları da dahil ederek yüksek radyasyondan koruma özelliklerini incelemişlerdir (Iftikhar ve diğerleri, 2011).

Schmid ve diğerleri (2012) radyasyon koruyucu olarak üretilen materyallerin insanda periferik lenfositlere etkisini araştırabilmek için disentrik frekans kullanarak sağlıklı bir gönülden aldıkları kan örneklerini Pb, Sn, Sn+Bi ve Sb alaşımı ve Bi+Sn+W' den oluşan farklı koruyucu bloklar altından 70 keV, X-ışınına maruz tutarak zırhtan geçen radyasyon miktarına bakmışlar ve Sn/W karışımından elde edilen materyalin daha koruyucu olduğu sonucuna varmışlardır (Schmid ve diğerleri, 2012).

Çeçen (2012) pomzanın radyasyon zırhlama özelliğini nokta kaynak olan Am-241 ile Ba-133'ten yayımlanan 59,5 keV, 80,9 keV, 295,5 keV ve 361,3 keV enerji değerlerinde ölçüm alarak sonuçları, Monte Carlo simülasyon kodu ve WinXCom programlarını kullanarak karşılaştırılmıştır (Çeçen, 2012).

Yue ve diğerleri (2013) Stiren-Etilen-Bütlen-Stiren bloklar üzerine polimer materyal ile altına Pb blok yerleştirerek Monte Carlo simülasyonu ile gerçekleştirerek Bremsstrahlung etkisinin önemli ölçüde azaldığını izlemişlerdir (Yue ve diğerleri, 2013).

Singh ve diğerleri (2014) Al (Alüminyum), Si (Silisyum), C (Karbon), P (Fosfor), S (Kükürt), Cr (Krom), Mn (Mangan), Ti (Titanyum), Fe (Demir), Mo (Molibdenyum), Ni (Nikel) ve Cu (Bakır) elementlerinden farklı oranlarda alarak bir simülasyon programı olan GEANT4 ile hesaplayarak WinXCOM programıyla karşılaştırmışlardır (Singh ve diğerleri, 2014).

Kaewjang ve diğerleri (2014) Gd_2O_3 bazlı $(80-x) B_2O_3-10 SiO_2-10 CaO-x Gd_2O_3$ oksitlerini kullanarak cam kaplama yapmış ve fiziksel ve optik özelliklerinin yanında radyasyon zırhlama özelliklerine bakmışlardır. Özellikle radyasyon absorpsiyon değerlerinin Gd_2O_3 miktarının artması ile arttığını gözlemlemişlerdir (Kaewjang ve diğerleri, 2014).

Qu ve diğerleri (2015) $BaSO_4$ partikülleri ve rejenere selülozdan farklı miktarlarda bir kompozit hazırlayarak ıslak eğirme yöntemini kullanarak elde ettikleri iplerden ördükleri kumaşların SEM, FTIR analizlerini ve X-ışını kırınım özelliklerini incelemişlerdir (Qu ve diğerleri, 2015).

Maghrabi ve diğerleri (2015), polyester kumaş üzerine %50 Bi_2O_3 materyalini kaplayarak X-ışınlarına karşı etkili bir koruyucu olduğu fakat, kumaşın daha az nefes alabilir ve yıkamaya karşı daha az dirençli olduğunu izlemişlerdir (Maghrabi ve diğerleri, 2015).

Şişman (2015), yine teşhiste radyasyon zırhlama materyali olarak kullanılan Bi ve Pb'a alternatif kompozit ürünleri Monte Carlo simülasyon programı ile simüle ederek elde ettikleri yirmi örnekte enerji-kütle soğurma katsayısı grafiklerini çizmişlerdir. Kompozit örneklerin 50-80 keV foton enerji aralığında Pb'a göre daha iyi radyasyon zayıflatma özelliği gösterdiklerini elde etmiştir (Şişman, 2015).

Oto ve diğerleri (2015) ^{133}Ba (81, 276, 302, 356, 383 keV) ve ^{152}Eu (121, 244, 344, 444 ve 778 keV) kaynaklarından yayımlanan fotonlar için limonit, hematit, manyetit, barit ve serpantin cevherleri ile ürettikleri pelet numunelerinin kütle soğurma katsayılarını HpGe dedektörü ile belirleyerek en yüksek soğurma özelliğinin baritte olduğunu görmüşlerdir (Oto ve diğerleri, 2015).

Akçaalan (2015) B_4C ve $NaB_5O_8.5H_2O$ katkılı betonların kütle soğurma katsayılarını FLUKA Monte Carlo kodu ile hesaplamış foton enerjilerinde ve literatür ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Akçaalan, 2015).

Maghrabi ve diğerleri (2016) polyester ve Bi_2O_3 ile kaplanmış tekstil malzemesinin X-ışını koruma verimliliğini değerlendirmek için, 80 kVp, 12 mAs ve 80 cm SID (Kaynak hedef arası mesafe) verilerini kullanarak X-ışınına maruz bırakmışlardır. Özellikle reçine kaplı

ve küttelece %50'nin üzerinde Bi_2O_3 ile kaplanmış polyester kumaşın X-ışınları için gelişmiş koruyucu özellikte olduğunu göstermişlerdir (Maghrabi ve diğerleri, 2016).

Can (2016) polimer matris içine atom numarası yüksek olan volfram metalini ve volfram tuzunu katarak Pb'dan daha hafif ve daha etkin soğurma özelliğine sahip olabilecek yeni bir materyal üretmeye çalışmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda radyasyon zayıflatma özelliğinin Pb'un zayıflatma özelliğinin yaklaşık olarak %60-%100'üne ulaştığını görmüşlerdir (Can, 2016).

Lakshminarayana ve diğerleri (2017) oluşturdukları iki farklı karışımda, $(60-x-y)\text{B}_2\text{O}_3-10\text{Bi}_2\text{O}_3-10\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-10\text{Li}_2\text{O}-(x)\text{Dy}_2\text{O}_3-(y)\text{Tb}_4\text{O}_7$, Tb_4O_7 ve $(60-x)\text{B}_2\text{O}_3-10\text{Bi}_2\text{O}_3-10\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-10\text{Li}_2\text{O}-(x)\text{Dy}_2\text{O}_3$ içeren çok bileşenli borat camları farklı oranlarda karıştırarak yeni bir materyal elde etmişlerdir. Elde ettikleri camları 0,015 MeV–15MeV enerji aralığında radyasyon koruyucu özelliğinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Lakshminarayana ve diğerleri, 2017).

Wu ve diğerleri (2017) sentezledikleri $\text{Pb}_3\text{B}_{10}\text{O}_{16}(\text{OH})_4$ kimyasal formülüne sahip kurşun borat bileşiklerinin foton soğurma özelliklerini inceleyerek, nötron ve γ radyasyonlarından korunma da oldukça etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Wu ve diğerleri, 2017).

Mostafa ve diğerleri (2017) WO_3 tabanlı olarak hazırladıkları $(100-x)(0,1\text{B}_2\text{O}_3-0,4\text{P}_2\text{O}_5\text{PbO})-x\text{WO}_3$ oluşturdukları cam materyalinin γ -ışını için soğurma özelliklerini incelemişler, nokta kaynaktan yayınlanan γ -ışınlarına maruz bırakılan cam numuneleri NaI (TI) sintilasyon dedektörünü kullanarak ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda cam numunelerinin radyasyon soğurma karakterinin özellikle WO_3 'ün karışımdaki oranının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir (Mostafa ve diğerleri, 2017; Mann, 2017).

Bakırhan (2017) 662-1460 keV enerji aralığında Pb maden atığı katkısı ile hazırlanmış ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarını incelemiştir. Limonit, Manyetit, Barit agregalarını foton soğurma kriterlerine göre elde edilen sonuçları kıyasladığında soğurma özelliği olarak en yüksek manyetitin olduğunu belirtmiştir (Bakırhan, 2017).

Bagheri ve diğerleri (2017) Ba-Bi-borosilikat'tan oluşan kompozit camların radyasyon soğurma özelliklerini 662 keV, 1173 keV ve 1332 keV foton enerjilerinde deneysel ve

teorik olarak MCNP-4C ve WinXCom programı yardımı ile değerlendirmişler ve düşük enerjide radyasyon absorpsiyonunun yüksek olduğunu izlemişlerdir (Bagheri ve diğerleri, 2017).

Bagheri ve diğerleri (2018) Bi_2O_3 , PbO , BaO camlar kullanarak (x ağırlıkça yüzde miktarı olup 30% ve 70% arasında alınmıştır) 10 keV ve 10 MeV arasında γ -ışını enerjisi MCNP-4C code, XCOM ve XMuDat bilgisayar programları ile yaptıkları çalışmada özellikle BaO , Bi_2O_3 , ve PbO silika cam içerikli materyallerin iyi bir kütle zayıflatma gösterdikleri sonucunu elde etmişlerdir (Bagheri ve diğerleri, 2018).

Literatürde toksik özelliğinin düşük olması nedeni ile Sb_2O_3 ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Sb_2O_3 katkılı sodyum-boro-silikat camların daha yüksek γ -ışını koruma kabiliyetine sahip olduğu ve başka bir çalışmada epoksi reçineli Sb_2O_3 nano tozunun yanma ve yanıcılık özelliklerine karşı rejeneratif ajan olarak kullanıldığını göstermişlerdir (Zoulfakar ve diğerleri, 2017; Dheyaa ve diğerleri, 2018).

Issa ve diğerleri (2018) ikili camsı kompoziti (TeO_2 - ZnO - NiO) farklı konsantrasyonlarda hazırlayarak XCOM yazılımı, MCNP5 ve Geant4 simülasyon kodları ile 0,112–1,33 MeV enerji aralığında radyasyon soğurma özelliklerini karşılaştırmalı olarak vermişlerdir. Çalışma sonucunda özellikle, 0,04N-0,864T (S4) numunesine ait cam materyalin soğurma özelliğinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Issa ve diğerleri, 2018).

Mahmoud ve diğerleri (2018) nano parçacıklı PbO_2 ve dökme PbO_2 ile doldurulmuş yüksek yoğunluklu dolgu malzemesi olan polietilen ile kompozit hazırlayarak gama ışınlarına maruz bırakarak radyasyon koruma özelliklerini araştırmışlardır (Mahmoud ve diğerleri, 2018).

Ersundu ve diğerleri (2018) 10WO_3 - $x\text{MoO}_3$ -(90-x) TeO_2 (HMO) ağır metal karışımını eriyik söndürme tekniği ile yeni metal oksit cam kaplama yaparak radyasyon zırh uygulamalarındaki potansiyellerini araştırmışlardır. Elde edilen cam kaplama materyalinin beton numuneler ve kurşun karışımı ile oluşturulan zırh malzemeleri ile karşılaştırıldığında çok daha iyi koruma özelliği gösterdiklerini belirtmişlerdir (Ersundu ve diğerleri, 2018).

Akman ve diğerleri (2018) Ag_{92,5}/Cu_{7,5}; Ag₇₂/Cu₂₈; Pd₉₄/Cr₆ ve Pd₆₀/Cu₄₀ farklı yoğunluğa sahip olan metallere alaşım oluşturarak 81-1333 keV enerji aralığında radyasyon soğurma katsayılarını hesaplamışlardır. Deneysel verileri WinXCom ve MCNP-X simülasyon sonuçları ile karşılaştırarak sonuçların uyumlu olduğunu bulmuşlardır (Akman ve diğerleri, 2018).

Issa ve diğerleri (2018) PbO-SiO₂-B₂O₃-Na₂O oksitleri farklı oranlarda karıştırarak elde ettikleri cam numunelerinin 0,015-15 MeV enerji aralığında kütle soğurma katsayısı, yarı-değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin elektron yoğunlukları (N_{eff}) etkin atom numaraları (Z_{eff}), ve foton kuvvetlendirme faktörlerini (BF) elde ettikleri deneysel verileri WinXCom programı verilerini kullanarak karşılaştırmışlardır (Issa ve diğerleri, 2018).

Liu ve diğerleri (2018) kurşuna nazaran toksik özelliği daha düşük olan Bi₂WO₆ nano malzemeden oluşturulan tabakaların düşük enerjili radyasyondan korunmada kişisel koruyucu olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Liu ve diğerleri, 2018).

Verdipoor ve diğerleri (2018) WO₃, PbO, Bi₂O₃ silikon reçinesi, mikro ve nano parçacıkları ile yeni zırh materyal tasarlayıp radyoaktif nokta kaynaklardan yayınlanan gama ışınları için kütle soğurma katsayılarını Monte Carlo yöntemi ile hesaplamışlardır (Verdipoor ve diğerleri, 2018).

Kaewjaeng ve diğerleri (2012) (80-x)B₂O₃:10SiO₂:xLa₂O₃ oksitlerinden oluşan karışımla eriyik söndürme tekniğini kullanarak numuneler hazırlamışlar ve Pb içermeyen bu karışımın radyasyon uygulamalarında kişisel koruyucu olabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Kaewjaeng ve diğerleri, 2012).

Aygün ve diğerleri (2019) hazırladıkları yüksek alaşımlı paslanmaz çelikten hazırladıkları üç farklı numunenin, nötron ve gama ışınlarını soğurma katsayılarını deneysel olarak ölçümleyerek Geant4 Monte Carlo simülasyon program ile karşılaştırmışlardır (Aygün ve diğerleri, 2019).

Al-Buriahi ve Rammah (2019) Kaur ve diğerleri (2019), borat cam ve seramikler üzerine yaptıkları çalışmalarda, bu camların yaygın olarak kullanılan camlara kıyasla daha iyi

yapısal özelliklerinin yanında radyasyon korunma özelliklerinin de iyi olduğunu göstermişlerdir (Al-Buriah ve Rammah, 2019; Kaur ve diğerleri, 2019).

Issa ve diğerleri (2019) zırhlama malzemesi olarak $5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}29\text{Na}_2\text{O}\text{-(}66\text{-}x\text{)B}_2\text{O}_3\text{-}x\text{Bi}_2\text{O}_3$ eriyik söndürme tekniği ile materyal karışımından verilen oranlarda cam numunelerini hazırlamışlardır. Numunelerin radyasyon ile etkileşimini MCNP-X program ile hesaplayarak, XCOM ve XMuDat programları ile karşılaştırarak uyumlu olduklarını belirtmişlerdir (Issa ve diğerleri, 2019).

Yukarıda literatür özetlerinde verildiği gibi cam ve kumaş numunelerinin radyasyon soğurma parametreleri üzerine çok yoğun olarak çalışılmıştır. Bunun yanında inşaat malzemelerinde de radyasyon zırhlama özellikleri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.

Sakurai ve diğerleri (2004) yaptıkları çalışmada ürettikleri saf metathene ve farklı oranlarda 6LiF ve B_4C katkısı ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda özellikle 6LiF katkılı metathene malzemenin diğer karışımlara göre daha iyi nötron zırhlaması sağladığını belirtmişlerdir (Sakurai ve diğerleri, 2004).

Fan ve diğerleri (2009) BaPbO_3/Al katkılı kompozit malzemelerin radyasyon zayıflatma özelliğini alüminyum ile karşılaştırarak kütle zayıflatma katsayısının (μ/ρ), alüminyuma göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Fan ve diğerleri, 2009).

Chen ve diğerleri (2014) çalışmaların dökme alüminyum köpüğün gama ışını zayıflatma etkinliğini 0,060; 0,662; 1,173 ve 1,332 MeV foton enerjilerinde inceleyerek metal kompozit köpük kullanımının material hafifliğine neden olduğunu ve radyasyon absorpsiyonunda kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Chen ve diğerleri, 2014).

Rahimi ve diğerleri (2009) kurşun silikat camlar Zr ve Ti elementlerini ekleyerek kimyasal korozyonun etkisini ve gama radyasyonunun zayıflatma özelliklerini incelemişlerdir (Rahimi ve diğerleri, 2009).

Han ve diğerleri (2009) yaptıkları çalışmalarda deneysel ve XCOM programında bazı doğal minerallerin 22,1; 25,0; 59,5 ve 88 keV enerjili fotonlarda kütle zayıflatma

katsayılarını hesaplamışlar ve verilerin uyumlu olduğunu izlemişlerdir (Han ve diğerleri, 2009).

Mortazavi ve diğerleri (2010) yaptıkları çalışmada ağır beton (CoGa) kolemanit ve galena katkılayarak ürettikleri materyalin radyasyon zırh özelliklerini deneysel olarak ölçerek standart beton ile karşılaştırarak radyasyon absorpsiyonunda daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır (Mortazavi ve diğerleri, 2010).

Korkut ve diğerleri (2011) ametist taşının 276 keV ile 6 MeV enerjilerde gama radyasyonuna karşı zırhlama özelliklerini çalışarak betona göre daha iyi radyasyon zırh malzemesi olduğunu bulmuşlardır (Korkut ve diğerleri, 2011).

Saudi ve diğerleri (2011) $x\text{Bi}_2\text{O}_3-(30-x)\text{CdO}-10\text{B}_2\text{O}_3-2\text{Fe}_2\text{O}_3-40\text{P}_2\text{O}_5$ bileşikleri ile hazırladığı cam numunelerin radyasyon zırh özelliklerini incelediklerinde %5- %20 arasında Bi_2O_3 içeriği alınan malzemenin yüksek absorpsiyon gösterdiğini bulmuşlardır (Saudi ve diğerleri, 2011).

Baştuğ ve diğerleri (2011) PbO 'e, $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve H_3BO_3 bileşiklerinden farklı oranlarda karıştırarak 25,191 ile 57,903 keV enerjili X ışınlarına maruz bırakarak zırhlama özelliklerini incelemişlerdir. Özellikle $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin, X ışını radyasyonunu daha iyi soğurduğunu izlemişlerdir (Baştuğ ve diğerleri, 2011).

Buyuk ve Tuğrul (2014) Bor karbür içerikli kompozit malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama etkisini Cs-137 ve Co-60 radyoaktif kaynaklarını kullanarak incelemişlerdir. Özellikle, %70 Bor karbür (B_4C) ve %30 silisyum karbür (SiC) karışımının koruma özelliğini yüksek bulmuşlardır. Elde ettikleri deneysel verileri XCOM programındaki sonuçlar ile karşılaştırarak uyumlu olduğunu görmüşlerdir (Buyuk ve Tuğrul., 2014).

Sayyed ve diğerleri (2018) bazı beton numunelerinin, sepiyolit ve B_4C materyallerinden oluşturulan farklı konsantrasyonlarına karşı radyasyon zırhlama yetenekleri 0,08- 1,333 MeV'lik enerji aralığında aldıkları deneysel sonuçları, MCNPX ve XCom sonuçları ile karşılaştırmışlardır (Sayyed ve diğerleri, 2018).

Elsaman ve diğerleri (2020) $(59.5-x) \text{P}_2\text{O}_5-30\text{Na}_2\text{O}-10\text{Al}_2\text{O}_3-0.5\text{CoO}-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ ($x = 1, 2, 3, 4$ and $5 \text{ mol\%}$) cam sistemlerini kullanarak 356 keV (^{133}Ba) and 662 keV (^{137}Cs), gama radyasyon zayıflatma katsayılarına bakmışlardır. Çalışmada $0,015-15 \text{ MeV}$ foton enerjisinde XCOM programını kullanmışlardır. Sonuçta Nd_2O_3 değerine ($5 \text{ mol\%}$) sahip ND5 numunesinin mükemmel nükleer radyasyon koruma özellikleri gösterdiğini vurguladılar (Elsaman ve diğerleri, 2020).

Abou Hussein ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada; üçlü karışım olan lityum bizmut silikat cam bileşimine 2 PbO , BaO veya SrO (hepsi ağırlıkça $\%$ olarak alınmıştır) katkılayarak, NaI (TI) dedektörü ve Phy-X/PSD yazılımını kullanarak deneysel olarak ölçülen ve teorik olarak hesaplanan kütle zayıflama katsayısını hesaplayarak uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir (Abou Hussein ve diğerleri, 2021).

Sayyed ve diğerleri (2021-a) $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{TiO}_2-\text{Na}_2\text{O}-\text{TeO}_2$ 'nin mekanik ve radyasyon koruma özelliklerine bakarak Bi_2O_3 'ün katkısının soğurmayı arttırdığını izlemişlerdir. Çalışma teorik hesaplama olan Geant4 kodlu Monte Carlo simülasyonu ve ayrıca Phy-X yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Her iki programa ait verilerin uyumlu olduğu izlenmiştir (Sayyed ve diğerleri, 2021-a).

Sayyed ve diğerleri (2021-b) $(80-x)\text{TeO}_2-x\text{B}_2\text{O}_3-5\text{ZnO}-5\text{Li}_2\text{O}_3-10\text{Bi}_2\text{O}_3$: $30 \leq x \leq 80 \text{ mol\%}$) oranlarında kaplama yaptıkları camları 15 keV ile 15 MeV arasındaki çeşitli enerjiler için radyasyon koruma parametrelerine Phy-XPSD programı ile teorik olarak incelemişlerdir. Tüm numuneler için maksimum zayıflama 15 keV 'de gerçekleşmiş ve kütle zayıflama katsayısı $52,309$ ile $57,084 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişim göstermiştir (Sayyed ve diğerleri, 2021-b).

Sayyed ve diğerleri (2021-c) yaptıkları çalışmada $(95-y)\text{P}_2\text{O}_5-y\text{Bi}_2\text{O}_3-5\text{Nb}_2\text{O}_5$ camlarda $y = 10; 12,5; 15$ ve $17,5 \text{ mol\%}$ alarak lineer zayıflatma katsayısı (LAC), kütle zayıflatma katsayısı (MAC), yarıdeğer kalınlık (HVL), ondabir kalınlık (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarasını (Z_{eff}) $20, 40, 60, 80$, and 100 keV enerjilerinde incelemişler ve özellikle Bi_2O_3 katkısının artması ile radyasyon soğurma özelliğinin arttığını izlemişlerdir (Sayyed ve diğerleri, 2021-c).

Bektaşoğlu ve diğerleri (2020) çalışmalarında $75\text{TeO}_2\text{--}15\text{ZnO--}(10\text{-x})\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--xGd}_2\text{O}_3$, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mol%, metalleri ile camları katkılıyarak, 20, 30, 40, 60, keV enerjili fotonlar için radyasyon soğurma özelliklerine FLUKA ve XCOM programları ile bakmışlardır. Camdaki, Gd_2O_3 katkısının artışı ile hesaplanmış olan yarıdeğer kalınlık ve Z_{eff} değerinin artmış olduğu izlenmiştir (Bektaşoğlu ve diğerleri, 2020).

Alzahrani ve diğerleri (2021) $40\text{PbO--}50\text{B}_2\text{O}_3\text{--}10\text{ZnO}$, $30\text{PbO--}50\text{B}_2\text{O}_3\text{--}10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--}10\text{ZnO}$, and $20\text{PbO--}50\text{B}_2\text{O}_3\text{--}20\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--}10\text{ZnO}$ konsantrasyonlarında $4\text{ mm} \pm 0.07$ kalınlığında cam örnekleri hazırlayarak karakteristik özelliklerine bakmışlar. Aynı zamanda FLUKA ve XCOM programları ile de radyasyon absorpsiyon özelliklerini incelemişlerdir. 0,1–10 MeV enerji değerlerinde elde edilen kütle soğurma katsayısı sırasıyla 0,0369- 3,5494; 0,03769- 3,794 ve 0,03816- 3,97 $\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$ aralıklarında bulunmuştur (Alzahrani ve diğerleri, 2021).

Alajerami (2021) tarafından yapılan çalışmada, $20\text{Na}_2\text{O} \cdot 15\text{CdO} \cdot \text{xBi}_2\text{O}_3 \cdot (65\text{-x})\text{B}_2\text{O}_3$, (x= 0, 10, 20 ve 30 olmak üzere) karışımı ile oluşturduğu cam numunelerin XCOM, Phy-X/PSD ve SRIM programları kullanılarak gama, nötron, proton ve alfa ışını için zırhlama özelliklerini incelemiştir. 0,1; 0,5; 1; 3; 5 ve 15 MeV enerji değerlerinde kütle zayıflama katsayısını (μ/ρ) XCOM ve Phy-X simüle ederek özellikle Bi_2O_3 ilavesi, μ/ρ değerlerinde önemli bir artış olduğunu göstermiştir (Alajerami, 2021).

Aloraini ve diğerleri (2022) ağır metal oksit katkılı magnezyum borat camlarda B_2O_3 yerine Bi_2O_3 konsantrasyonu artırdıklarında EpiXS programı ile yaptıkları hesaplamada radyasyon soğurma özelliğinin arttığını görmüşlerdir (Aloraini ve diğerleri, 2022).

Aldhuhaibat ve diğerleri (2022) yeni tip borosilikat cam sisteminin (x) PbO : 0,12 B_2O_3 :(0,8-x) SiO_2 :0,08 K_2O (burada: x = 0,05; 0,15; 0,3; 0,5) PbO katkı konsantrasyonlarını alarak γ -foton zayıflama özelliklerine (0,005–3 MeV) enerji aralığında XMudat ve XCOM, Phy-X yazılım programları ile bakmışlardır. Önerilen cam sisteminin yüksek performanslı bir radyasyon kalkanı olarak kullanılabileceğini görmüşlerdir (Aldhuhaibat ve diğerleri, 2022).

Aladailah ve diğerleri (2023) $40\text{Na}_2\text{O--}(60\text{-x})\text{P}_2\text{O}_5\text{-xGeO}_2$ ve $40\text{Na}_2\text{O--}10\text{B}_2\text{O}_3\text{--}(50\text{-x})\text{P}_2\text{O}_5\text{-xGeO}_2$ cam sistemlerinin, x=0–30 mol%' ün radyasyondan korunmada soğurma özelliklerini incelenmişlerdir. Çalışmalarında 0,02–20 MeV foton enerjileri dahilinde

MCNP5 kodu kullanılarak simüle edilmiş ve simüle edilen MAC değerleri, XCOM veri tabanı kullanılarak teorik olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Simüle edilmiş μ_m 'ye dayalı olarak doğrusal zayıflama katsayısı (LAC), yarı değer katmanı (HVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkili atom numarası (Zeff) belirlenmiş, μ_m ' in foton enerjisinin artmasıyla azaldığı ve GeO₂ oranının (mol%) artmasıyla arttığı bulunmuştur. Daha yüksek MAC, LAC değerleri ve daha düşük HVL ve MFP değerleri nedeniyle, %30 mol GeO₂ konsantrasyonuna sahip NaPGe-30 camının gelişmiş gama ışını koruma performansına sahip olduğu gösterilmiştir (Aladailah ve diğerleri, 2023).

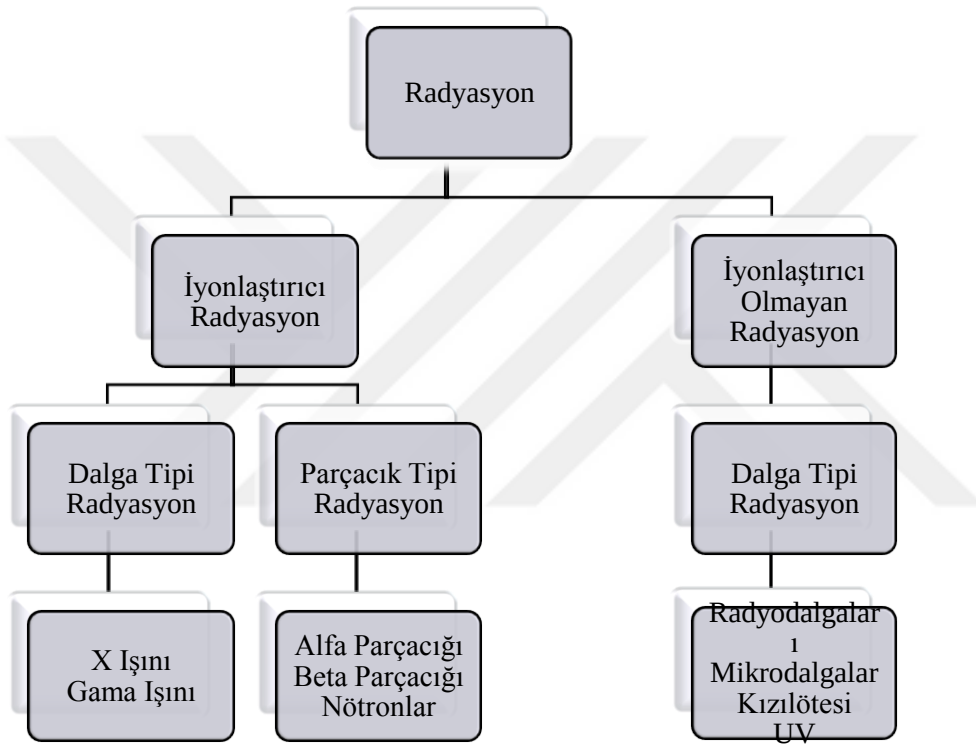
Abouhaswa ve diğerleri (2023) $55\text{B}_2\text{O}_3 + 25\text{P}_2\text{O}_5 + (20-x)\text{BaO} + x\text{SrO}$: $x = 0$ (BPBSr0), 5 (BPBSr5), 10 (BPBSr10), 15 (BPBSr15), and 20 (BPBSr20) % mol değerlerini kullanarak eriyik söndürme işlemi ile ürettiği cam bileşimlerinin 0,015–15 MeV foton enerjisi içerisinde fiziksel, yapısal ve radyasyondan korunma özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonrası kütle soğurma katsayıları arasındaki sıralamanın $(\text{BPbSr0})_{\mu_m, \mu} > (\text{BPbSr5})_{\mu_m, \mu} > (\text{BPbSr10})_{\mu_m, \mu} > (\text{BPbSr15})_{\mu_m, \mu} > (\text{BPbSr20})_{\mu_m, \mu}$ olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Abouhaswa ve diğerleri, 2023).

Güncel literatür incelenmesinden de görüldüğü gibi kompozit numuneler üzerine gerçekleştirilen radyasyon zırhlama çalışmaları nadirdir ve bu tür malzemelerin radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması günümüzde hız kazanmıştır. Hatta polyester tabanlı inorganik malzeme katkılı polimer kompozitler üzerinde yapılan radyasyon zırhlama çalışmaları yok denecek kadar azdır. Böylece oluşturulan kompozitlerin kütle azaltma katsayısı, lineer azaltma katsayısı, yarı kalınlık değeri, serbest ortalama yol değerleri hesaplanarak literatüre katkıda bulunabilecektir.

2.1 Radyasyonun Tanımı

Elektromanyetik dalga paketleri ya da parçacıklar biçimindeki enerji aktarımı veya emisyonu "radyasyon" olarak tanımlanır. Belirli bir kütle ve enerjiye sahip atom ve atom altı parçacıklar "parçacık tipi radyasyonu" oluşturur. Enerji taşıdığı halde kütlesiz fotonlardan oluşan radyasyon çeşidine "dalga tipi radyasyonlar" denir. Dalga tipi radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki grupta incelenir. Madde ile etkileştiğinde iyonizasyona sebep olmayan radyasyon çeşitleri "iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar" olarak adlandırılır ve görünür ışık, mikrodalgalar ve

radio dalgalarını içerir. Madde içinde atomun elektronları ile etkileşime girerek yapısal değişikliklere neden olabilen radyasyon türü ise "iyonlaştırıcı radyasyon" olarak bilinir. Hem parçacık hem de dalga tipi iyonlaştırıcı radyasyonlar; alfa, beta parçacıkları, gama ışınları, X-ışınları ve nötronlar olmak üzere beş çeşittir. İyonizasyon canlı dokuda serbest radikallerin oluşumu yada direkt DNA'da bulunan genlerde değişikliklere neden olabilir. Özellikle DNA'da olan hasar nedeni ile iyonlaştırıcı radyasyon canlılar için tehlike arz etmektedir [TAEK]. Radyasyon çeşitleri Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Radyasyon ve çeşitleri

2.1.1 İyonlaştırıcı radyasyon

Atomlardan ve moleküllerden elektron koparmak yeterli enerjiye sahip bir elektromanyetik radyasyonla mümkündür. İyonlaşma derecesi ve niteliği, yoğunluk ve her bir radyasyon çeşidinin enerjilerine bağlıdır. Elektromanyetik spektrum elektromanyetik radyasyon yayımlanma kaynağı olarak yapılan sınıflandırmaya göre gama ışınlarından radyo dalgalarına kadar yayılmış sürekli ışıma dizisidir. Bütün elektrik ve manyetik alanlar, yüklü parçacıkların hareketinden doğar. Durgun olan yükler kısa menzilli coulomb alanı

oluştururken, ivmelenen yüklerin oluşturduğu alan ise elektromanyetik alan olup erişimi sonsuzdur. Fotonun sahip olduğu enerji,

$$E = h \vartheta \quad (1)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada,

E= enerji,

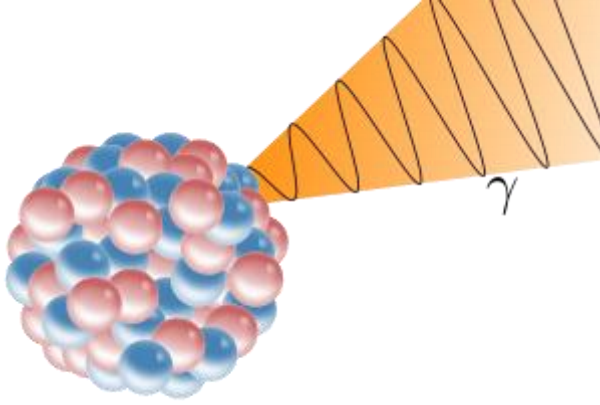
$h=6,6256.10^{-31}$ J.s (S.I birim sistemi) (planck sabiti),

ϑ = frekansı ifade etmektedir.

Fotonun enerjisi frekansı ile doğru orantılı olup dalga boyu ile ters orantılıdır. Elektromanyetik radyasyonlar frekans ve enerjilerine göre sınıflandırılabilir. Enerjisi en yüksek olan radyasyon çeşidi gama ışınları olup en düşük enerjiye sahip olan elektromanyetik radyasyon çeşidi radyo dalgalarıdır.

Gama (γ) ışınları

Alfa ve beta bozulmaları çoğu nükleer reaksiyonda olduğu gibi oluşan ürün çekirdeğini uyarılmış durumda bırakır. Bu uyarılmış durumlarda bir veya daha fazla γ -ışınını kısa bir süre içinde yayınlayan çekirdek taban durumuna geçer. Gama ışınlarının enerjisi 0,1-10 MeV arasında olup çekirdeğin taban durumları arasındaki enerji farkı mertebesinde 10^4 - 10^6 eV dalgaboyu aralığına karşılık gelir (Krane, 1998). Diğer elektromanyetik radyasyon türleri ile kıyaslandığında çok daha kısa dalga boyuna sahip olup enerji değeri yüksektir (Şekil 2.2). Gamalar yüksüz parçacıklar olduğundan γ -ışımının gerçekleştiği çekirdekte atom numarası ve kütle numarası değişmez. Yüksek hıza sahip olup menzilleri oldukça yüksektir. Giriciliklerinin yüksek olması nedeni ile γ -ışınlarını durdurabilmek için oldukça kalın beton veya kurşun bloklar kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2.2. Gama bozunması (Uo ve diğerleri, 2015)

X ışınları

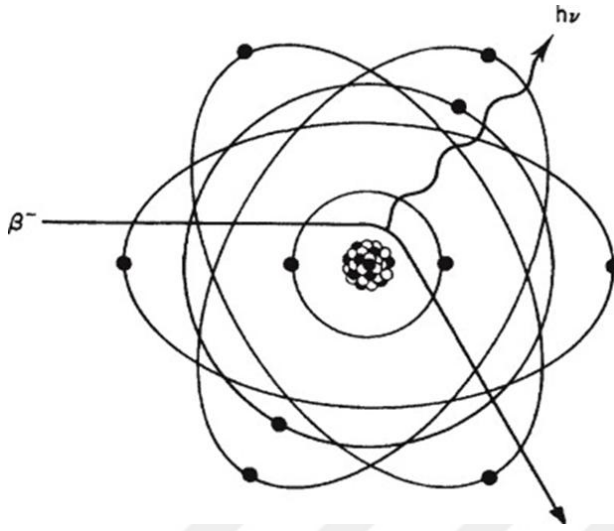
W.C. Roentgen, yüksek gerilim verdiği Crookes tüpünden çıkan ışınların baryum içerikli platin siyanür kristallerinde kuvvetli bir floresans etkisi gösterdiğini izlemiştir. Çalışmalarına devam ettiğinde floresans etkisine neden olan ışının penetrasyon gücüne sahip olduğu sonucuna varmıştır. Tesadüfen bulmuş olduğu bu ışına bilinmeyen anlamında X-ışını adını vermiştir. X-ışınlarının keşfinden sonra opak cisimlerden kolaylıkla geçtiği, fotoğrafik etkisi ve fosforlu maddelerde parlamaya neden olduğu kısa süre içinde bulunmuştur. X-ışınları bir elektromanyetik dalga olup elektrik alan vektörü dalganın yayılma doğrultusuna diktir. +x yönünde saçılan X-ışını, yalnızca y doğrultusunda elektrik alan vektörüne sahip olduğu için düzlemi polarizedir. Y eksenini doğrultusunda titreşen X-ışınları sadece x-z düzleminde ışıma yaparak yayılacaktır. Saçılan X-ışınlarının x-z düzleminin dışında gözlenemiyor olması X-ışınlarının dalga özelliğini doğrulamaktadır.

W.C. Roentgen' den dolayı röntgen ışınları olarak da bilinen X-ışınları, 0,01nm- 10nm aralığında dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalardır. Yüksek atom numaralı metallerle zırlama yapılabilir. X-ışınları, sürekli X-ışınları ve karakteristik X-ışınları olmak üzere iki grupta incelenir.

Sürekli X-ışınları

Elektron, proton veya α parçacıkları gibi yüksek enerjiye sahip olan yüklü parçacıklar ağır çekirdeklerin coulomb alanından etkilenerek yavaşlar. Bu yavaşlama sonucunda sürekli X-

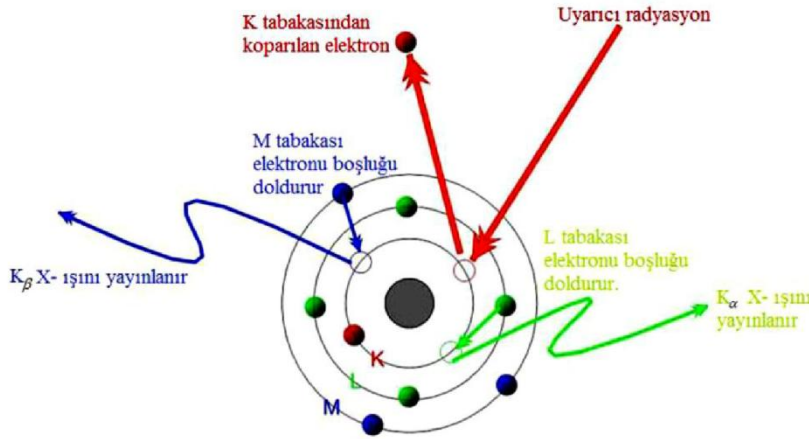
ışınları ortaya çıkar. De Broglie dalga modeline göre; elektron kendine eşlik eden elektromanyetik dalga ile çekirdeğin çevresinde hareket ederken aniden saçılmaya uğrar ve çekirdeğin çekim kuvvetinden dolayı farklı bir yönde ivmelenerek enerjisinin bir kısmını ya da tamamını kaybeder. Oluşan radyasyon hedefe çarpan elektronun enerjisinin sadece %1'lik kısmıyla oluşur (Şekil 2.3). Sürekli X-ışınına ait frekans aralığı geniş olduğu için beyaz x-ışınları olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 2.3. Sürekli X-ışınlarının oluşumu (Michael, 2003)

Karakteristik X-ışınları

Elektronlar klasik teoriye göre çekirdek etrafında belirli yörüngelerde dolanmaktadır. Yörüngelerde dolanırken sahip oldukları hızlarından dolayı kinetik enerjiye ve çekirdeğe olan mesafesinden dolayı da bir potansiyel enerjiye sahiptir. Dış yörüngelere gittikçe potansiyel enerjinin artışı nedeni ile yüksek hıza sahip olmasına rağmen bulundukları konumu korurlar. Yeterli enerjiye sahip bir foton elektronun uzaysal konumunu değiştirdiğinde iç veya dış tabakalar arasında elektronların geçişi söz konusu olur. Gelen fotonun enerjisi iç tabaka elektronlarından birini yerinden kopardığında boşalan elektronun yerini üst yörünge elektronlarından biri alır. Bu geçiş işlemi belli geçiş kurallarına ve minimum enerji prensibine uygun olarak gerçekleşir. Ortaya çıkan bu geçiş esnasında iki tabaka arasındaki enerji farkı kadar bir X-ışını yayımlanır. Yayınlanan X-ışını malzemeye özgü özellikler taşıdığı için karakteristik X-ışını olarak adlandırılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Karakteristik X- ışını oluşumu (Wulandari ve diğerleri, 2022)

Alfa parçacıkları

Bazı radyoaktif çekirdek ve parçacık hızlandırıcılar tarafından yayınlanan alfa parçacıkları çekirdeğin nötron ve proton fazlalığından meydana geliyorsa, çekirdekten iki proton ve iki nötrondan oluşan bir α -parçacığı yayınlanır. Atomun kütle numarası dört birim, atom numarası ise iki birim azalarak daha küçük ve kararlı bir çekirdeğe dönüşür. Bozunma denklemi aşağıda Eşitlik 2’de görülmektedir.



Alfa yayımı olabilmesi için bozunum ağır çekirdeklerde olmalıdır. Bu nedenle alfa bozunmasında kütle numarası genel olarak $A > 150$ olan çekirdeklerde mümkündür (Ra-226, Rn-222 v.b). Alfa yayılımı çekirdekten olduğu için spektrumları kesiklidir. Sahip olunan enerji değeri, enerji korunumu ifadesinden,

$$Q = \Delta mc^2 = [m(X) - m(X') - m({}^4_2He)].c^2 \quad (3)$$

Herhangi bir dış etki olmaksızın bozunmanın kendiliğinden olabilmesi için ağır çekirdeklerde $Q > 0$ olmalıdır. Radyoaktif radyumun alfa parçacık yayılımı Eşitlik 4’ de verilmiştir.



Beta ışıması

Betalar içinde olan materyalin özellik ve parçacığın enerjisine bağlı olarak yayınlanır. Çekirdeğe yaklaşan beta parçacıkları frenlenme sonucu X-ışını yayarak enerjilerini kaybederler. Beta parçacıkları yüksek atom numaralı malzemeler ile zırhlandığında bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu oluşur. Bu nedenle betaları durdurabilmek için alüminyum ya da plastik gibi atom numarası düşük olan materyaller kullanılmalıdır. Çok küçük durgun kütleye sahip olduklarından dolayı hızları çok yüksektir. Enerjileri genellikle 4 MeV mertebesinin altındadır. Beta bozunumu üç tipte incelenir;

β^- bozunumu

Çekirdekte kararsızlık nötron fazlalığından kaynaklanıyor ise nötronun protona dönüşümü ile bir elektron ve bir de kütsüz antinötrino oluşturur (Krane, 1998). β^- parçacıklarının yükü ve kütlesi elektronun yüküne ve kütlesine eşittir. Hızları çok yüksek olduğundan hava ortamında 3-5 m yol alabilirler. β^- bozunumu tepkimesi aşağıda verilmiştir.



Eşitlik 5’de n, nötronu; p, protonu; $\bar{\nu}$, antinötrino ifade eder. Antinötrino kütlesi ve yükü olmayan bir parçacıktır.

β^+ bozunumu

Çekirdekte kararsızlık proton fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek fazla protonunu nötrona dönüştürerek kararlı yapıya ulaşır. Bozunma sonucu bir nötron ve pozitron (pozitif yüklü elektron) oluşur (Krane, 1998). Bozunma denklemi aşağıda verilmiştir.



Eşitlik 6 ‘da dönüşüm sonrasında nötron pozitronun dışarı fırlatılması ile çekirdekte kalır. Bunun sonucunda çekirdeğin proton sayısı bir azalırken nötron sayısı bir artacağından atomun kütle numarası değişmez.

Elektron yakalama olayı

İç yörünge elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanarak proton ile birleşir. Tepkime sonucu çekirdek yükü bir azalırken nötron sayısı bir artar. Bozunma tepkimesi aşağıda verilmiştir.



Eşitlik 7’ de verilen beta bozunumu, çekirdek yükü değişirken kütle numarasının aynı kalması ile “izobarik dönüşümler” olarak adlandırılır.

Nötron radyasyonu

Çekirdekte meydana gelen fisyon ve füzyon olayları sırasında, kararsız olan atom çekirdeklerinden nötronlar yayınlanır. Nötronlar kozmik ışınlarda olabildiği gibi yapay olarak da elde edilir. Kütleleri yaklaşık olarak protonun kütlesine eşit olup yüksüz parçacıklardır. Bu nedenle madde ortamında giricilikleri oldukça yüksek olup aynı zamanda gama radyasyonlarının yayınlanmasına neden olurlar. Aynı anda iki iyonize parçacık oluşturabilmesi nedeni ile ciddi bir zırhlamaya ihtiyaç duyulur.

2.1.2 İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar

Morötesi ışınlar, Kızılötesi, Radyo dalgaları, Mikro dalgalar ve Görünür Bölge ışınları bu başlık altında yer alır.

Morötesi ışınlar

Elektromanyetik spektrumun görünür bölge sonrasında yer almış olup dalga boyu 100 ile 400 nm değerine sahiptir. UV ışınlar farklı karakteristik özelliklere sahip olduğundan dolayı UV-A, UV-B ve UV-C olmak üzere üç kategoride incelenmektedir.

UV-A: UV ışın türünün %95’ ini kapsıyor olması ile ozon tabakasından geçebilen mor ötesi ışın türüdür.

UV-B: UV ışın türünün %5’ ini kapsıyor olup canlılar için tehlikelidir. Ozon tabakası tarafından geçişi engellenir.

UV-C: Canlı organizmalar için en tehlikeli UV ışınlarıdır. Ozon tabakasından geçişi engellenir.

Morötesi radyasyonun deride yanık izi, bakteri ve virüslerde mutasyona neden olabilmesi ve mitoz sırasında bölünmeyi etkileyerek anomali bir şekilde büyümeye neden olabilir (Güler ve Çobanoğlu, 1994).

Radyo dalgaları

Televizyon ve radyo vericileri başta olmak üzere uydu, radar, telefon- telgraf haberleşme gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Mikrodalgalar

Radar sistemleri, mikrodalga fırın, bluetooth kulaklıklarında, mağaza güvenlik sistemlerinde, cep telefonları, kablosuz İnternet erişimi gibi geniş alanda kullanılan mikrodalga frekansları, elektromanyetik dalga olarak yayılırlar. "mikrodalga" ifadesi 1 metreden kısa elektromanyetik dalga boyunun olduğu frekansları tanımlar. Mitoz yeteneği çok fazla olan, gözler ve testisler mikrodalgaların etkisine çok duyarlıdır.

Lazer ışınlar

Lazer ışınları, aynı dalga boyunda ve aynı yönde yayılan tek renkli ve yoğunlaştırılmış elektromanyetik ışın demetleridir. Lazer ışınları genellikle çeşitli endüstriyel, bilimsel, tıbbi ve askeri alanlarda kullanılır (İnternet 8 URL).

Endüstriyel alanda, lazer ışınları kesme, kaynak, delme ve işaretleme gibi işlemler için kullanılır. Lazer kaynak makineleri, iki metal parçayı kaynaştırmak için kullanılabilir.

Bilimsel araştırmalarda, lazer ışınları, atomlar, moleküller ve kristallerin yapısını incelemek için kullanılır. Ayrıca, lazerler, optik veri depolama, uzak ölçüm ve hatta lazerler kullanarak dünyanın yörüngesini ölçmek gibi astronomik gözlemler için de kullanılabilir (İnternet 9 URL).

Tıp alanında, lazer ışınları, lazer cerrahisi ve diş hekimliği gibi çeşitli tedavi yöntemleri için kullanılır. Lazer cerrahisi, örneğin göz ameliyatları veya cilt kanserinin tedavisi için kullanılabilir. Son yıllarda epilasyon işlemlerinde de lazer ışınlarından yararlanılır.

Son olarak, askeri alanda, lazerler, hedef belirleme, mesafe ölçme, iletişim ve lazer silahları gibi birçok uygulama için kullanılır (İnternet 10 URL).

Kızılötesi radyasyon

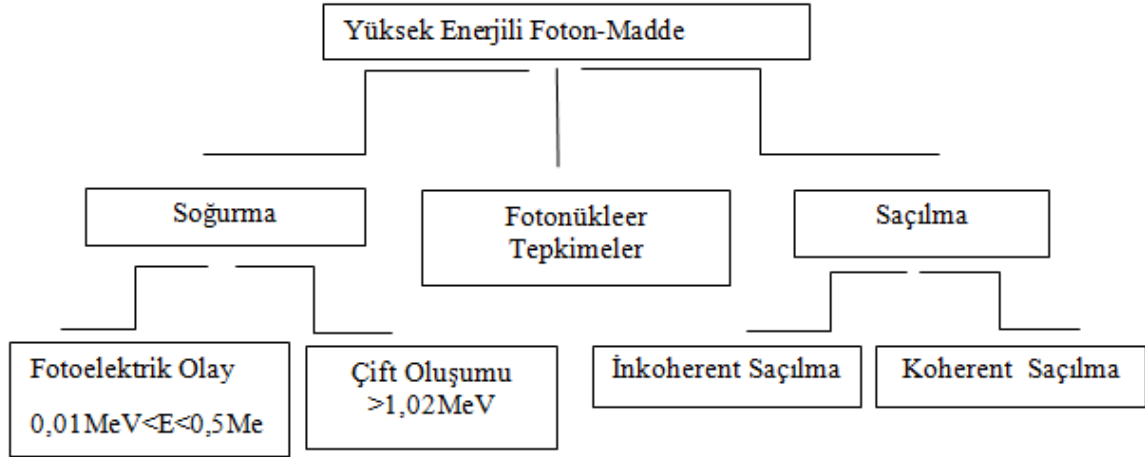
Elektromanyetik spektrumun 700 nm ile 1 mm dalgaboyu aralığında bulunan ışınlardır. Enerjileri yüksek olmadığından giriciliği yüksek değildir. Fakat kontrol edilemezse; ciltte yanık, katarakt ve gözde retinal zarara neden olabilir. Kızılötesi ışınlar yansıtıcı yüzeylerden kolaylıkla yansıtılabilirler (Güler ve Çobanoğlu, 1994).

2.2 Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyondan korunma yöntemlerinin temelini oluşturan olgu madde ile etkileşimdir. Madde ortamına giren radyasyon enerjisine ve ortamın taneciklerine göre, farklı mekanizmalarla etkileşime girerek enerjisinin bir kısmını kaybederek madde taneciklerinde de değişime neden olmaktadır. Enerjideki azalmanın nedeni zırlamadır. Radyasyonun farklı enerjilerine göre radyasyon zırlamasında kullanılan materyallerde farklılık göstermektedir. Materyallerin farklı olması fotonun etkileştiği ortamdaki atomun proton sayısı ve yoğunluğu ile birebir ilişkilidir. Radyasyon ile etkileşimde yüklü ve yüksüz parçacıkların birbirinden ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir (Knoll, 2012).

Madde ile etkileşimde en önemli parametreler; enerji, kütle, momentum ve parçacığın ya da ortamın yüküdür. Radyasyon madde içinde ilerlerken çeşitli soğurma ve saçılma ile ortam taneciklerinin uyarılmasına veya iyonizasyona neden olur. Madde içine giren yüklü parçacıklar önemli miktarda enerji kaybederken, fotonlar ve nötronlar, saçılma ve soğurma olayları ile maddeye enerji aktarılırlar. Madde içindeki radyasyon atomun yüklü parçacığı olan elektronlarla çarpışmaya uğrayarak enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak elektronu yerinden koparır ve iyonizasyona neden olur. Madde içinde enerjisini bitirene kadar binlerce iyonlaşmaya yol açabilir.

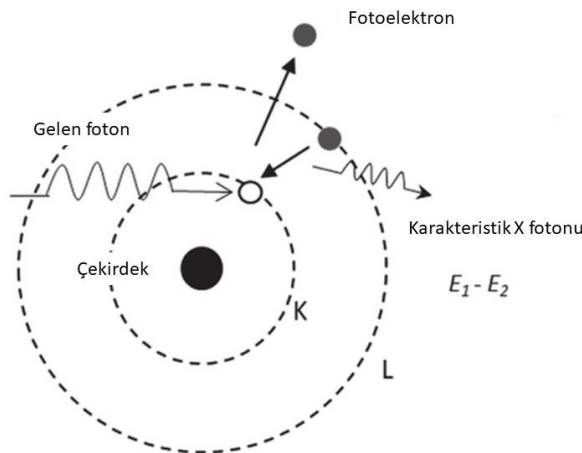
Çizelge 2.1. Radyasyon madde etkileşimleri



Madde ortamındaki fotonların etkileşim mekanizmaları olan compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşumu aşağıda açıklanmaktadır.

2.2.1 Fotoelektrik olay

Düşük enerjili bir foton, atomun K yörüngesinde bulunan elektronla etkileşir. Fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden büyükse enerjisinin tamamını elektrona aktararak onu yörüngesinden söker (Şekil 2.5). Fotoelektrik etki olarak oluşan olay sonrası enerjinin bir kısmına sahip olan elektrona fotoelektron denir. Fotoelektron dışında kalan foton enerjisi yörüngedeki elektronun sahip olduğu bağlanma enerjisi için harcanır. Koparılan elektrondan oluşan elektron boşluğu, diğer yörünge elektronlarından biri tarafından doldurulur ve bu sırada X-ışını yayımlanır (Ermiş, 2014)



Şekil 2.5. Fotoelektrik olay (Manninen, 2014)

Fotonun elektronu koparması için minimum enerji olan eşik enerji değerini sağlaması gerekir. Enerji eşik değerin altında olduğunda yörüngeden elektron koparamaz. Fotoelektrik olayın gerçekleşebilmesi için elektronun yörüngedeki bağlanma enerjisinden daha yüksek bir enerjiye sahip olması gerekir. Böylece enerjinin bir kısmını elektronu kopardıktan sonra fotoelektrona kinetik enerji olarak aktarır. Serbest hale geçen fotoelektronun kazandığı kinetik enerji Eşitlik 8 ile verilmiştir;

$$E_k = h\nu - E_b \quad (8)$$

ifadesi ile verilir.

Her iki enerji arasındaki fark azaldıkça fotoelektrik olay olasılığı da o kadar azalmaktadır. Fotoelektrik etkileşme fotonun sahip olduğu enerji nedeni ile daha çok atomun iç kabuktaki K tabakasında olmaktadır. Daha iç kabukta bulunan L, M, N, tabakaları için fotoelektrik etki ihtimali gittikçe azalmaktadır. Fotoelektrik soğurma katsayısı, soğurucu malzemenin atom numarasına ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır (Knoll, 1999).

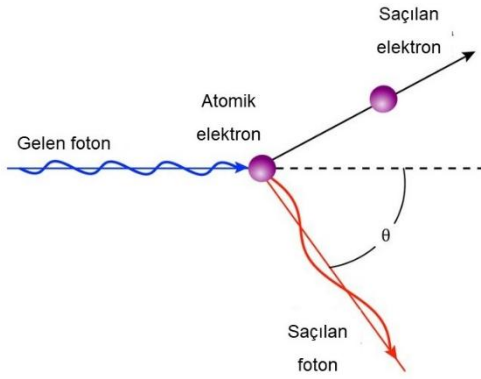
2.2.2 Koherent saçılma

Bu saçılma elastik saçılma veya Rayleigh saçılması olarak da adlandırılır. Fotonun sahip olduğu enerji atomun sıkı bağlı elektronunun bağlanma enerjisinden küçük ise koherent saçılma meydana gelir. 0,1- 0,5 MeV enerji aralığında koherent saçılma olma olasılığı daha baskındır. Saçılma sonrasında atomda herhangi bir değişiklik olmadığı gibi enerji aktarımı da gerçekleşmediğinden iyonizasyon da oluşmaz. Atomun elektronlarından birine çarpan foton yön değiştirir. Saçılan fotonun şiddeti, atoma gelen fotonla saçılan fotonun dalga boyları aynı olup, her bir elektron tarafından saçılan radyasyonun genliklerinin toplamına eşittir (Knoll, 1999).

2.2.3 İnkoherent Saçılma (Compton Olayı)

Atoma sıkı bağlı olmayan dış yörünge elektronun yüksek enerjili foton ile çarpışarak fotonun enerji kaybederek saçılması olayıdır. Çarpışmaya uğrayan elektron ise enerjinin bir kısmını soğurur ve bir kısmı ile de saçılmaya uğrar. Foton kalan enerjisi ile gidiş yönünden θ açısı ile sapmaya uğrar. Bu tip saçılmalarda gelen fotonun enerjisindeki kayıp

nedeniyle saçılan fotonların dalga boyları gelen fotonların dalga boyundan daha büyük olur. En çok gözlemlenen inkoherent saçılma şekli compton saçılmasıdır. Genellikle 0,1-10 MeV enerji değerlerinde daha baskındır. Gelen fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden çok büyük olduğunda compton olayı gerçekleşebilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Compton olayı (Omer ve Hajima, 2018)

Saçılan foton, gelen foton ve elektron aynı düzlemde olup, momentum ve enerji korunur. Korunum yasası gereği;

$$E'_\gamma = E_\gamma / (1 + \alpha (1 - \cos\theta)) \quad (9)$$

ifadesi yazılır. Eşitlik 9'daki değişkenler, E'_γ = saçılan fotonun enerjisi; E_γ = gelen fotonun enerjisidir.

Eşitlik 10'da,

$$\alpha = E / m_0 c^2 \quad (10)$$

yazılır. Burada m_0 = elektronun durgun kütlesi; $m_0 c^2$ = elektronun durgun kütle enerjisidir.

Gelen fotonun enerjisiyle, saçılan fotonun enerjisi arasındaki fark geri tepen elektronun enerjisi kadardır. Yüksek enerjili fotonlar enerjilerinin fotoelektrik seviyeye kadar inmesi ile compton saçılmasına uğrar. Enerji oldukça fazla azaldığında ise fotoelektrik olayla soğrulurlar (Knoll, 1999). Dolayısı ile Compton dalga boyu,

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = h / (m_0 c (1 - \cos\theta)) \quad (11)$$

olarak elde edilir. Eşitlik 11' de $\lambda =$ gelen fotonun, $\lambda' =$ saçılan fotonun dalga boyu olmak üzere gelen fotonun dalga boyundaki değişim $\Delta\lambda$ ile ifade edilmiştir. $\theta =$ fotonun saçılma açısı ve $c =$ ışık hızıdır.

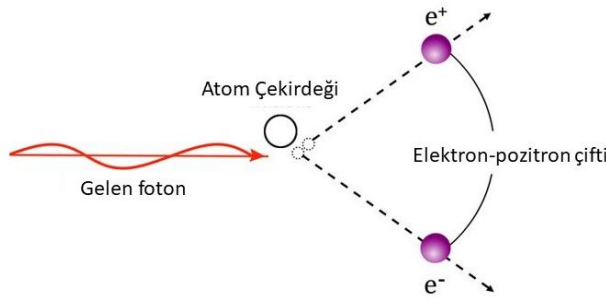
2.2.4 Çift Oluşumu

Ağır bir atom çekirdeğinin çok yakınından geçen yüksek enerjili fotonlar soğurulmaya uğrayarak, elektron ve pozitrona dönüşürler. Bu olay sonucunda toplam yük, çizgisel momentum ve toplam enerji korunur. Çift oluşumu, bir çekirdeğin veya yüklü bir parçacığın etrafında meydana gelebilir.

Çift oluşumunda, elektron ve pozitronların kütleleri yüksek foton enerjisinin maddeye dönüşümü ile ($E = mc^2$) hasıl olmuştur. Gelen fotonun enerjisinden kalan enerji pozitron ve elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Çift oluşumu ile ortaya çıkan elektronlar serbest elektron davranışı ile madde içinde ilerlerken iyonlaşmaya neden olurlar. Ortaya çıkan pozitron ise madde içinden geçerken elektronla birleşerek anhilisyona neden olur. Bu olayın sonucunda zıt yönlü enerjileri 0,511 MeV olan iki γ ışını yayınlanır. Bu yolla meydana gelen fotonlar fotoelektrik olay ile soğurulur (Şekil 2.7). Çift oluşumunun olabilme olasılığı atom numarasının artışı ile artacaktır (Hubbell, 2006). Çift oluşumunda enerji eşitliği;

$$h\nu = 2m_0c^2 = E_k = 1,022MeV \quad (12)$$

Burada; $h\nu =$ gelen fotonun enerjisi; $2m_0c^2 =$ elektronun ve pozitronun durgun kütle enerjileri toplamı olan $2m_0c^2 = 2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$ 'den büyük ya da eşit olması gerekir (Knoll, 1999).



Şekil 2.7. Çift oluşumu (Omer ve Hajima, 2018)

2.3 Elektromanyetik Radyasyonun Soğurulması

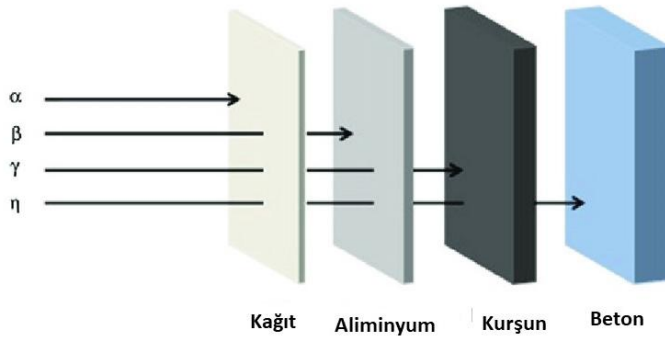
Fotonlar madde içinde baskın olarak, Fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu olayları ile enerji kaybeder. Elektromanyetik radyasyonun sahip olduğu enerjideki azalmanın nedeni geçtiği madde tarafından enerjinin bir kısmının ya da tamamının soğurulmasıdır. Radyasyondan korunmada alınacak tedbirler zaman, mesafe ve zırhlama olmak üzere üç temel kurala dayanmaktadır (Şekil 2.8). Zaman kuralında radyasyona maruz kalma süresini azaltarak alınan doz miktarının düşürülmesi amaçlanır. Mesafe kuralı ise; herhangi bir radyasyon kaynağından uzak olma şartıdır. Çünkü alınan radyasyon dozu uzaklığın karesi oranında azalır.



Şekil 2.8. Radyasyondan korunma kuralları (İnternet 2 URL)

Zırhlama ise; radyasyon kaynağı ile canlı arasına, gelen fotonun türüne göre engel konulması ile radyasyonun etkilerini ortadan kaldırabilmek ya da etkisini en aza indirebilme amacı ile geliştirilen malzemelerdir (Şekil 2.9). Farklı radyasyonlar türleri için farklı zırhlama materyalleri ve materyal üretim yöntemleri bulunmaktadır (Yülek, 1992).

Madde ortamının lineer azaltma katsayısına bağlı olarak gelen X veya γ radyasyonu madde ile etkileşecektir. Bu katsayı, gelen fotonun enerjisine, absorbe eden ortamın atom numarasına ve yoğunluğuna bağlıdır. Materyal kalınlığı değiştirilerek radyasyon absorpsiyonu değiştirilebilir, kalınlık arttıkça radyasyon emilimi de artacaktır (Yaramış, 1985)



Şekil 2.9. Radyasyon çeşitlerine göre soğurma materyalleri (Ahn ve diğerleri, 2015)

Radyasyonda zırhlayıcı malzemelerin radyasyon soğurma özelliklerini değerlendirebilmek için bazı parametrelere bakılmaktadır. Bu parametreler; X-ışını ve γ -ışını soğurma parametreleri olarak dört başlık altında incelenebilir.

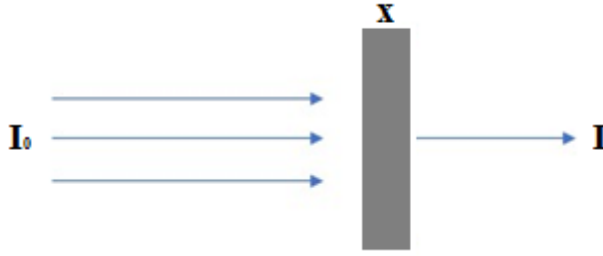
2.3.1 Lineer soğurma katsayısı (μ)

Lineer soğurma katsayısı madde ortamının birim yüzeyine gelen fotonun azalma miktarını ifade eder. Aynı zamanda, fotonun x kadar kalınlığa sahip olan maddeden geçerken soğurma veya saçılmaya uğrama olasılığıdır. Lineer azaltma katsayısının birimi (cm^{-1}) olarak ifade edilir. Ortamın yoğunluğuna (g/cm^3) bağlı olarak değişecektir.

Radyoaktif atomların birim zamanda değişim olasılığı olarak tanımlanan radyoaktif bozunma sabiti (λ) ile eş anlamlıdır (Alım ve diğerleri, 2020). X kalınlığındaki bir ortamı geçebilecek fotonlar aynı enerjide ve fotonlar ideal geometri koşulları altında azalıyorsa (Şekil 2.10), fotonların yoğunluğu I_x aşağıdaki eşitlik ile verilebilir (Aral, 2019).

$$I_x = I_o(e^{-\Gamma x})(e^{-\sigma x})(e^{-\kappa x}) = I_o e^{-\mu x} \quad (13)$$

Beer- Lambert kanunu olarak da bilinen bu eşitlikte; I_x = Soğurulmaya uğramayan foton, I_0 = Malzemeye gelen fotonların sayısı, Γ = Fotoelektrik olayın olabilme olasılığı, σ = Compton saçılmasının oluşabilme olasılığı, κ = Çift oluşumun oluşabilme olasılığı, μ = Malzemenin toplam lineer soğurma katsayısıdır.



Şekil 2.10. Beer-Lambert yasası

2.3.2 Kütle soğurma katsayısı (μ_m)

Kütle soğurma katsayısı (μ_m ; cm^2/g), gelen fotonun enerjisinin soğurulmasını ifade eden madde etkileşim parametresidir. Kütle azaltma katsayıları saçılma etkileşimleri de dahil olmak üzere tüm etkileşim süreçlerini yapısında içerdiği için hem gelen foton enerjisine hem de soğurucu malzemenin yapısına bağlıdır. Malzemelerin kütle soğurma katsayıları aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\rho x} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{t_m} \quad (14)$$

Bu eşitlikte;

I = Maddeden geçen foton sayısı,

I_0 = Madde ortamına gelen fotonların sayısı,

ρ =(g/cm^3) malzeme yoğunluğu,

x =(cm) madde ortamının kalınlığı,

$t_m = m/A$ (g/cm^2) birim alan başına malzemenin kütle miktarı,

m = (g) malzemenin kütlesi,

A = (cm^2) birim yüzeyde etkileşim alanı.

Zırhlama yapılacak malzemenin birden fazla olması durumunda oluşturulan kompozit materyaller için kütle soğurma katsayısı için karışım kuralı aşağıdaki gibi verilir (Jackson ve Hawkes, 1981).

$$m = (\mu/\rho) \sum w_i (\mu/\rho)_i \quad (15)$$

Bu eşitlikte;

w_i = malzemedeki i. elementin ağırlıkça birleşim kesri (ağ. %),

$(\mu/\rho)_i$ = i. foton enerjisi için kütle soğurma katsayısıdır.

w_i , ifadesi aşağıdaki eşitlik ile verilir;

$$w_i = a_i A_i \quad (16)$$

Bu eşitlikte; a_i = malzemedeki i. elementin mol kesri (mol %)

A_i = malzeme içindeki i. elementin atomik kütlesidir.

2.3.3 Ortalama serbest yol (MFP)

Ortalama serbest yol, gelen fotonun madde içinde ilerlerken ortaya çıkan iki etkileşim arasındaki mesafedir (Alım ve diğerleri, 2020).

$$MFP = \lambda \quad \vartheta = \frac{1}{\mu} \quad (17)$$

2.3.4 Yarı-değer kalınlığı (HVL)

Yarı-değer kalınlık, gelen fotonun malzeme içine girmeden önceki yoğunluğunun (I_0) yarıya inebilmesi için ($I = I_0/2$) gerekli zırhlama malzemesinin kalınlığına denir.

μ/ρ ilk radyasyon yoğunluğunu (I_0) bağlayan Beer- Lambert kanununa göre hesaplanır. İlk gelen foton miktarı I_0 'ın zırh üzerine gelmesi ile miktarı azalmış foton yoğunluğu (I) olarak ifade edilir (Chilton ve diğerleri, 1984).

Bir malzemeye gelen fotonların yarı kalınlığa ulaştığında foton sayısının üstel azalımını gösteren eşitlik;

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \quad (18)$$

Bu eşitlik kullanılarak yarı-değer kalınlığı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$x_{1/2} = HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (19)$$

Bu eşitlikte verilen μ (cm^{-1}) üretilen malzemenin gelen foton için lineer soğurma katsayısıdır.

Ayrıca fotonun madde içinde etkileşim mekanizmalarında zayıflatma katsayıları farklıdır. Compton, fotoelektrik ve çift oluşumu etkileşimlerinin zayıflatma katsayıları sırasıyla τ , σ ve κ sembolleriyle temsil edilir.

Toplam zayıflatma katsayısı olan μ bu üç etkileşimin her birisinden gelen zayıflatma katsayılarının toplamına eşittir.

$$\mu = (\tau + \sigma + \kappa) \quad (20)$$

$$I_x = I_0(e^{-\tau x})(e^{-\sigma x})(e^{-\kappa x}) = I_0 e^{-\mu x} \quad (21)$$

I = Malzemedan çıkan ışın miktarı

I_0 = Malzemeye gelen ışın şiddeti

x = Malzeme kalınlığı

μ = Lineer soğurma katsayısı

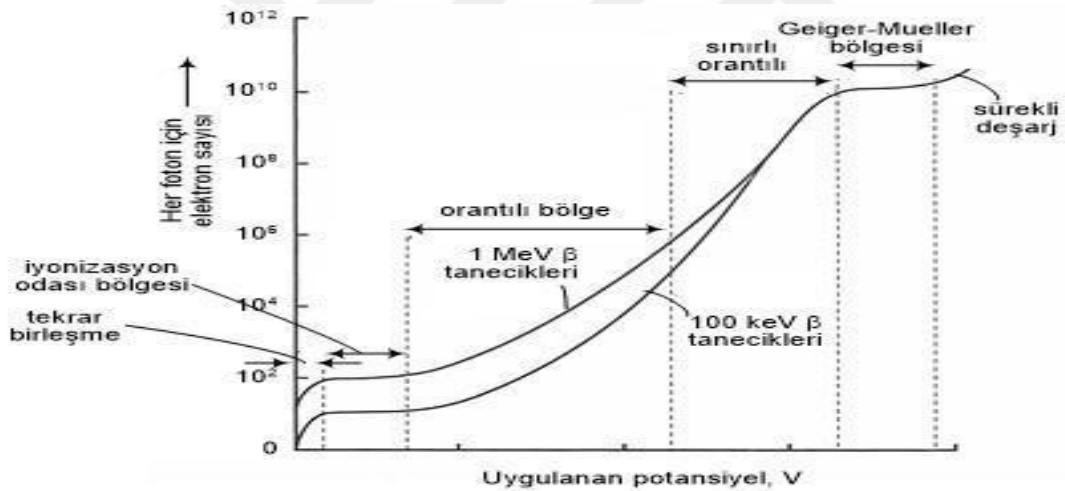
Bu durumda formülden de anlaşıldığı gibi gelen ışın miktarı zırhlama materyalinden çıkan ışın miktarından farklıdır. Gelen ışının dozu üstel olarak soğurma katsayısı ve materyal kalınlığına göre azalacaktır. Radyasyondan korunmada zırhlama malzemesi geliştirebilmek

için sahip olması gereken özellikler ifade edilmiştir. Geliştirilecek her materyalin foton soğurma özellikleri ile ilgili parametreler yapılan tüm çalışmalarda kullanılmıştır.

Hubbell, (1982); Akkurt ve diğerleri, (2010) Nükleer santral, tıp ve tarımda iyonlaştırıcı gama radyasyonun artan kullanımı ile çeşitli malzemelerin kütle zayıflama katsayılarının (μ/ρ) incelenmesinin önemli olduğunu vurgulamışlardır (Hubbell, 1982; Akkurt ve diğerleri, 2010).

2.4 Radyasyon Dedektörleri

Radyasyon maruziyetinin ölçülmesi için gerekliliği, radyasyonun hangi tip olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Aynı zamanda radyoaktif atıkların tespiti ve bertaraf edilebilmesi içinde oldukça önemlidir. Radyasyondan korunma alanında kullanılan radyasyon dedektörleri güvenilir, sağlam ve ölçümleri tekrarlanabilir olmalıdır (Grupe, 2011).



Şekil 2.11. Çeşitli tiplerdeki gazlı dedektörlerde gaz amplifikasyonu (İnternet 3 URL)

Şekil 2.11’ de anoda ulaşan elektronların oluşturduğu özel potansiyel bölgeleri verilmiştir. Tekrar birleşme potansiyel noktalarında iyon çiftlerinin üzerine uygulanan kuvvet küçük olduğundan zıt yükleri ayırabilecek hıza ulaşamamıştır. Bu nedenle anoda ulaşan elektron sayısı başlangıca göre daha düşüktür.

İyonizasyon odası bölgesinde elektron sayısı sabit olup, tek bir fotonun oluşturduğu sayıya eşittir. Orantılı bölgede hızlandırılmış elektron ve gaz moleküllerinin çarpışması sonucu oluşan ikincil iyonlaşma ile elektron sayısı potansiyelin artması ile hızlı bir şekilde artar.

Geiger-Muller bölgesinde elektrik pulsu çok yüksek olmasına rağmen yüksek hızlı elektronların daha yavaş iyon olan pozitif iyonlardan uzaklaşması ile pozitif bölge tarafından elektronların sayısı sınırlanır. Bunun sonucunda anoda gelen elektronların sayısı gelen ışının tipi ve enerjisinden bağımsızdır. Yukarıdaki şekilde 1 MeV beta taneciklerinin olduğu bölgedeki elektron sayısı düşük enerjili x-ışınları ile oluşan sayıdan daha fazla olduğu da görülmektedir. Böylelikle 1 MeV beta tanecikli ışının puls yüksekliği daha yüksek olacaktır.

2.4.1 İyonizasyon odaları

İyonizasyon odasının çalışma prensibi tüp içindeki gazın iyonlaşması ile açıklanabilir. Gaz dolu dedektörlerde yaygın olarak kullanılan gazların yoğunluk ve atom numarasının düşük olması nedeniyle, x ve gama ışınlarını tespit edebilmek için düşük verimliliğe sahiptir. Duyarlılığı artırabilmek için, Argon ($Z=18$) ya da Ksenon ($Z=54$) gibi yüksek atom numarasına sahip gazlar kullanılarak yoğunluk artışı sağlanabilir (Çizelge 2.2). İyonizasyon odaları, α ışınlarının ölçümü için son derece uygundur. İyon odası voltaj ayarı ve iyon tekrar birleşme faktörü nedeniyle iyon kaybının %1' den az olarak düzenlenmesi gerekir (Khan 2003). Sızıntı kontrolü yapılmalı ve oluşan sızıntının %0,1'den az olması gerekir. Aynı zamanda duyarlılıkta %1'den büyük olmamalıdır. Diğer dedektörlerde olduğu gibi, iyon odaları akım veya darbe modunda çalıştırılır. En yaygın uygulamalarda, iyon odaları akım modunda çalışmaktadır. Orantılı sayaç ve Geiger tüpleri her zaman darbe modunda kullanılır.

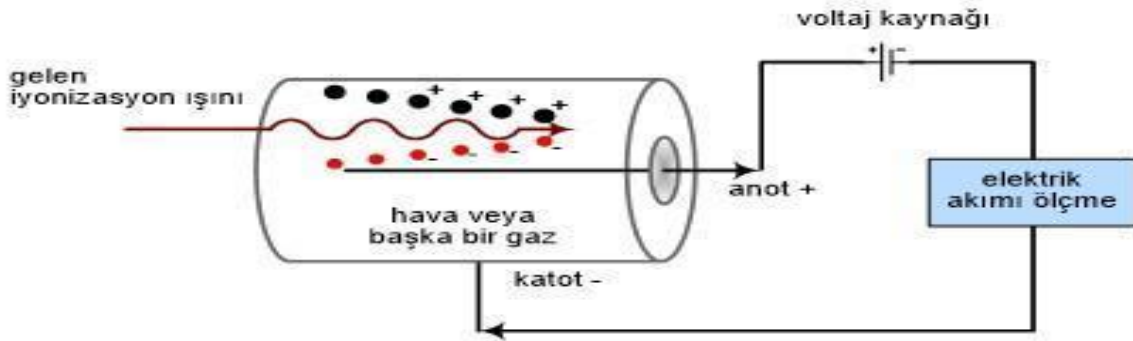
Çizelge 2.2. Farklı tür gazlar için iyon başına enerji dağılım değerleri (ICRU Report 31, 1979)

Gaz	Birinci iyonizasyon Potansiyeli (eV)	Hızlı elektronlar (eV)	Alfa parçacıkları (eV)
Ar	15,7	26,4	26,3
He	24,5	41,3	42,7
N ₂	15,5	34,8	36,4
Hava		33,8	35,1

O ₂	12,5	30,8	32,2
CH ₄	14,5	27,3	29,1

İyon odaları 10 keV- 2 MeV arasında enerji yanıtları verebilir. Doz hızı > 0,001 mGy/h ile >0,5 Gy/h aralığındadır.

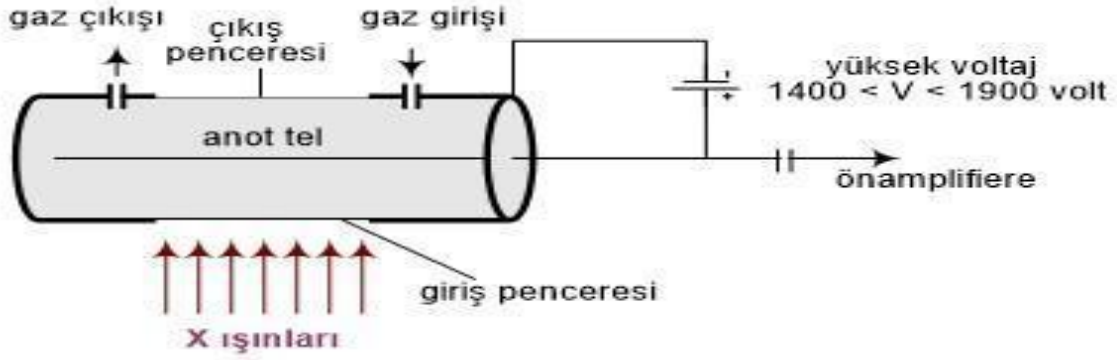
Hava dolu ve taşınabilen iyon odaları, 1 mR/h değerinden daha düşük doz hızı değerlerinden, 10-100 R/h'e kadar doz hızlarını doğrulukla ölçebilirler.



Şekil 2.12. Gazlı dedektör şekli (İnternet 4 URL)

2.4.2 Orantılı sayıcılar

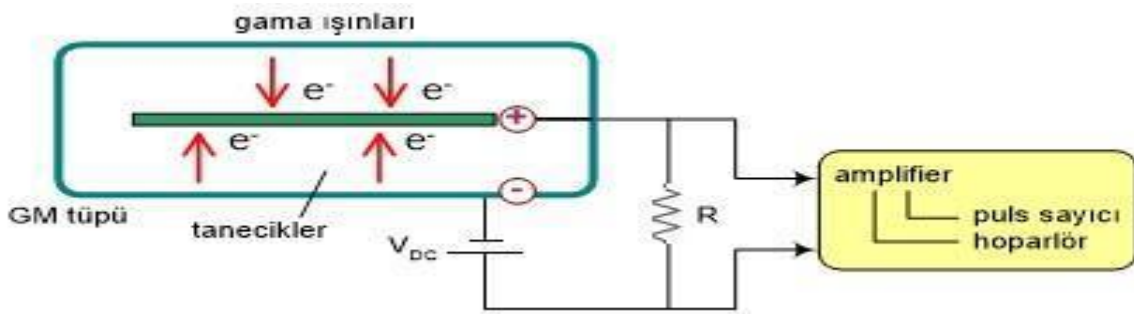
Gazlı bir dedektör olup bir pulsu 500-10000 kez büyütürken pozitif iyonlarının sayısının artmasıyla, ölü zaman sadece 1μs' dir. Orantılı bölgede açığa çıkan elektronların sayısı gelen ışının enerjisi ile doğrudan değişecektir. Orantılı sayaçlara 'puls yüksekliği analizörü' takılarak X-ışını frekans bölgesine dönüştürülebilir. Puls yüksekliği analizörünün görevi ışını elektronik olarak süzmektir. Orantılı sayıcılar X-ışını spektrometrelerde yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.13' de orantılı sayıcı şematize edilmiştir.



Şekil 2.13. Orantılı sayıcı (İnternet 5 URL)

2.4.3 Geiger-Müller tüpleri

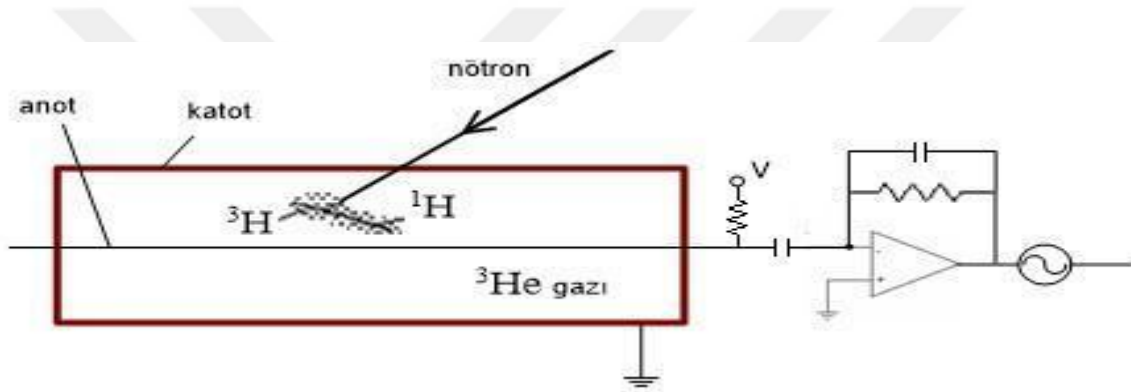
Bir gazlı dedektör olup, gaz amplifikasyonu 10^9 'dan daha büyüktür. Geiger bölgesinden pozitif yüklü bölgeden dolayı elektronların anoda itilmesi ile sürekli elektrik iletimi sağlanamaz. Ani bir puls alınarak tüp iletkenliğini kaybeder. İletkenliğin olmadığı an "ölü zaman" olarak nitelendirilir. Ölü zaman süresince ışın algılaması olmaz. Bir Geiger tüpünün ölü zamanı 50-100 μ s aralığındadır. Geiger tüplerinde gaz olarak argon kullanılır. Soğutma gazı olarak alkol veya metan ilave edilir. Böylece katyonların odacık duvarına çarparak ikincil elektronların oluşumu önlenmiş olur. Soğutma gazından dolayı tüpün sınırlı bir ömrü vardır. Yaşam süresi 108-109 sayım kadardır. Bir Geiger tüpü her tip nükleer ve X-ışınına uygulanabilir. Ölü zamanının yüksek olması tüpün kullanımını sınırlar. Şekil 2.14' de Geiger Müller Sayıcı şematize edilmiştir.



Şekil 2.14. Geiger Müller Sayacı (İnternet 6 URL)

2.4.4 Nötron dedektörleri

Yüksüz tanecikler olan nötronları dedekte edebilmek için nötron dedektöründe bir nötron-iyonizasyon tanecik dönüştürücüsü bulunur. Dedektöre gelen nötronlar burada nükleer bir reaksiyonla iyon tanecikler meydana getirir. Ortaya çıkan yükün toplamı gelen nötron miktarı ile orantılı olduğundan orantılı sayıcılardır. Dedektör duvarı 0,5 mm kalınlıkta olup çelik ya da alüminyumdan oluşur. Metallerin absorpsiyon miktarları farklıdır. Çelik duvarda %3 iken, alüminyumun sadece %0,5 olarak tespit edilmiştir. Verimi artırabilmek için alüminyum tüpler tercih edilir. Şekil 2.15' de tipik bir gazlı nötron dedektörü şematize edilmiştir.



Şekil 2.15. Tipik bir gazlı nötron dedektörü (İnternet 7 URL)

2.4.5 Sintilasyon sayıcıları

%1'e kadar talyum ilavesiyle aktiflendirilmiş, geçirgen sodyum iyodür kristalinden oluşturulmuş hassas bir ışın dedektörüdür. Kristal boyutu 3-4 inç olup silindir şeklindedir. Bir yüzeyi fotomultiplier tüpün katoduna doğru çevrilir. Gelen ışın kristalden geçerek sintilatöre geçer. Ortaya çıkan enerji 0,25 μ s'de floresans ışın fotonu olarak bırakılır. Sintilasyon sayıcının ölü zamanı ($\sim 0,25 \mu$ s) bir gazlı dedektöründen oldukça küçüktür.

Ortaya çıkan foton fotomultiplier tüpün fotokatoduna geçerek öncelikle elektrik pulsuna çevrilir, yükseltilerek sayılır. Gelen ışınların sayısı oluşan ışınların sayısı ile orantılıdır. Sodyum iyodür kristali yerine stilben, ve terfenil gibi organik kristallerde sintilatörler de kullanılmaktadır. Bu maddelerin kristal haldeki bozunma zamanları 0,01-0,1 μ s

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu tez çalışmasında bazı metal içeren kompozitler cam üzerine ince film olarak kaplanarak radyasyon soğurma özellikleri deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular teorik olarak hesaplanan verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın detayları aşağıda verilmiştir.

3.1 NaI(Tl) Dedektörü

Radyasyon dedektörleri kullanılan materyale göre; gazlı, yarı-iletken ve sintilasyon (parıldayıcı) dedektörleri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bu çalışmadaki gama radyasyonu spektrumları ORTEC marka "3 x 3" boyutlu NaI(Tl) sintilasyon dedektörü kullanılmıştır. Şekil 3.1.'de kullanılan sintilasyon dedektörünün şekli verilmiştir.



Şekil 3.1. NaI(Tl) dedektörü

NaI(Tl) sintilatörleri; Sodyum İyodür NaI(Tl) talyum katkılı kristali özellikle gama ışınlarının sayımı için mükemmel bir sintilatördür. Özellikle atom numarası yüksek olan iyodun verimi oldukça yüksektir. İki ana kısımdan oluşan sintilasyon dedektörünün ilk bölümü içinde parıldama özelliği olan sintilatör, ikinci bölümde ise foto katot odaklayıcı elektrot, dinotlar ve fotoçoğaltıcı tüpten oluşmaktadır. Sintilasyon dedektörünün işlevi ışın etkileşimlerini sağlayarak gama ışınlarını kaydetmektir. Böylece gamaların enerjisi elektron-pozitron çiftine veya elektrona aktarılır. Uyarılmış olan elektronlar temel enerji seviyesine geri dönerken görünür ışık ya da çok yakınında bir ışın yayınlarlar. Açığa çıkan bu ışık türüne flüoresan radyasyonu denir (Akyıldırım, 2011). Bu ışınlar foto çoğaltıcıda fotokatotla etkileşerek elektron çoğaltıcı tabakalardan birine yönlenir. Başlangıç enerji

değerlerine bağlı olarak elektron çoğaltıcı tabakayla etkileşen elektronlar çoğaltıcıdan birden fazla ikincil elektron koparabilir. Koparılan elektronlar da odaklayıcılara gelerek oradan elektron çoğaltıcıya yönlendirilir. Gelen elektronlar ile birlikte anotta bir akım sinyali oluşur ve oluşan sinyaller yükseltilerek fotoçoğaltıcılar ile ve elektronik elemanlar vasıtasıyla okunabilir spektruma çevrilir (Akyıldırım, 2011).

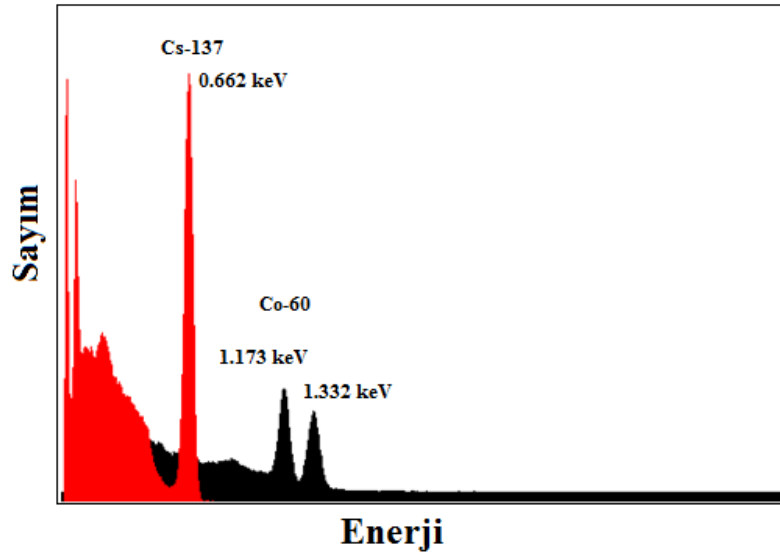
3.2 Elektronik Aygıtlar ve Yazılım

Radyasyonun dedektörde oluşturduğu sinyaller yükseltici(amplifikatör) ile yükseltilerek Çok Kanallı Analizöre (Ç.K.A.) sahip DSPEC LF'e gönderilir.

DSPEC LF ile sayısal hale çevrilen veriler, dedektör bünyesinde bulunan MAESTRO-32 yazılımı ile spektruma dönüştürülür. Ortaya çıkan spektrum Gauss eğrisi şeklindedir. Her kanal numarası ve enerji başına düşen sinyaller yazılım tarafından kaydedilir. Sistem bir yüksek gerilim birimi ile beslenmektedir. Dedektörün çalışma gerilimi olan 800 (480 mi) V bu birim tarafından sağlanmaktadır (Günoğlu, 2012). Şekil 3.2 DSPEC LF ve yüksek gerilim modülünü göstermektedir. Şekil 3.3'de MAESTRO-32 yazılımı yardımıyla elde edilen örnek bir spektrum gösterilmiştir.



Şekil 3.2. DSPEC LF modülü (üstte) ve yüksek gerilim modülü



Şekil 3.3. MAESTRO-32 yazılımı ile elde edilmiş olan örnek bir spektrum

3.3 Gama Kaynakları

Başlıca gama kaynakları; Radyoaktif izotop kaynaklar, ani fisyon gama fotonları, fisyon ürünlerinden kaynaklı gama fotonları, yakalanmış gama fotonları, aktivasyon sonucu, elastik olmayan nötron saçılması ve çift oluşumu sırasında ortaya çıkan gamalardır (Shultis, 1996). Ayrıca en sık kullanılan gama kaynakları, radyoizotoplardan elde edilenlerdir. Bunların birçoğu doğal olarak bulunabileceği gibi yapay olarak da üretilmektedir. Radyoaktivitede kullanılan bazı radyonüklitlerin enerji ve yarıömürleri çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı gama kaynaklarının genel özellikleri (Standford University, 2015)

Radyonüklit	Yarı ömür	E_γ (MeV)
I-125	60,1 gün	0,027
Co-57	270,9	0,122
I-131	8 gün	0,364
Cs-137	30,0 yıl	0,662
Na-22	2,6yıl	1,274; 0,511
Mo-99	66 saat	0,140
Co-60	5,3 yıl	1,17; 1,33

3.4 Teorik Hesaplama

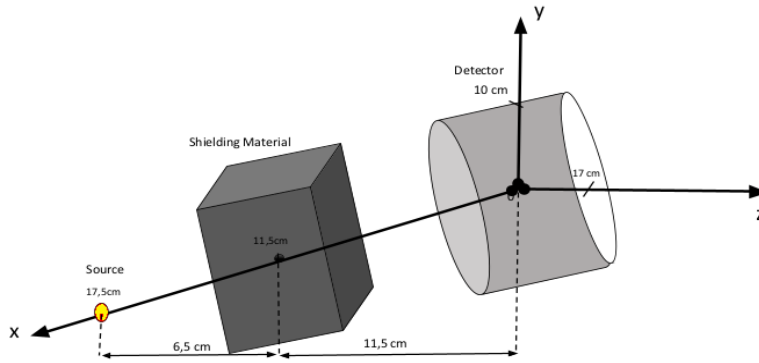
3.4.1 XCOM

Çalışmanın teorik kısmında kullanılmış olan, XCOM programı element, bileşik ve karışımlar için kütle zayıflama katsayılarını 1 keV ile 100 GeV arasındaki enerjilerde hesaplayan bir bilgisayar programıdır. Oluşturulan materyalin tutarsız saçılma, tutarlı saçılma, fotoelektrik etki ve çift oluşumu için tüm fiziksel süreçte kütle soğurma katsayılarını teorik olarak hesaplayabilmektedir. Ancak XCOM yazılım kodu ile toplam kütleli zayıflatma katsayısı (μ_m , cm^2g^{-1}) hesaplamaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı maddenin doğrusal zayıflatma katsayısının yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır (Hubbell, 1982). Alınan materyallerin yoğunlukları ile çarpımı lineer soğurma katsayısını vermektedir. XCOM'da karışımların kütle soğurma katsayıları hesaplanırken karışım kuralı uygulanır (Jaeger ve diğerleri, 1968) Bu kurala göre karışımı oluşturan bileşiklerin her birinin kısmi kütle zayıflatma katsayılarının ağırlıklı ortalamaları alınır (Jalali ve Mohammadi, 2008).

3.4.2 GATE

GATE, uluslararası OpenGATE iş birliği tarafından geliştirilen ve tıbbi görüntüleme ve radyoterapide sayısal simülasyonlar içeren açık erişimli bir yazılımdır. Şu anda Emisyon Tomografisi (Pozitron Emisyon Tomografisi-PET ve Tek Foton Emisyonlu Bilgisayarlı Tomografi-SPECT), Bilgisayarlı Tomografi (CT) ve Radyoterapi ile ilgili yapılan deneylerinin simülasyonlarını desteklemektedir. Birçok deneysel düzenekleri yapılandırmış olan GATE, yeni cihaz tasarımı, veri protokollerinin optimizasyonu ve görüntünün yapılandırılması algoritmalarını geliştirmektedir. Radyoterapi deneylerinde doz hesaplaması için de kullanılabilir. Geçiş komutları tıpkı bir ağacın yapısı gibidir. Örneğin, hazırlanan tüm geometri bir ağaç gözdesi gibi olup buradan alt dallara ayrılır. Gate'deki tüm fonksiyonlara komut satırları kullanılarak erişilebilir. Sistemin geometrisi, radyoaktif kaynağın tanımlanması ve olabilecek fiziksel etkileşimler ile kuruludur. Komut yorumlayıcısı tarafından Gate çekirdeğine çevrilen komut satırları kullanılarak parametre edebilir. Bu şekilde simülasyon adım adım tanımlanır ve simülasyonun geometrisinin gerçek yapısı ve tanımı görülebilir. Sonuç beklenildiği gibi değil ise tekrar komut girerek sonuca gidilir. Komutları adım adım girmek, kullanıcı yazılımla deney yaparken veya

geometriyi nasıl oluşturduğundan emin olmadığında faydalı olabilir. Başarılı bir simülasyona yol açan komutlar, makrolar, her satırın bir komut içeren ASCII dosyalarıdır ('.mac' uzantılı). Yorumlar '#' karakteriyle başlar. CERN işbirliğini geliştiren GATE: A Geant4, Sürüm v9.1 uygulaması (> 10 yıl) Gate yazılım ve makro dosyaları bilgisayarda kullanabilmek için sanal makina (Virtual Box) kullanılır. Kullanıcılar kendi Geant4 tabanlı programlarını (C++) dilinde yazarlar. Simülasyon düzeneği kurulduktan sonra kullanılacak olan materyaller malzeme veri tabanında (GateMaterials.db) olmadığında ilk olarak element tanıtilmalı elementin tanıtımı sonrasında bileşik ve karışım oranlarına göre bileşiklerin karışımları ifade edilmelidir. Daha sonra fiziksel süreçler ve enerji değerleri ilave edilerek simülasyona başlanır. Yapılan simülasyon düzeneği terminalde çalıştır komutu verilerek çalıştırılır. Yazılım programı Beer- Lambert yasasına göre kütle soğurma katsayısını elde ederek veriyi verecektir. Şekil 3.4' de deneysel düzenek ve Çizelge 3.2.' de çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Deneysel ve teorik düzenek

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

Kullanılan Kimyasal ve Özellikleri					
Özellikler	CuO	ZrB ₂	TiO ₂	ZnO	PbO
Moleküler ağırlık	79,545 g/mol	112,85 g/mol	79,866 g/mol	81,406 g/mol	223,20 g/mol
Erime noktası	1326 °C	~3040 °C	1843 °C	1975 °C	888 °C
Kaynama noktası	2000 C		2972 °C	2360 °C	1477 °C
Yoğunluk	6,315 g/cm ³	6,085 g/cm ³	4,23 g/cm ³	5,61 g/cm ³	9,53 g/cm ³
H ₂ O'da çözünürlük	çözünmez	çözünmez	çözünmez	0,0004% (17,8°C)	seyreltik alkal iler, alkol'de çözünmez

Çalışmada kullanılan XCOM programı, 1keV ve 100GeV enerji aralığında çalışan bir bilgisayar kodudur. Bu bilgisayar kodu hem elementlerin hem bileşiklerin hem de karışımların fotoelektrik etki, Rayleigh ve Compton saçılmaları, elektron çift oluşumu ve çekirdek çift oluşumunun soğurma katsayılarını ve kütle soğurma katsayılarını hesaplayabilmektedir. Diğer bir teorik çalışma olan GATE, Geant4 tabanlı GATE benzetişim programı kullanılarak NaI(Tl) dedektörünün dedektör özellikleri belirlenmiştir. Dedektör önüne zırhlama materyalleri yerleştirilerek radyasyon absorpsiyon özelliklerine bakılmıştır.

Çalışmada kullanılmış olan oksit ve borür bileşiklerinin soğurma özelliklerini karşılaştırmak amacıyla, CuO, PbO, ZnO, ZrB₂, TiO₂ bileşikleri farklı oranlarda karıştırılarak kaplamaya hazırlanmıştır. Karışım oranları ve yoğunluk değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kimyasalların bileşim oran ve yoğunlukları

Kimyasal	Karışım oranları							Yoğunluk
	ZrPb	TiPb	CuO	PbO	ZnO	TiO ₂	ZrB ₂	
CuO			100	0	0	0	0	6,31 g/cm ³
PbO			0	100	0	0	0	9,53 g/cm ³
ZnO			0	0	100	0	0	5,61 g/cm ³
TiO ₂			0	0	0	100	0	4,23 g/cm ³
ZrB ₂			0	0	0	0	100	6,08 g/cm ³
50%PbO.50%CuO			50	50	0	0	0	7,92 g/cm ³
50%ZnO.50%CuO			50	0	50	0	0	5,75 g/cm ³
50%CuO.50%TiO ₂			50	0	0	50	0	5,27 g/cm ³
50%TiO ₂ .50%PbO			0	50	0	50	0	6,88 g/cm ³
50%ZnO.50%TiO ₂			0	0	50	50	0	4,67 g/cm ³
50%ZrB ₂ .50%CuO			50	0	0	0	50	6,19 g/cm ³
50%ZrB ₂ .50%PbO			0	50	0	0	50	7,80 g/cm ³
50%ZrB ₂ .50%ZnO			0	0	50	0	50	5,60 g/cm ³
50%ZrB ₂ .50%TiO ₂			0	0	0	50	50	5,15 g/cm ³
50%ZnO.50%PbO			0	50	50	0	0	7,32 g/cm ³

Çizelge 3.3. (Devamı)

%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	50		10	0	10	30	0	6,31 g/cm ³
%50ZrB ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂			30	0	10	10	0	6,72 g/cm ³
%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂			10	0	30	10	0	6,50 g/cm ³
%50TiO ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂		50	30	0	10	0	10	5,13 g/cm ³
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂			10	0	30	0	10	4,89 g/cm ³
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂			10	0	10	0	30	5,08 g/cm ³

3.5 Numune hazırlama

Alınan mikroskop camları elmas kesici ile 2,5 cm genişliğinde kesilerek aseton çözeltisi içinde yıkanmıştır. Yıkanan camlar kurumaları için kurutma kağıdının üzerine alınarak bir gün süreyle 50 °C’de etüvde bekletilmiştir. Kuruyan tüm cam numuneler üzerinde, aşağıdaki aşamalara uygun şekilde kaplanma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her numuneye 2ml etanol ve 2ml PMMA katkılanarak çözelti elde edilmiştir.

CuO, PbO, ZnO, ZrB₂, TiO₂, nano tozlarının çözeltileri hazırlanmıştır.

TiO₂: Titanyum Dioksit (TiO₂) nano tozu, Saflık: 99.995%, Boyut: 17 nm özelliklerinde olup TiO₂ çözeltisi hazırlamak için, sırasıyla titanium n-butoxide, etanol ve PMMA ile karıştırıldı. Karışım iki gün boyunca oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı.

ZnO: Zinc oxide ReagentPlus®, nano tozu, <5 µm boyutta, 99.9% saflıkta olan ZnO tozundan çözelti hazırlayabilmek için 2 ml etanol, yuvarlak tabanlı bir şişede 450 ml çinko asetat dihidrat içerisine 1ml PMMA ilave edildi ve homojen bir çözelti elde etmek için oda sıcaklığında iki gün karıştırıldı. İki gün sonra şeffaf renkten beyaz renge dönüşen karışım cam altlıklar üzerine dönel kaplama yöntemiyle 1800 rpm’ de kaplandı.

PbO: Lead(II) nano tozu, <10 µm, ReagentPlus®, ≥99.9% iz metalleri toz halinde kullanılmıştır. PbO tozları çözelti oluşturabilmek amacı ile etanol ve PMMA sıvı bileşenleri ile oda sıcaklığında iki gün karıştırılarak homojen karışım oluşturuldu. İnce filmler, cam alttaşlar üzerine damlatarak 1800 rpm’de kaplandı ve kurumaya bırakıldı.

CuO: Nano Tozu, Saflık: 99.5%, Boyut: $< 77 \mu_m$ CuO tozları, etanol ve PMMA ile oluşturulan karışım oda sıcaklığında iki gün boyunca karıştırılarak homojen karışım elde edildi. 2500 r/dak'lık bir dönme hızı ile döndürerek kaplama yöntemi ile cam üzerine kaplanarak 24 saat kurumaya bırakıldı.

ZrB₂: mikron tozu, Saflık: 99.5%, Boyut: $5.5 \mu_m$ özelliklerindeki ZrB₂ nanopartikülleri etanol ve PMMA sıvı bileşenleri ile oda sıcaklığında iki gün karıştırılarak homojen karışım oluşturuldu. İnce filmler, cam alttaşlar üzerine damlatarak 1800 rpm'de kaplandı ve 24 saat kurumaya bırakıldı.

Hazırlanmış olan tüm çözeltilerden %50 oranında alınarak oda sıcaklığında iki gün karıştırılarak homojen karışım haline getirilerek camlar sol-gel yöntemi ile spin coater kullanılarak kaplanmıştır. Elde edilen camlar bir gün süreyle kurumaya bırakılmıştır.

4. BULGULAR

Kaplanan numunelerin deneysel olarak hesaplanan lineer soğurma katsayıları (LAC), XCOM yazılımı kullanılarak hesaplanan lineer soğurma katsayıları (LAC) ve GATE simülasyonu kullanılarak elde edilen lineer soğurma katsayıları (LAC) Çizelge 3.4- 3.5 ve 3.6 da verilmiştir.

Çizelge 3.4. Hazırlanan materyallerin teorik XCOM yazılımı lineer soğurma katsayıları (LAC)

MATERYAL	511keV	662keV	1173keV	1274keV	1332keV
CuO	0,52	0,46	0,34	0,33	0,32
PbO	1,44	1,03	0,59	0,55	0,53
ZnO	0,47	0,42	0,31	0,30	0,29
TiO ₂	0,35	0,31	0,24	0,23	0,22
ZrB ₂	0,51	0,44	0,33	0,31	0,30
50%PbO.50%CuO	0,93	0,72	0,46	0,44	0,43
50%ZnO.50%CuO	0,50	0,44	0,33	0,32	0,31
50%CuO.50%TiO ₂	0,44	0,39	0,29	0,28	0,28
50%TiO ₂ .50%PbO	0,81	0,63	0,40	0,38	0,37
50%ZnO.50%TiO ₂	0,44	0,39	0,29	0,28	0,28
50%ZrB ₂ .50%CuO	0,52	0,45	0,34	0,32	0,32
50%ZrB ₂ .50%PbO	0,92	0,70	0,45	0,43	0,41
50%ZrB ₂ .50%ZnO	0,47	0,41	0,31	0,29	0,29
50%ZrB ₂ .50%TiO ₂	0,70	0,61	0,46	0,44	0,43
50%ZnO.50%PbO	0,89	0,68	0,44	0,42	0,40
%50ZrB ₂ PbO.%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,67	0,54	0,36	0,35	0,34
%50ZrB ₂ PbO.%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,81	0,65	0,44	0,41	0,40
%50ZrB ₂ PbO.%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,71	0,56	0,38	0,36	0,35
%50TiO ₂ PbO.%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,97	0,77	0,51	0,49	0,48

Çizelge 3.4. (Devamı)

%50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,69	0,55	0,37	0,35	0,34
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,70	0,56	0,37	0,35	0,34

Çizelge 3.5. Hazırlanan materyallerin deneysel lineer soğurma katsayıları (LAC)

MATERYAL	511 keV	662 keV	1173 keV	1274 keV	1332 keV
CuO	0,44	0,38	0,34	0,32	0,30
PbO	1,04	1,01	0,56	0,55	0,52
ZnO	0,51	0,44	0,31	0,30	0,29
TiO ₂	0,39	0,29	0,25	0,23	0,22
ZrB ₂	0,49	0,46	0,34	0,32	0,31
50%PbO.50%CuO	1,16	0,70	0,48	0,43	0,39
50%ZnO.50%CuO	0,59	0,42	0,34	0,31	0,29
50%CuO.50%TiO ₂	0,47	0,41	0,30	0,29	0,28
50%TiO ₂ .50%PbO	0,73	0,52	0,41	0,37	0,36
50%ZnO.50%TiO ₂	0,53	0,33	0,29	0,27	0,26
50%ZrB ₂ .50%CuO	0,59	0,56	0,34	0,31	0,30
50%ZrB ₂ .50%PbO	0,75	0,52	0,46	0,45	0,42
50%ZrB ₂ .50%ZnO	0,55	0,46	0,33	0,28	0,27
50%ZrB ₂ .50%TiO ₂	0,65	0,56	0,44	0,43	0,41
50%ZnO.50%PbO	1,01	0,52	0,46	0,42	0,40
%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,62	0,55	0,38	0,36	0,32
%50ZrB ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,84	0,69	0,42	0,41	0,40
%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,75	0,56	0,37	0,36	0,35
%50TiO ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,89	0,75	0,51	0,49	0,47
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,64	0,55	0,35	0,33	0,32
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,80	0,58	0,38	0,36	0,33

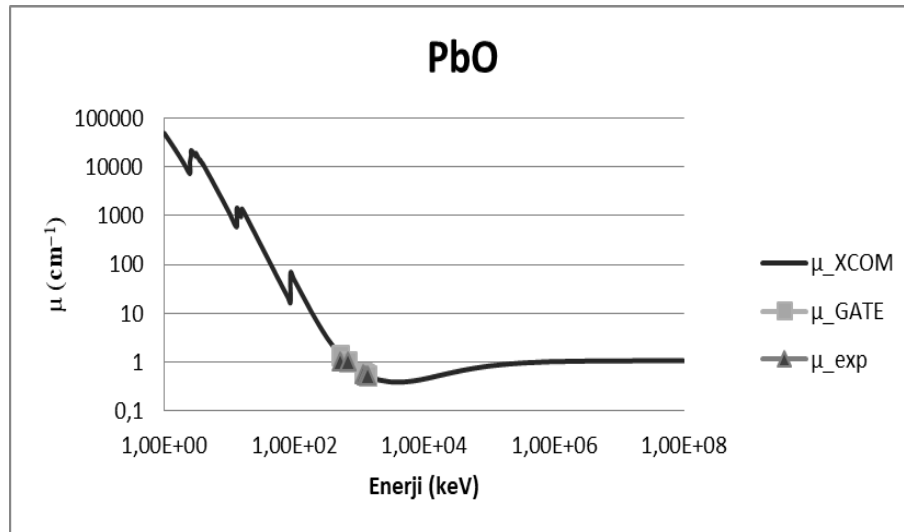
Çizelge 3.6. Hazırlanan materyallerin GATE simülasyonundan elde edilen lineer soğurma katsayıları (LAC)

MATERYAL	511 keV	662 keV	1173 keV	1274 keV	1332 keV
CuO	0,54	0,45	0,34	0,32	0,32
PbO	1,44	1,03	0,59	0,55	0,53
ZnO	0,49	0,42	0,31	0,29	0,29
TiO ₂	0,38	0,33	0,25	0,23	0,22

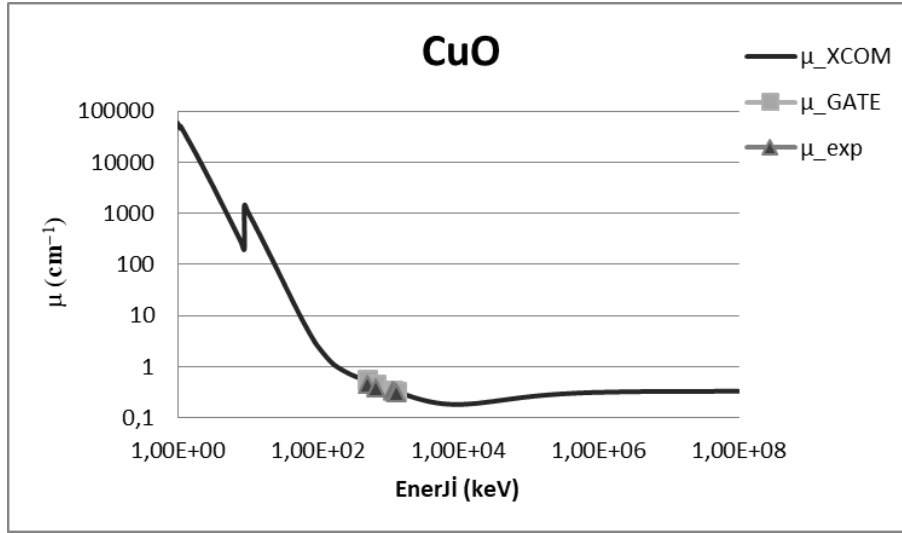
Çizelge 3.6. (Devamı)

ZrB ₂	0,52	0,45	0,33	0,31	0,31
50%PbO.50%CuO	0,92	0,71	0,45	0,43	0,42
50%ZnO.50%CuO	0,49	0,44	0,34	0,31	0,31
50%CuO.50%TiO ₂	0,44	0,39	0,30	0,28	0,28
50%TiO ₂ .50%PbO	0,80	0,63	0,41	0,38	0,38
50%ZnO.50%TiO ₂	0,44	0,39	0,27	0,26	0,25
50%ZrB ₂ .50%CuO	0,51	0,46	0,32	0,33	0,30
50%ZrB ₂ .50%PbO	0,92	0,71	0,45	0,43	0,42
50%ZrB ₂ .50%ZnO	0,48	0,41	0,30	0,27	0,26
50%ZrB ₂ .50%TiO ₂	0,75	0,62	0,46	0,44	0,43
50%ZnO.50%PbO	0,90	0,69	0,47	0,42	0,41
%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,70	0,55	0,35	0,35	0,34
%50ZrB ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,79	0,64	0,44	0,41	0,41
%50ZrB ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,69	0,56	0,37	0,35	0,34
%50TiO ₂ .PbO%30CuO%10ZnO%10TiO ₂	0,97	0,76	0,50	0,49	0,47
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%30ZnO%10TiO ₂	0,68	0,54	0,37	0,34	0,34
%50TiO ₂ .PbO%10CuO%10ZnO%30TiO ₂	0,69	0,55	0,38	0,35	0,35

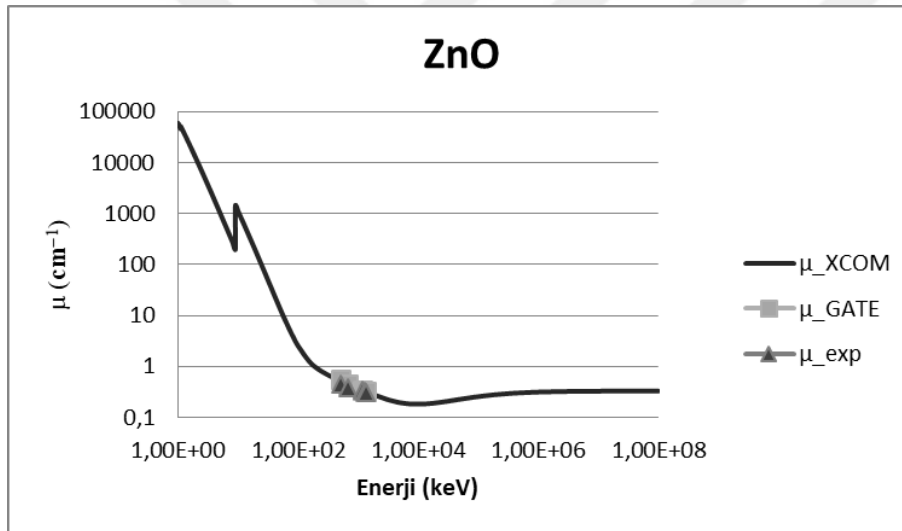
Cam numunelerin teorik ve deneysel olarak hesaplanan lineer soğurma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri Şekil 3.5 - 3.9' da verilmiştir.



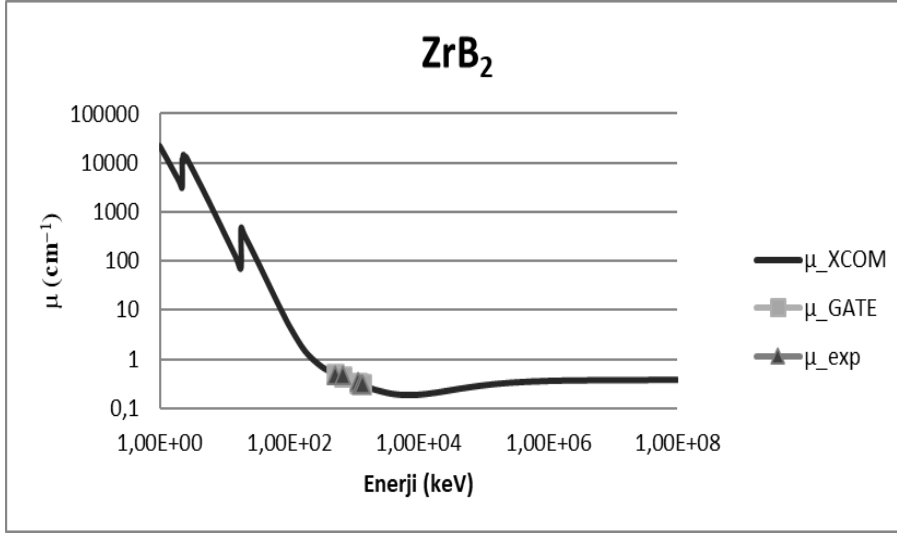
Şekil 3.5. PbO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayı grafiği



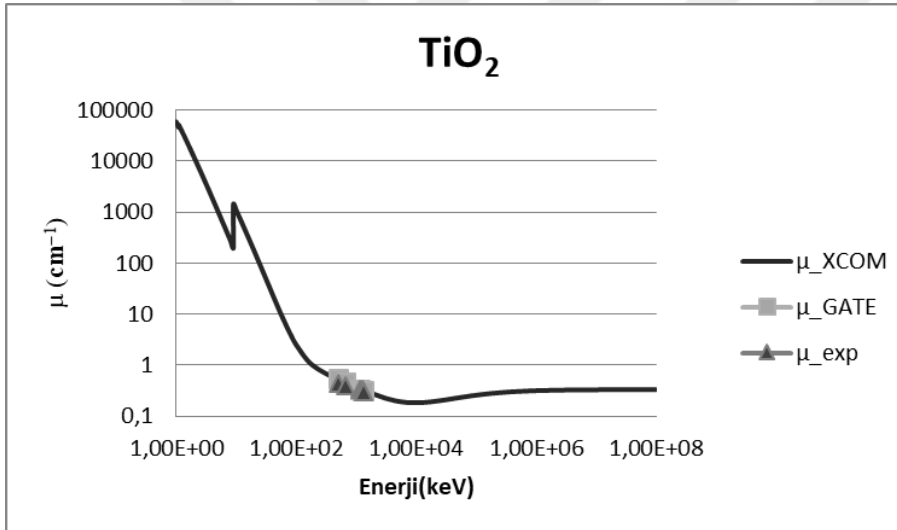
Şekil 3.6. CuO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayı grafiği



Şekil 3.7. ZnO kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayı grafiği



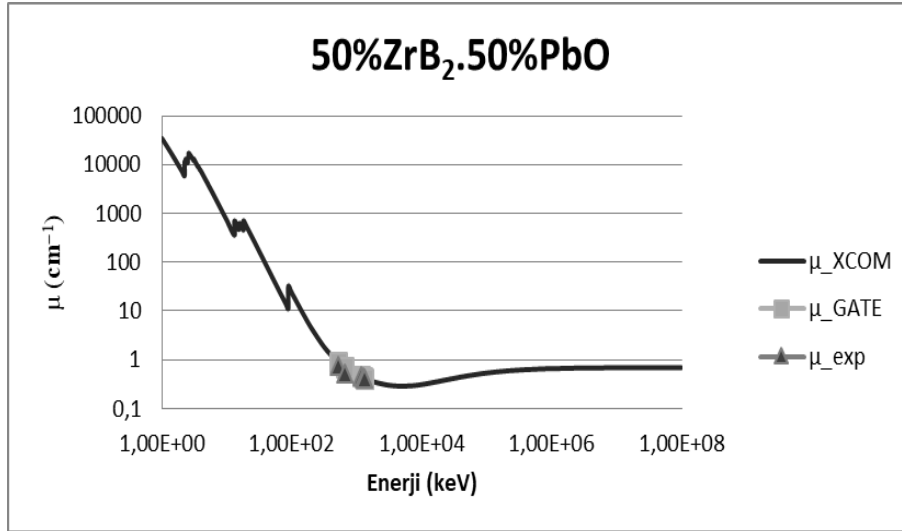
Şekil 3.8. ZrB₂ kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayı grafiği



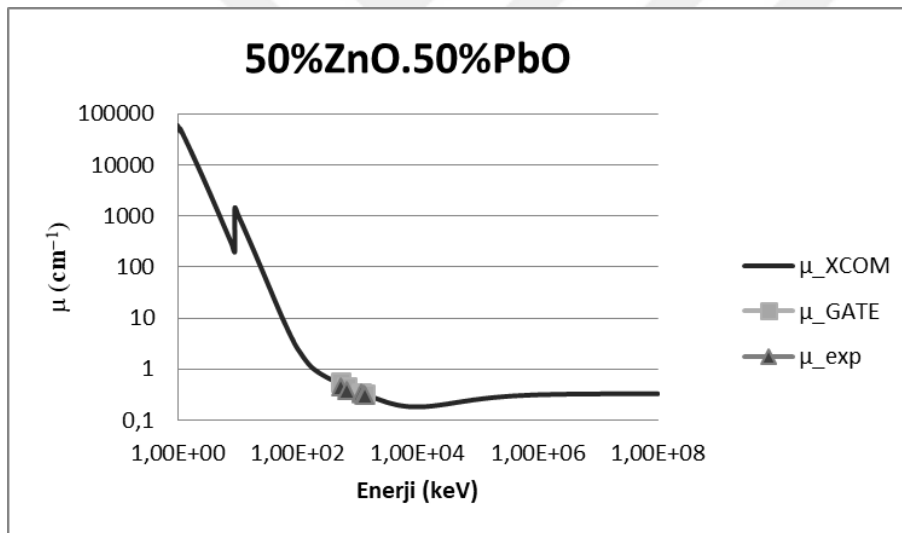
Şekil 3.9. TiO₂ kaplanmış cam numunenin lineer soğurma katsayı grafiği

Elde edilen verilere göre PbO bileşiğinin radyasyon soğurma özelliği anlamlı bir şekilde diğer bileşiklerden yüksek olarak gözlenmiştir. Artan enerji ile ters orantılı olarak lineer soğurma katsayısı tüm numunelerde azalmaktadır. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile teorik hesaplama sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu grafiklerden görülmektedir.

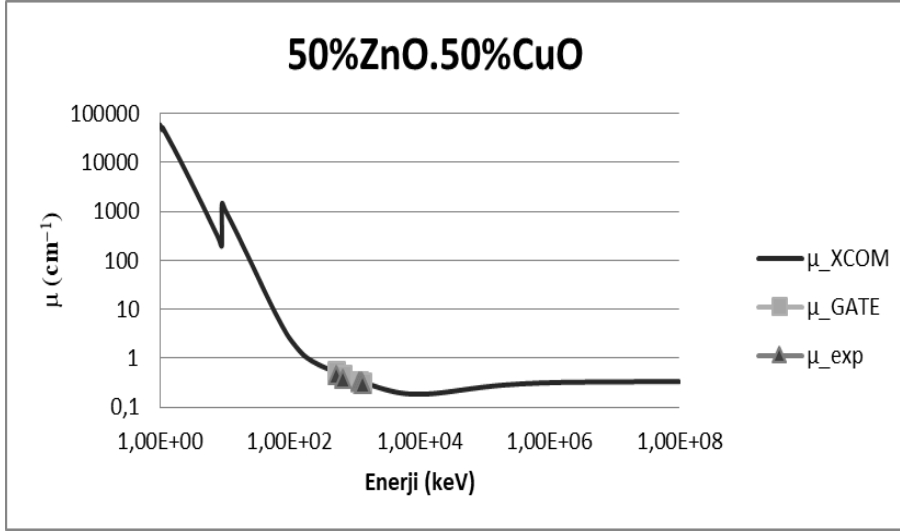
Oksit materyallerin %50 oranında karışımı ile kaplanan cam numunelerin deneysel ve teorik lineer soğurma katsayılarının karşılaştırması Şekil 3.10- Şekil 3.19'da verilmiştir.



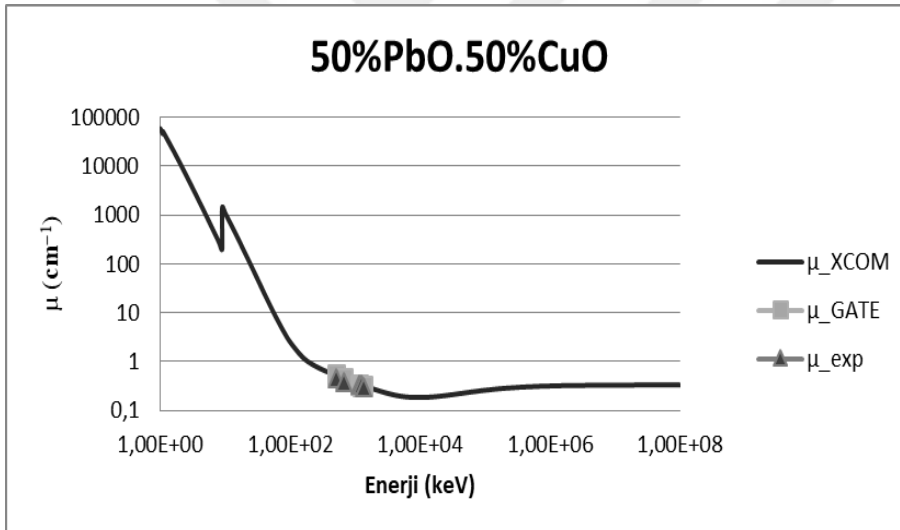
Şekil 3.10. 50%ZrB₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



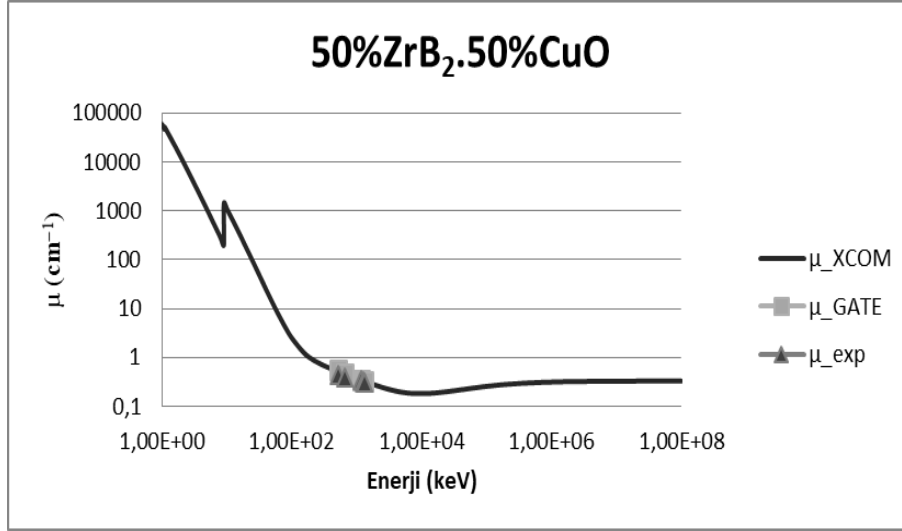
Şekil 3.11. 50%ZnO.50%PbO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



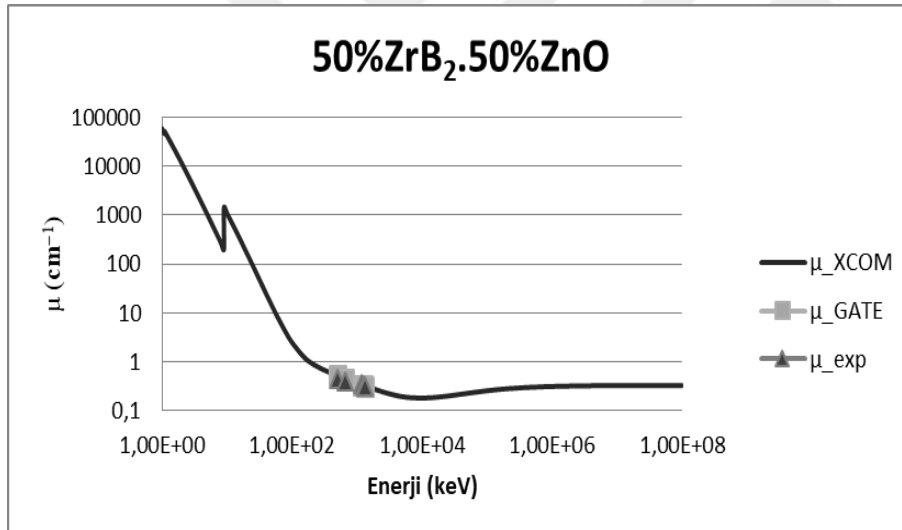
Şekil 3.12. 50%ZnO.50%CuO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



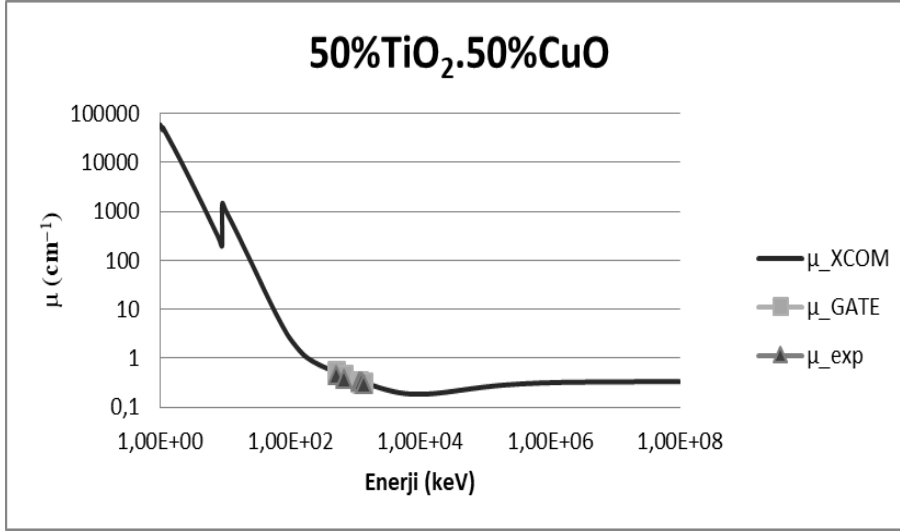
Şekil 3.13. 50%CuO.50%PbO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



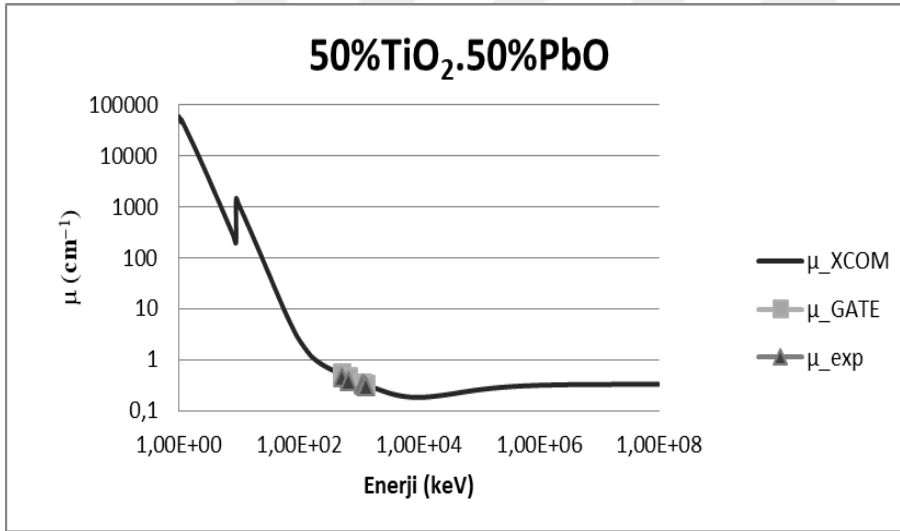
Şekil 3.14. 50%ZrB₂.50%CuO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



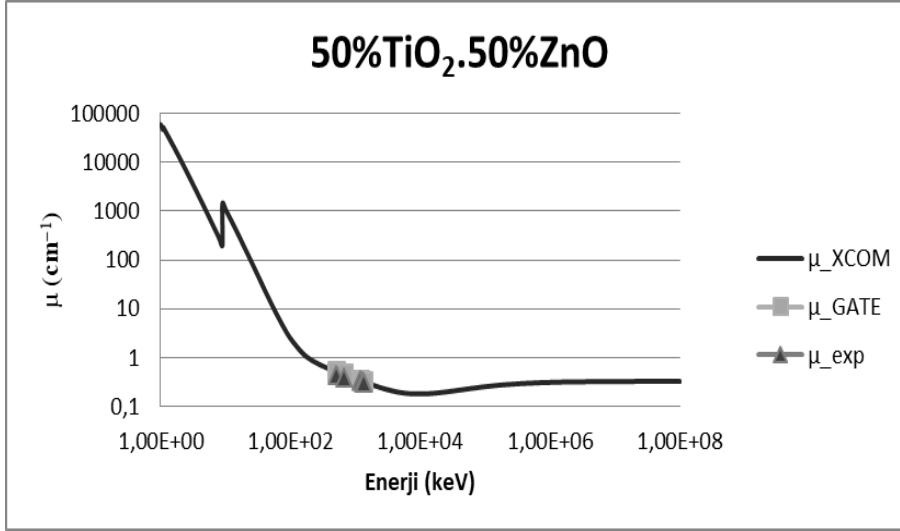
Şekil 3.15. 50%ZrB₂.50%ZnO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



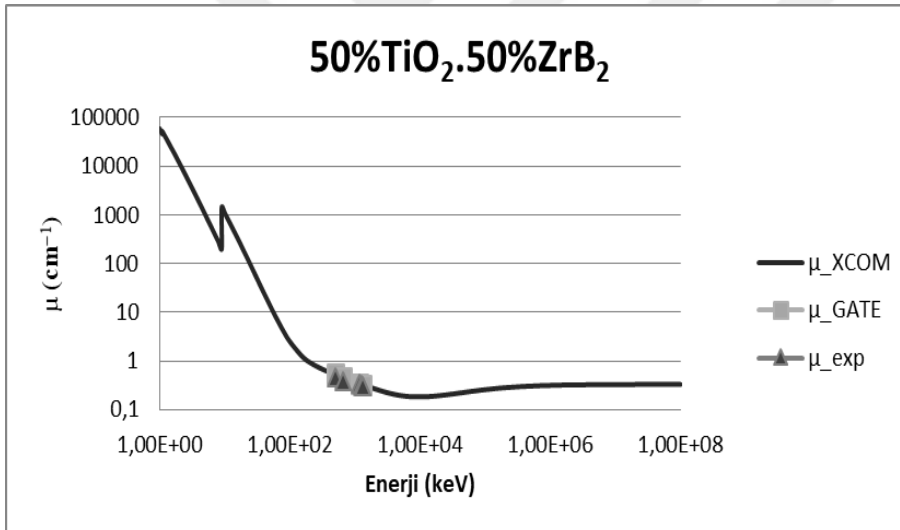
Şekil 3.16. 50%CuO.50%TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği



Şekil 3.17. 50%TiO₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

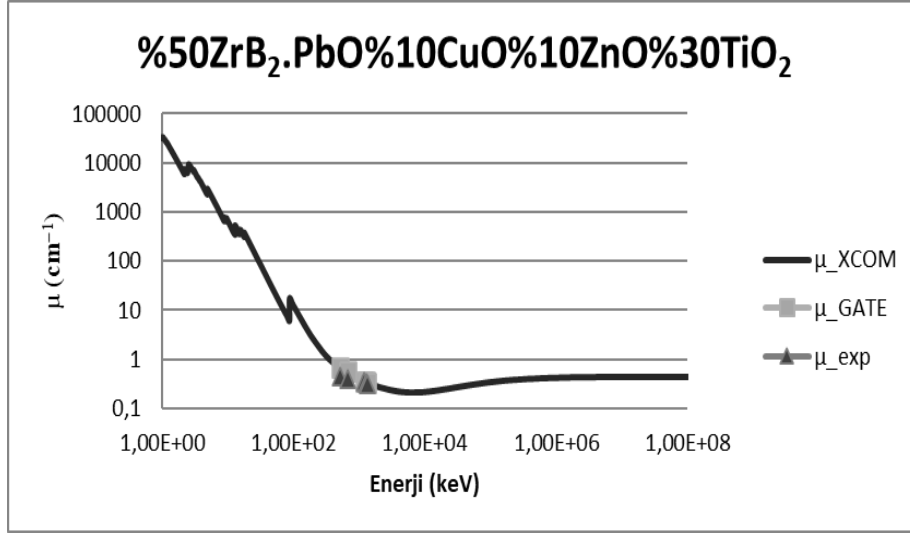


Şekil 3.18. 50%ZnO.50%TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

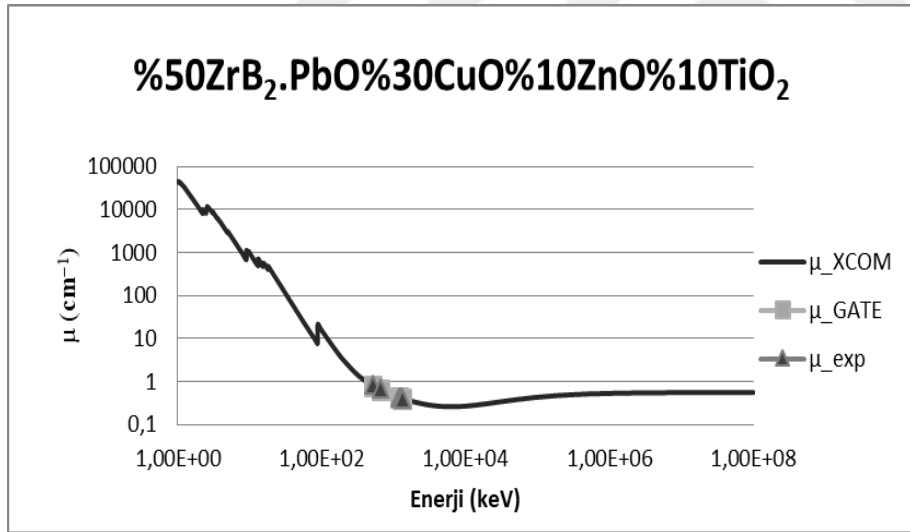


Şekil 3.19. 50%ZrB₂.50%TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

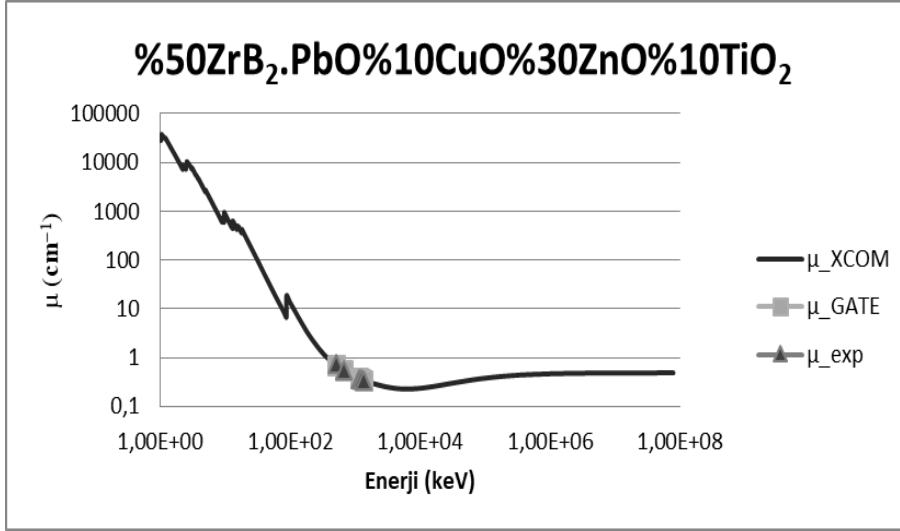
Çözelti içeriğinde %50ZrB₂.PbO sabit tutulması ile hazırlanan beşli numunelere ait deneysel ve teorik lineer soğurma katsayısı değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri Şekil 3.20- Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.20. %50ZrB₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

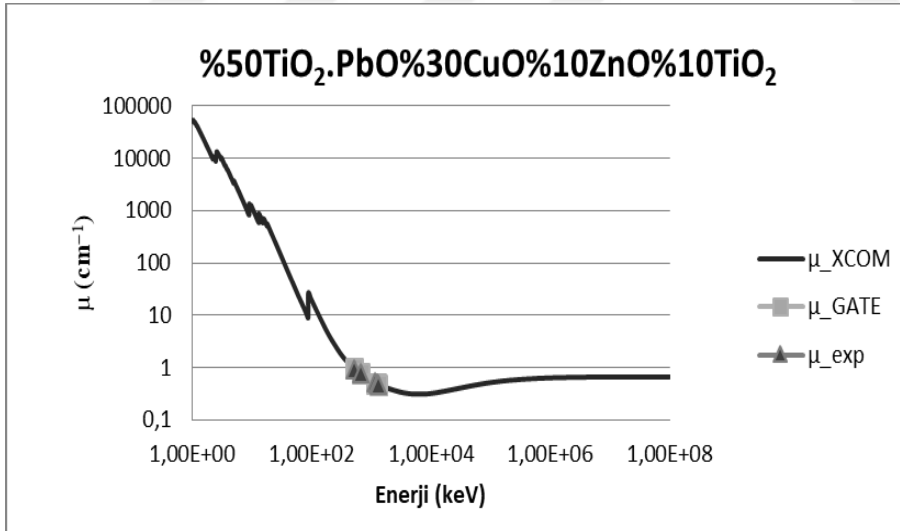


Şekil 3.21. %50ZrB₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

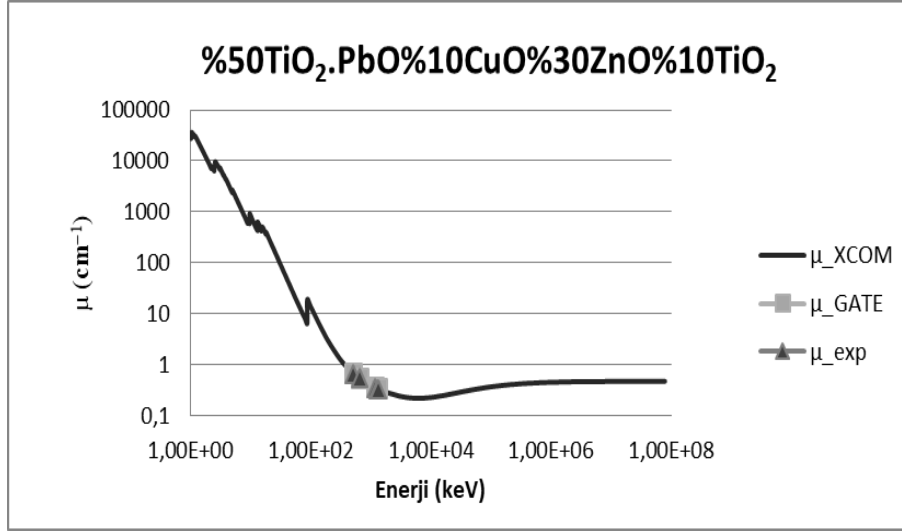


Şekil 3.22. %50ZrB₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

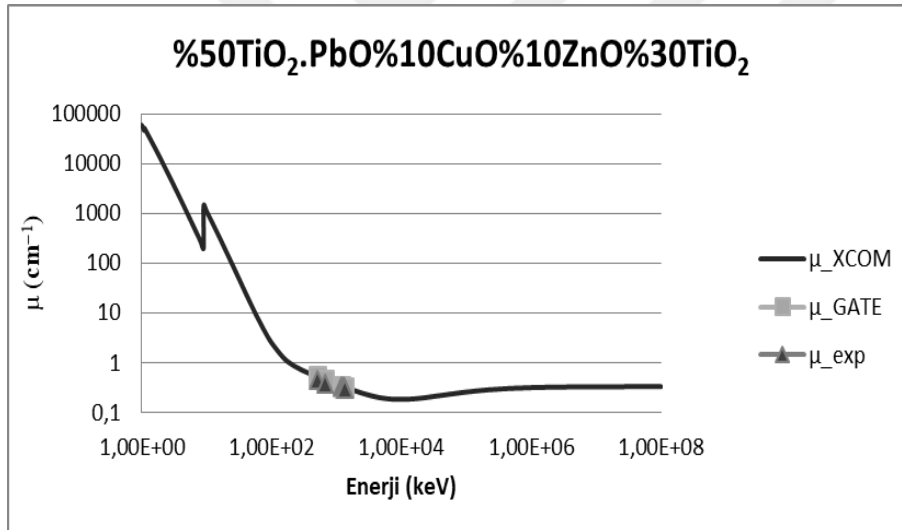
Çözelti içeriğinde %50 TiO₂.PbO'nun sabit tutulması ile hazırlanan beşli numunelere ait deneysel ve teorik lineer soğurma katsayısı değerlerinin karşılaştırmalı grafikleri Şekil 3.23- Şekil 3.25' de verilmiştir.



Şekil 3.23. %50TiO₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

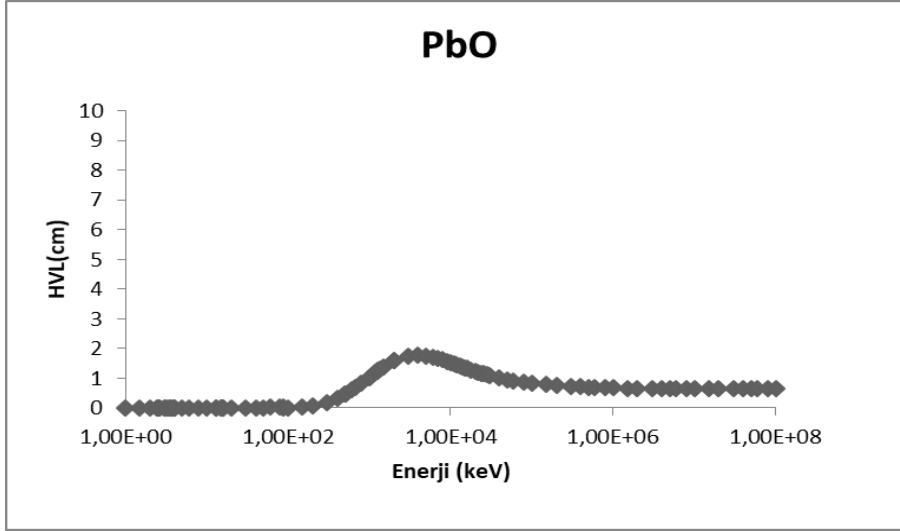


Şekil 3.24. %50TiO₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

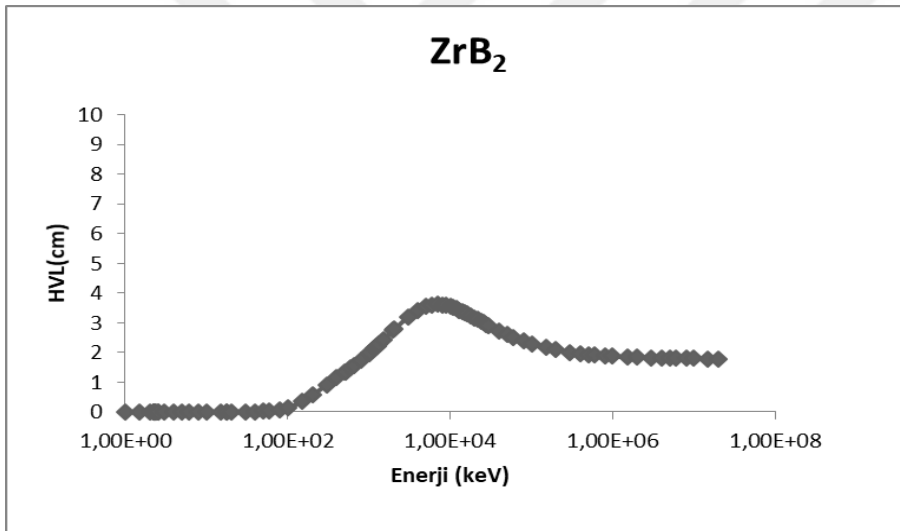


Şekil 3.25. %50TiO₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranında kaplanmış cam numunelerin lineer soğurma katsayı grafiği

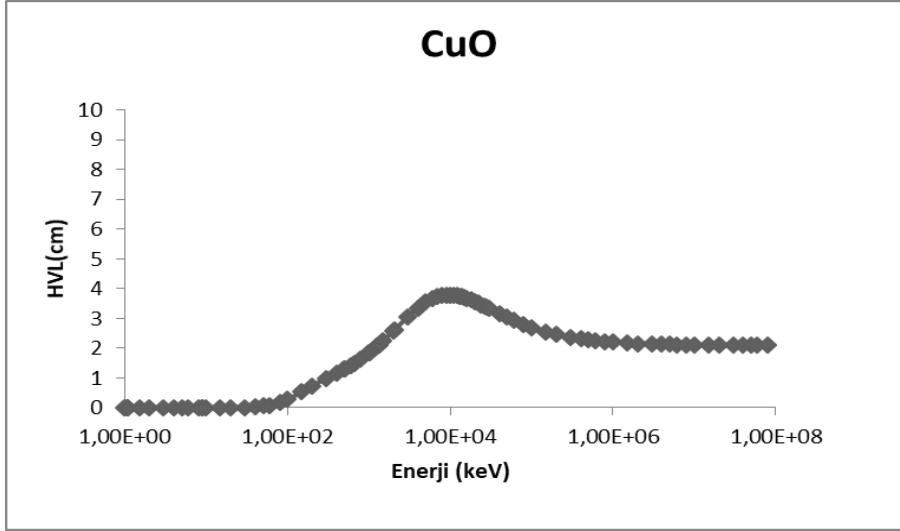
PbO, CuO, ZnO, TiO₂, ZrB₂ oksitlerine ait yarı değer kalınlıklarının (HVL) teorik hesaplamaları Şekil 3.26 - Şekil 3.30'de verilmiştir.



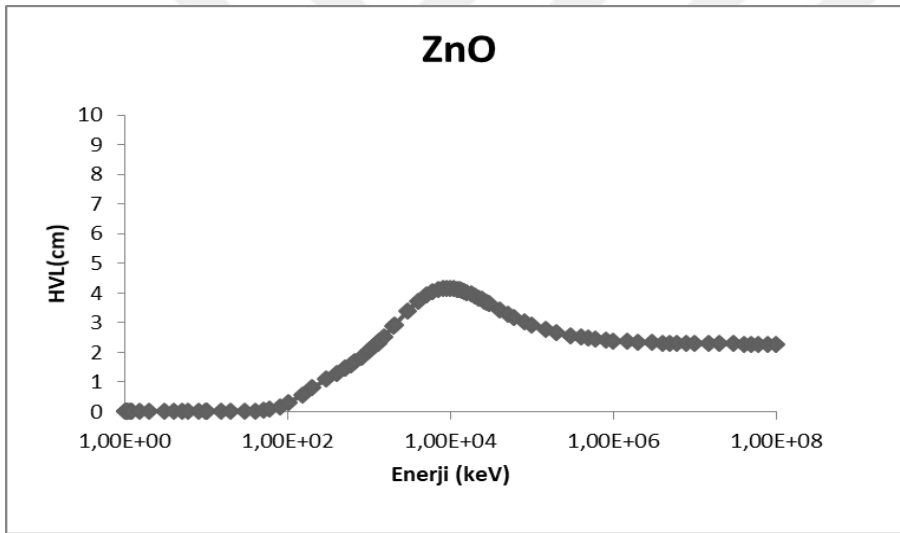
Şekil 3.26. PbO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



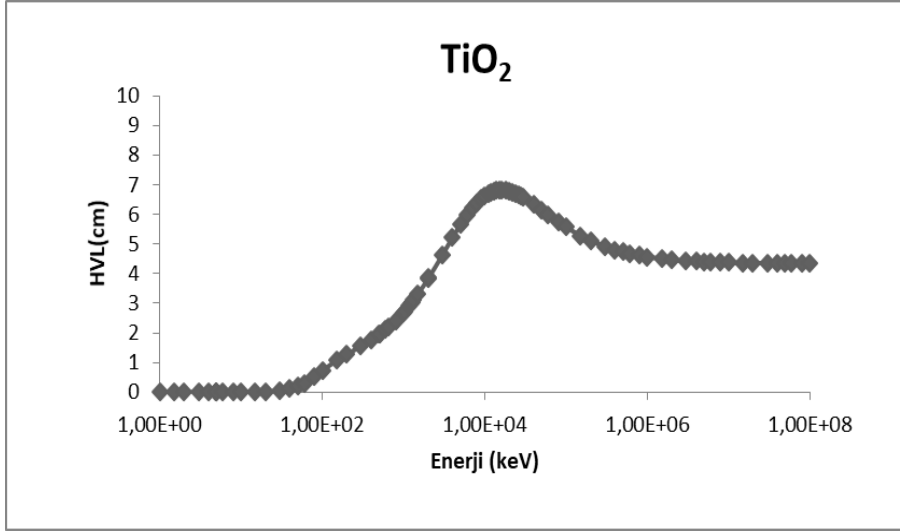
Şekil 3.27. ZrB₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



Şekil 3.28. CuO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

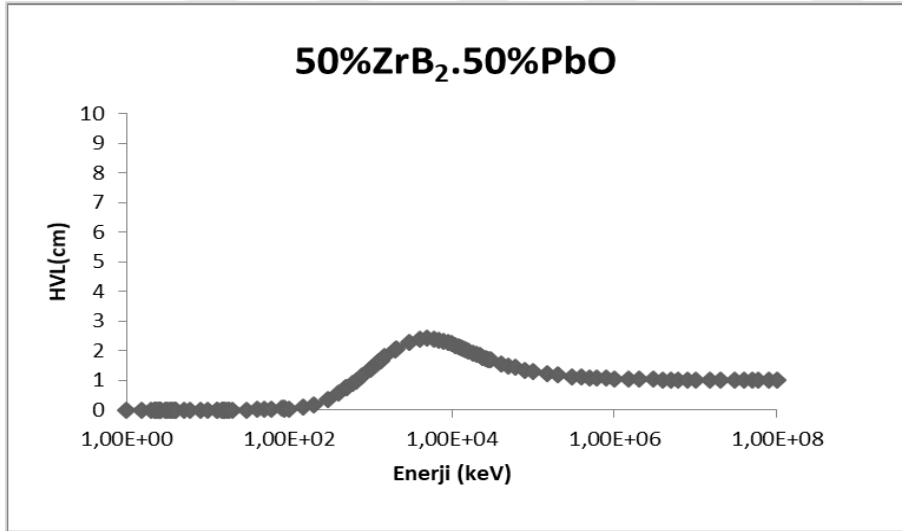


Şekil 3.29. ZnO kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

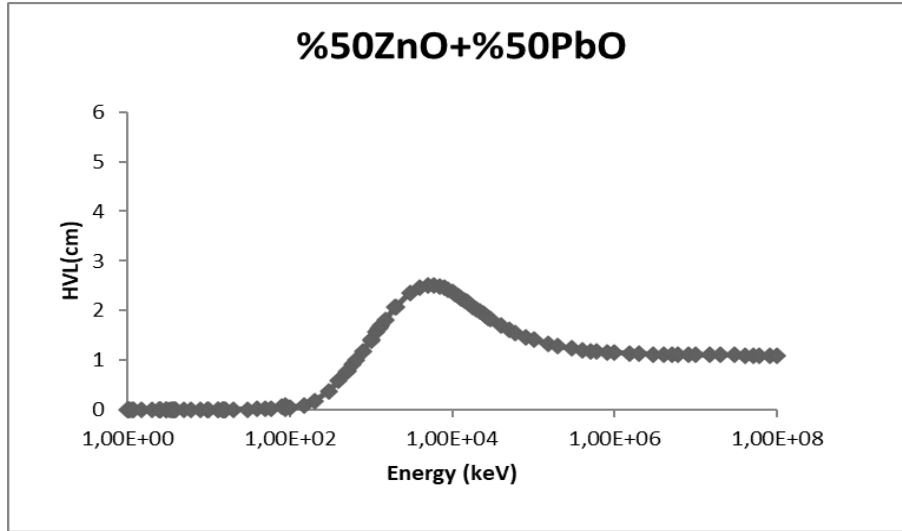


Şekil 3.30. TiO₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

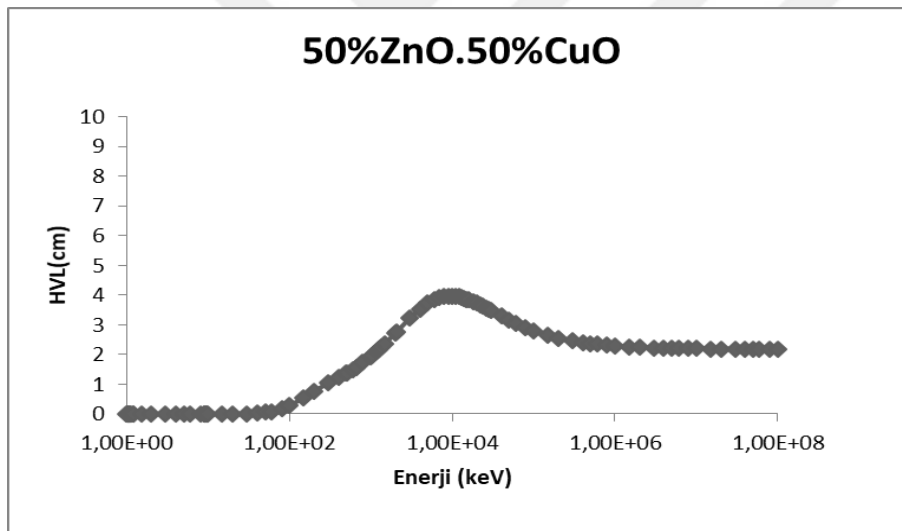
Tüm materyallerin %50 oranında ikili karışımı ile kaplanmış olan cam numunelerin yarıdeğer kalınlıklarına ait teorik hesaplama sonuçları Şekil 3.31- Şekil 3.40’ da verilmiştir.



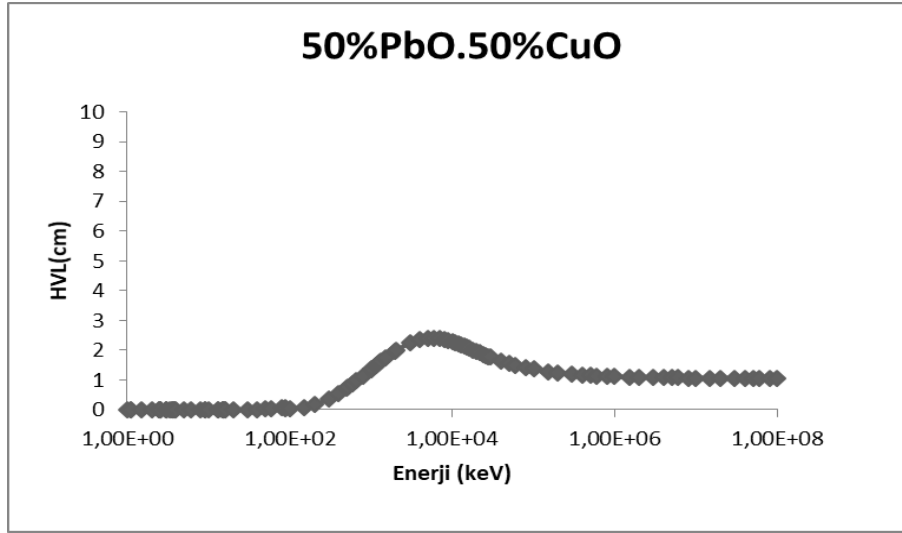
Şekil 3.31. 50%ZrB₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



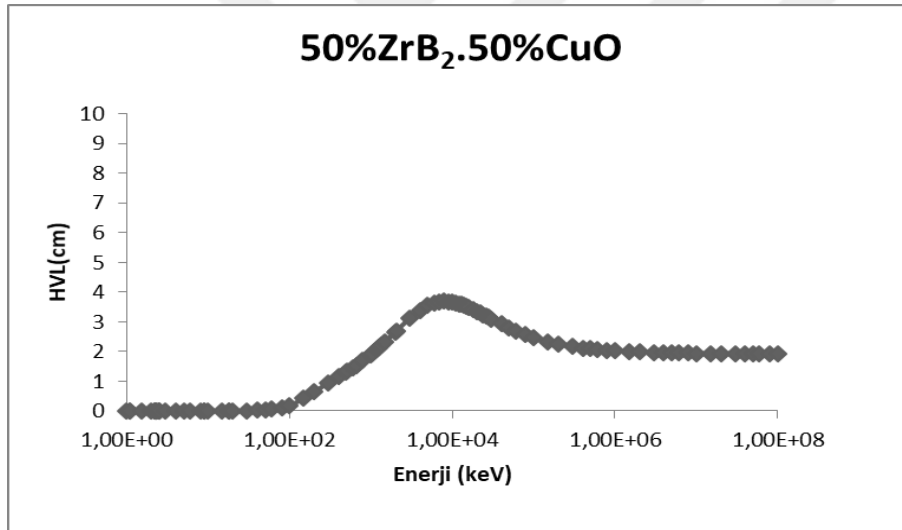
Şekil 3.32. 50%ZnO.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



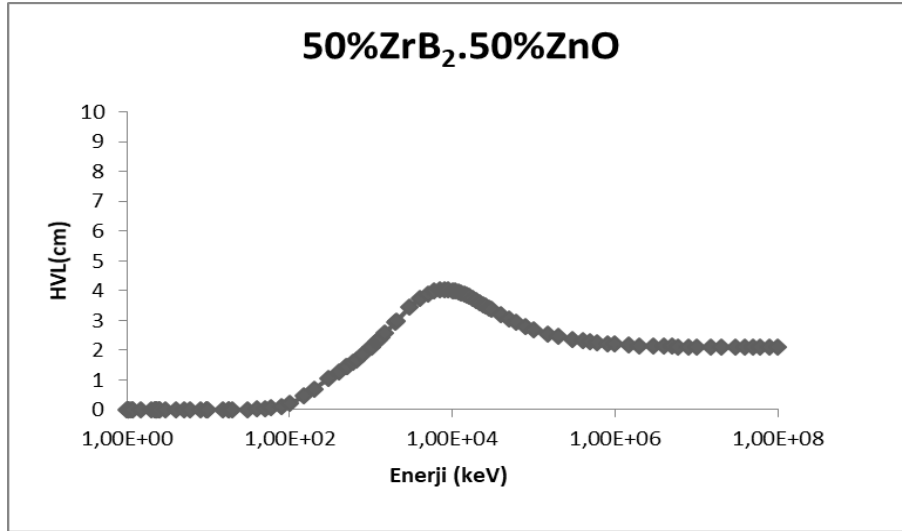
Şekil 3.33. 50%ZnO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



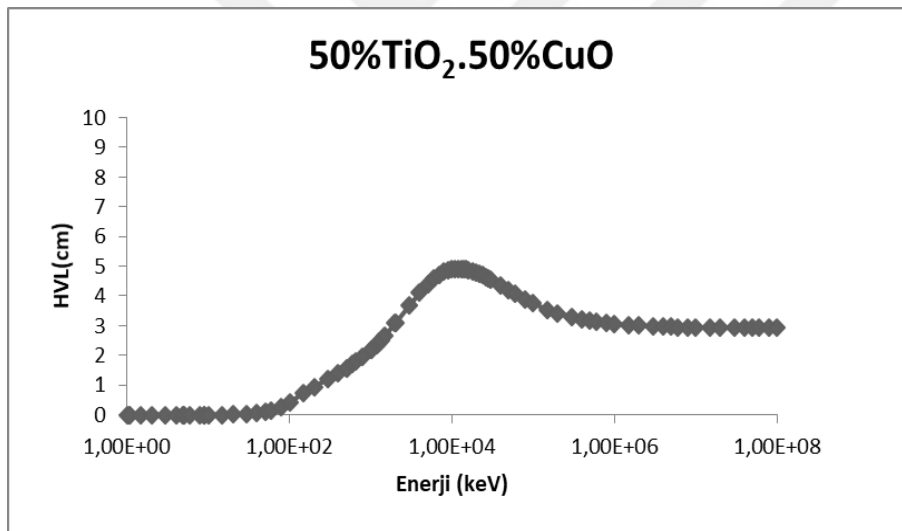
Şekil 3.34. 50%PbO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



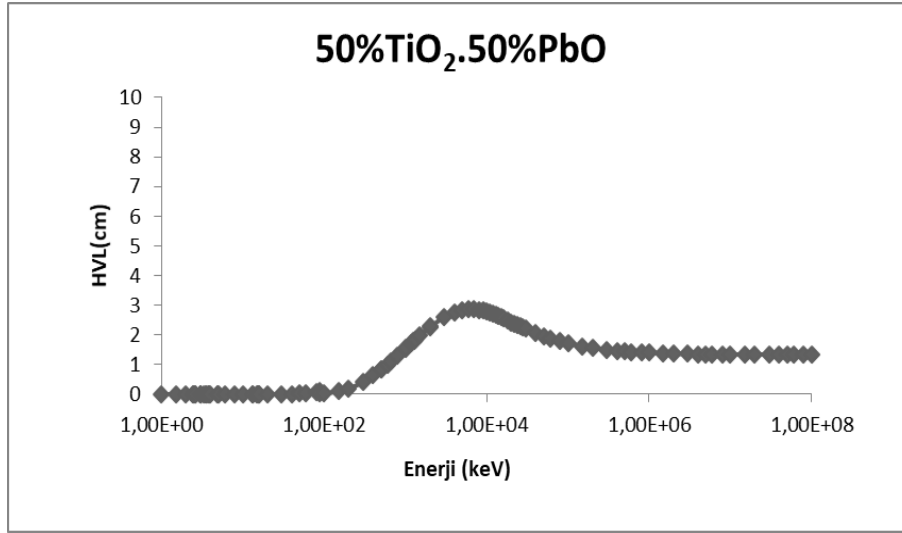
Şekil 3.35. 50%ZrB₂.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



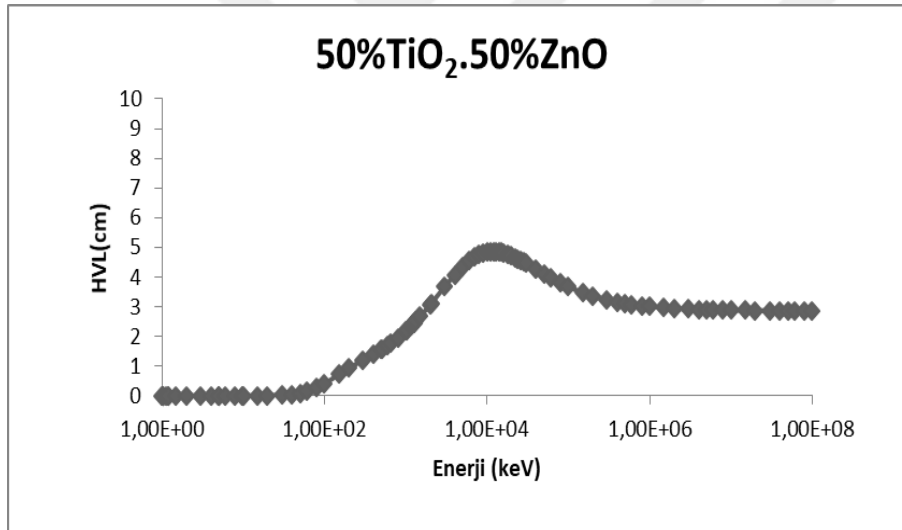
Şekil 3.36. 50%ZrB₂.50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



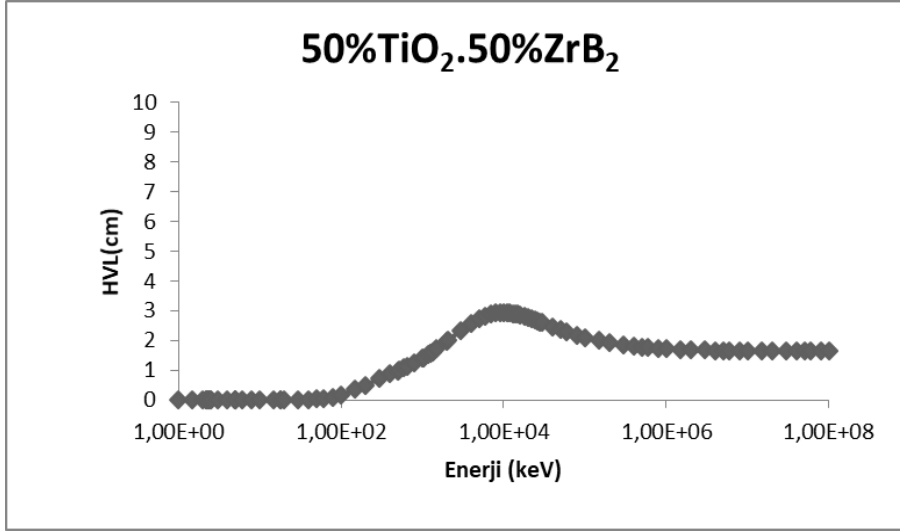
Şekil 3.37. 50%TiO₂.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği



Şekil 3.38. 50%TiO₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

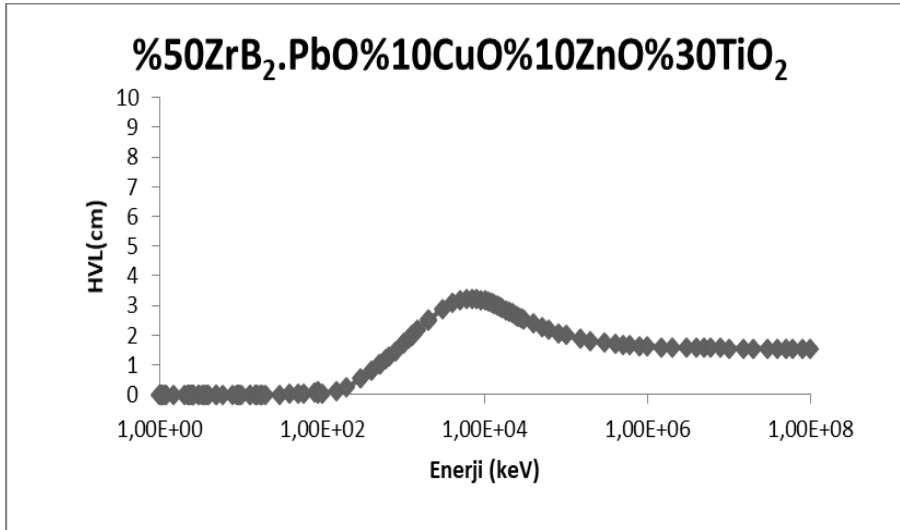


Şekil 3.39. 50%TiO₂.50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

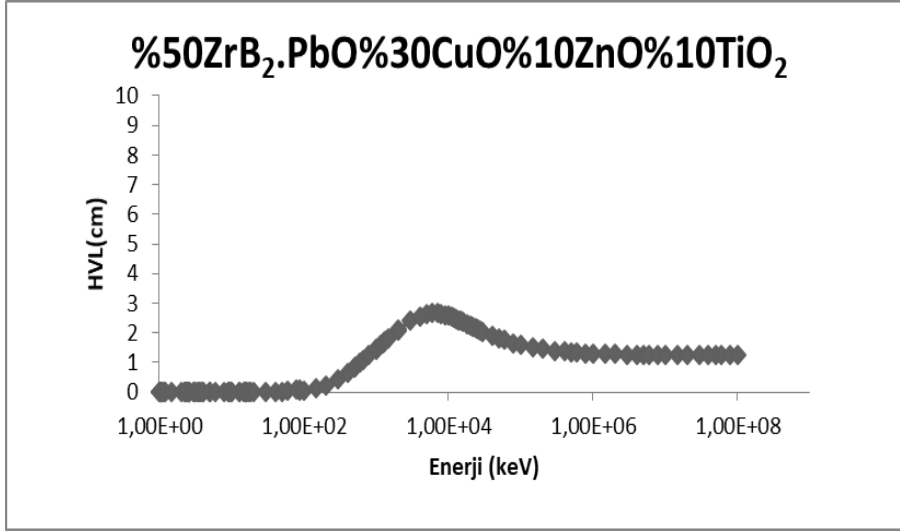


Şekil 3.40. 50%TiO₂.50%ZrB₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

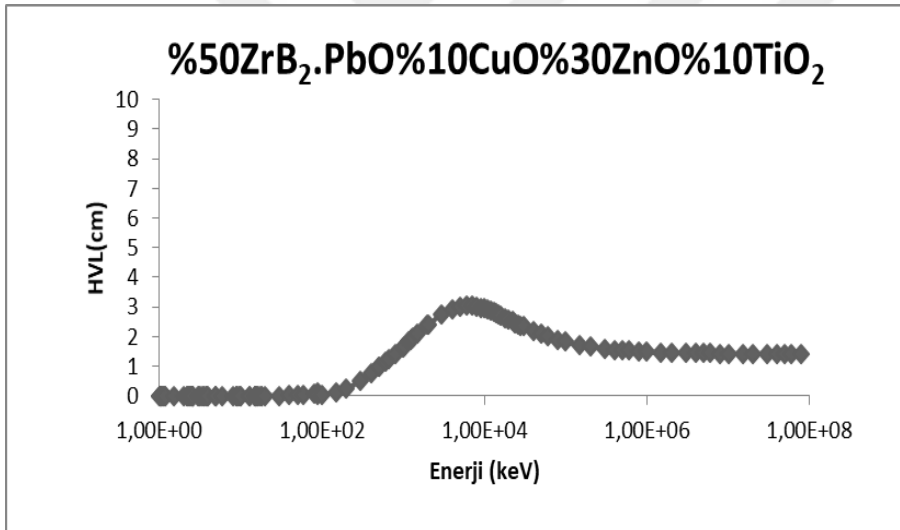
Oksit materyallerin %50 ZrB₂.PbO karışımının sabit tutulması ile hazırlanan beşli karışımlara ait yarıdeğer kalınlıklarının teorik hesaplama sonuçları Şekil 3.41- Şekil 3.43'da verilmiştir.



Şekil 3.41. %50ZrB₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

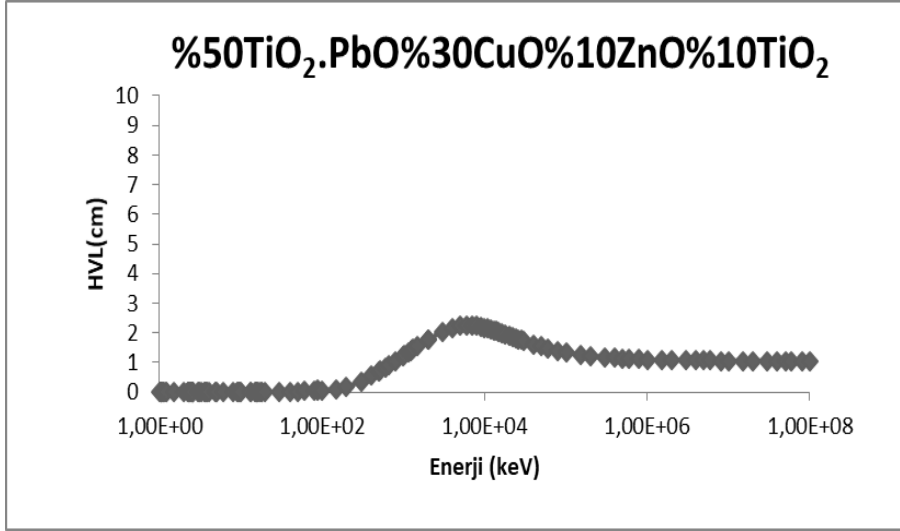


Şekil 3.42. %50ZrB₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

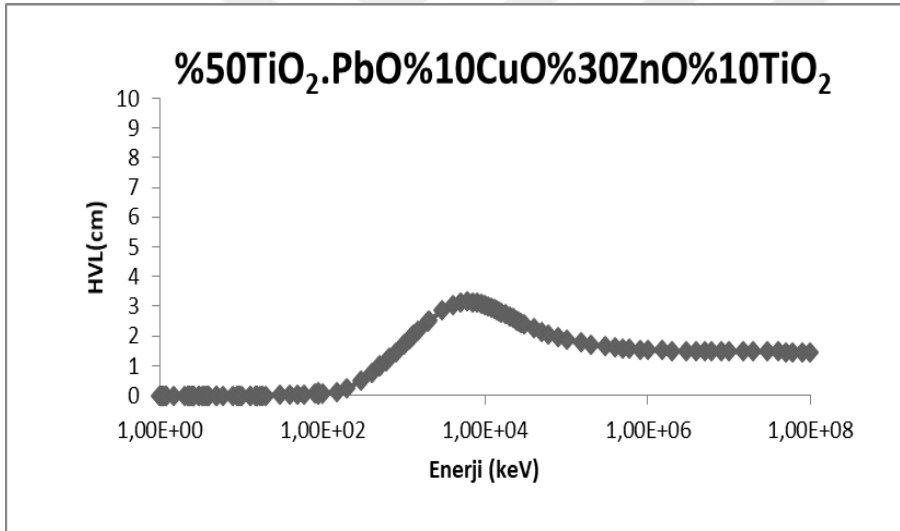


Şekil 3.43. %50ZrB₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

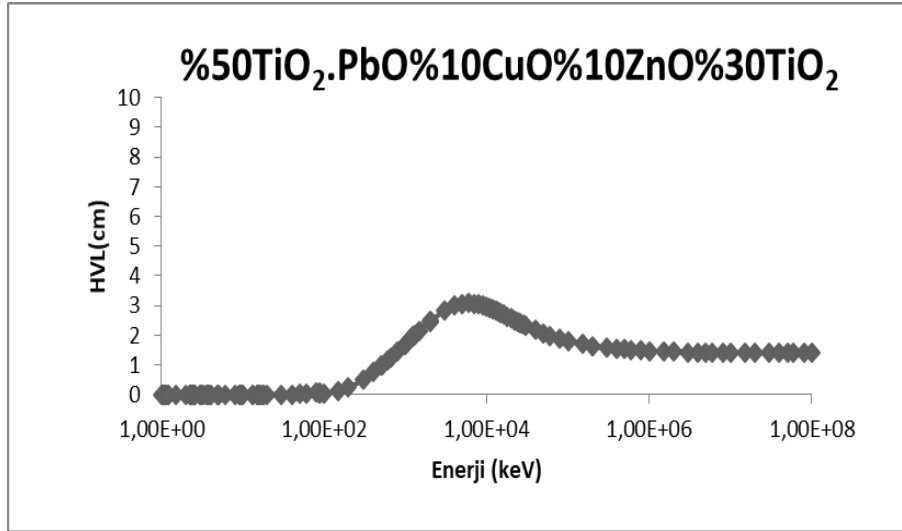
Oksit materyallerin %50TiO₂.PbO karışımının sabit tutulması ile hazırlanan beşli karışımlara ait yarıdeğer kalınlıklarının teorik hesaplama sonuçları Şekil 3.44- Şekil 3.46'de verilmiştir.



Şekil 3.44. %50TiO₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

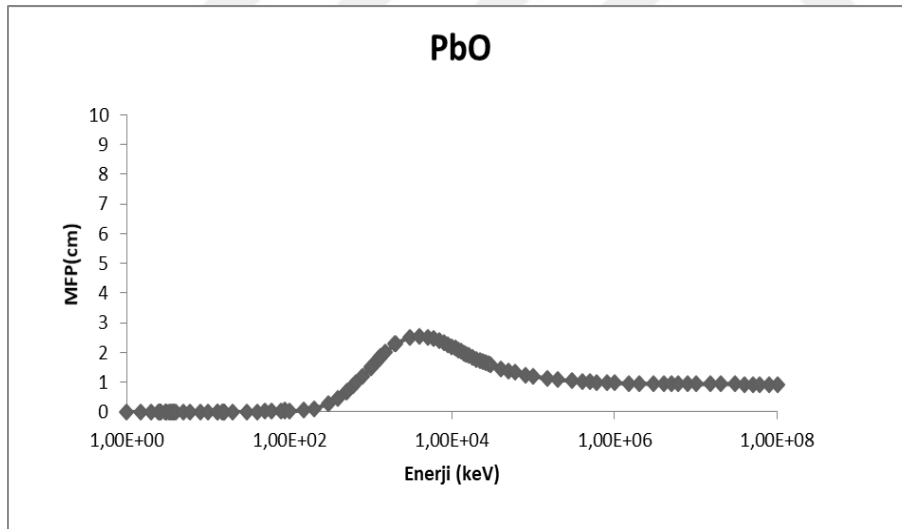


Şekil 3.45. %50TiO₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

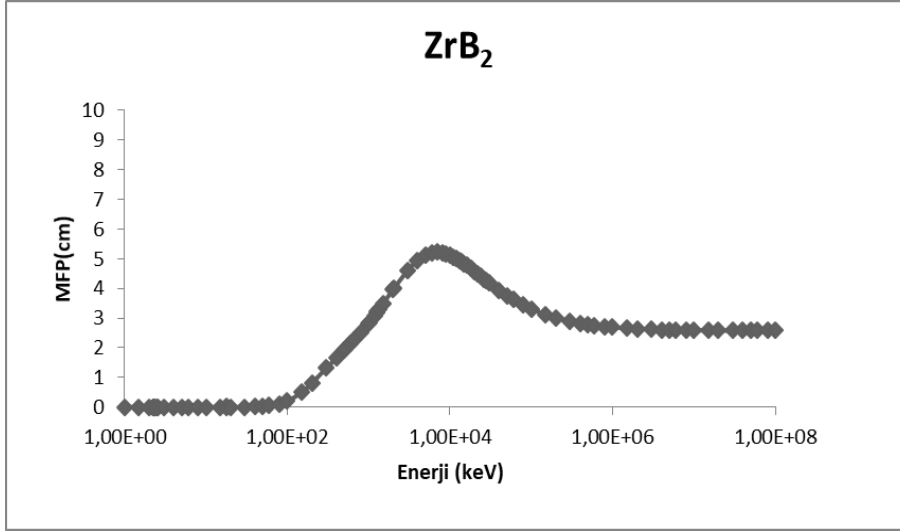


Şekil 3.46. %50TiO₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik yarıdeğer kalınlık değeri grafiği

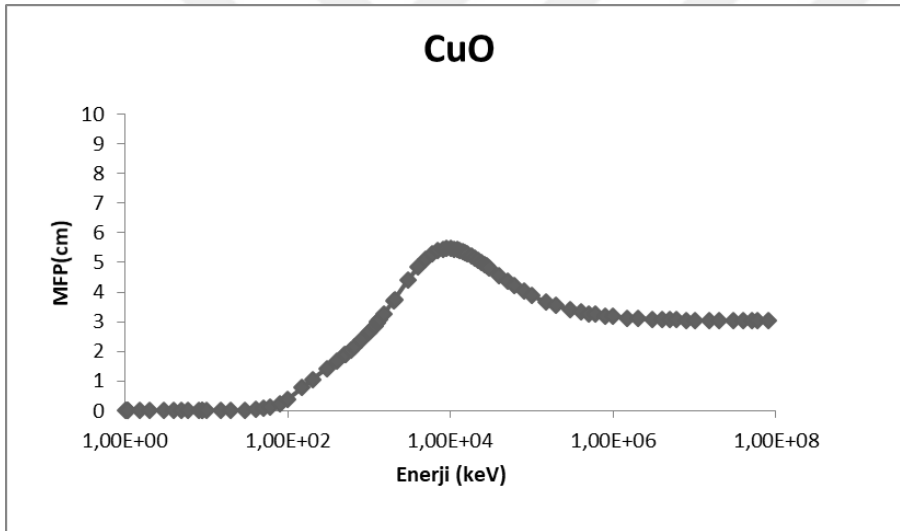
PbO, CuO, ZnO, TiO₂, ZrB₂ oksitlerine ait ortalama serbest yol (MFP) teorik hesaplamaları Şekil 3.47- Şekil 3.50’de verilmiştir.



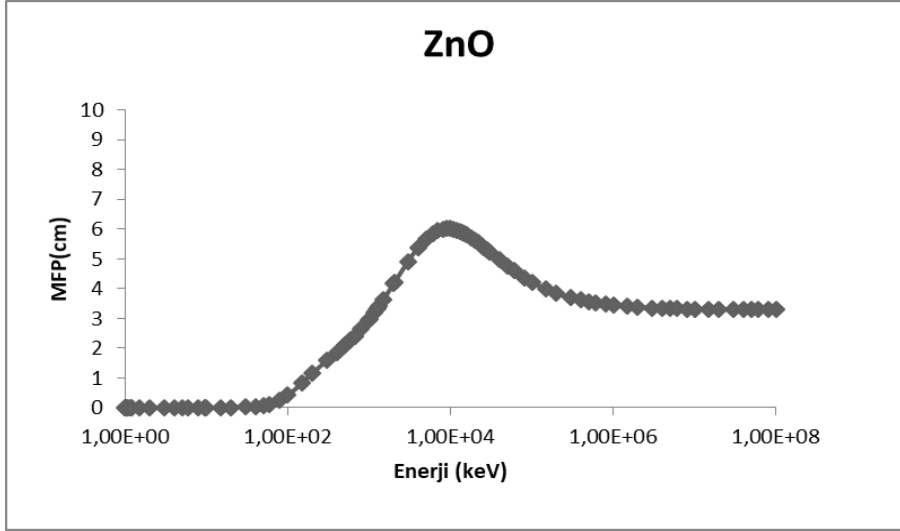
Şekil 3.47. PbO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



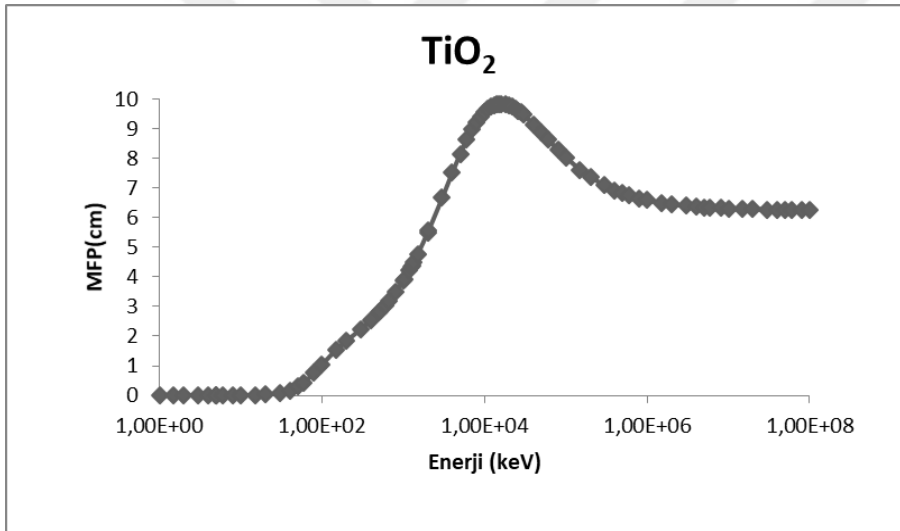
Şekil 3.48. ZrB₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



Şekil 3.49. CuO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

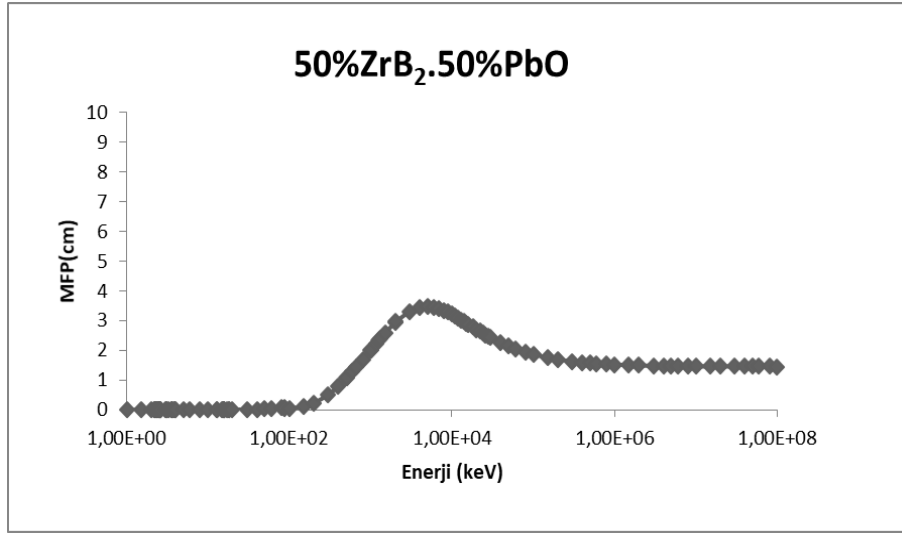


Şekil 3.50. ZnO kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

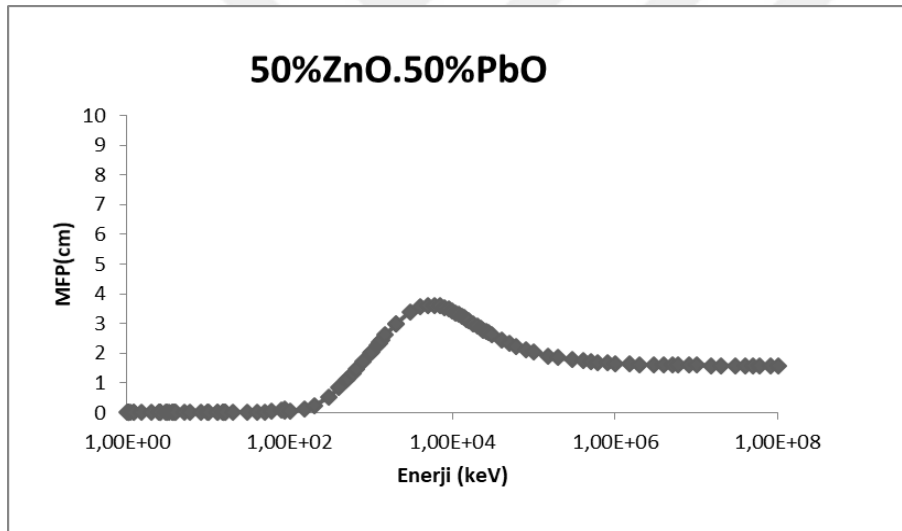


Şekil 3.51. TiO₂ kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

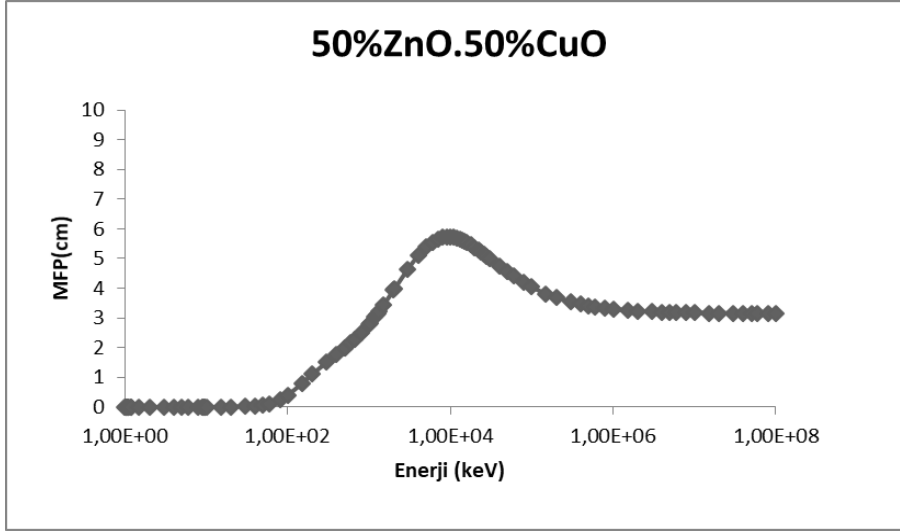
Oksit materyallerin %50 oranında karışımı ile kaplanan cam numunelerin teorik MFP değerleri Şekil 3.52- Şekil 3.60'de verilmiştir.



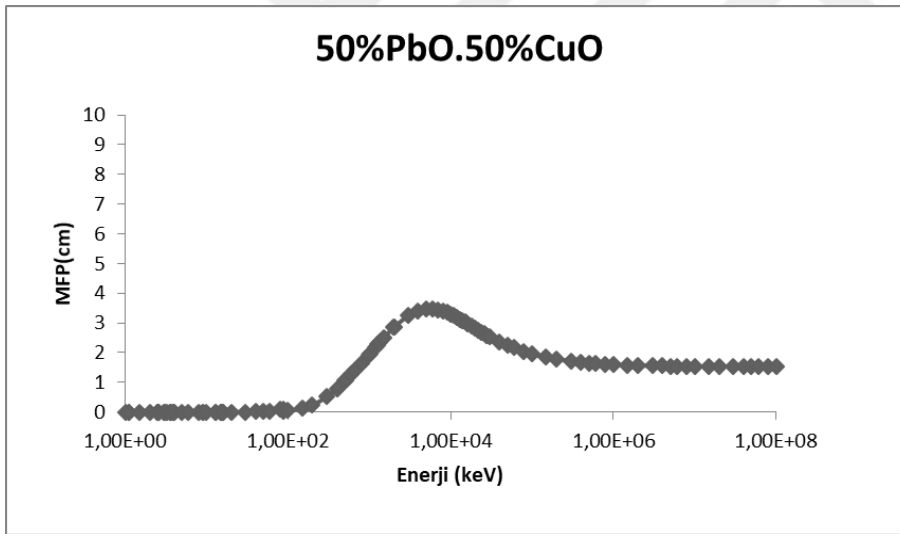
Şekil 3.52. 50%ZrB₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



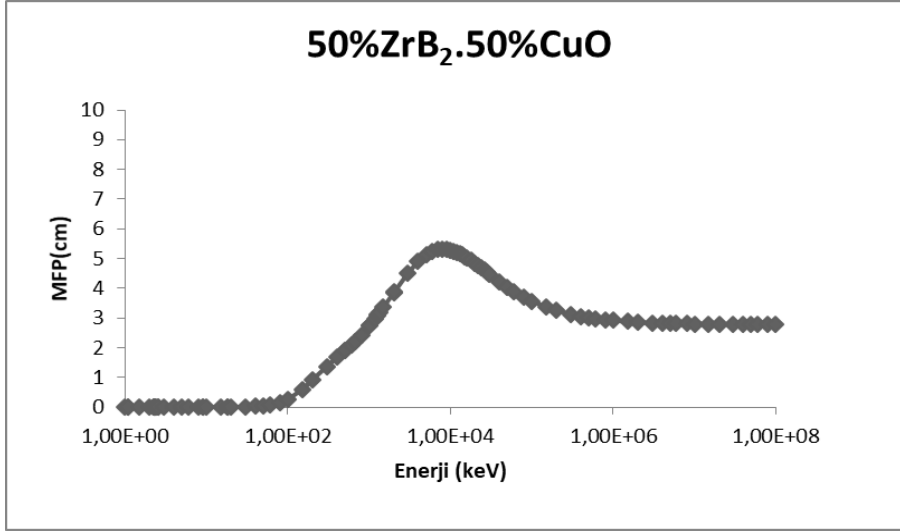
Şekil 3.53. 50%ZnO.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



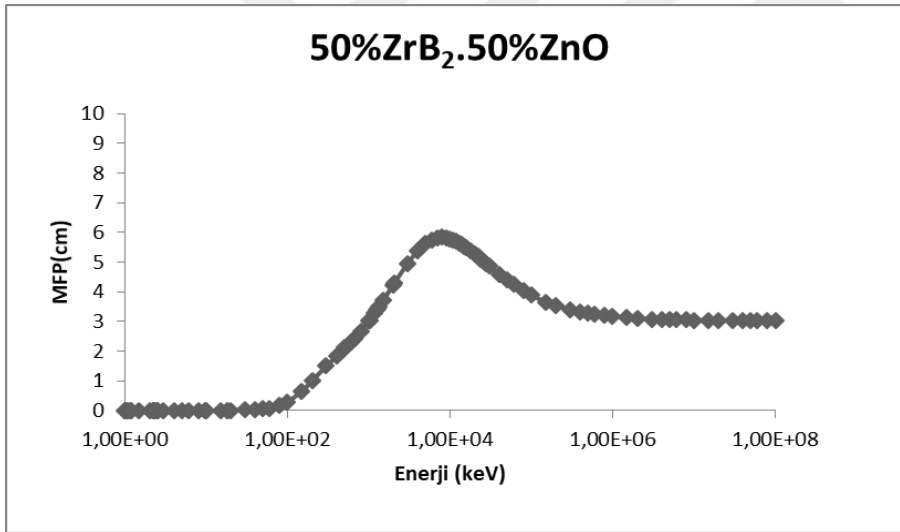
Şekil 3.54. 50%ZnO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



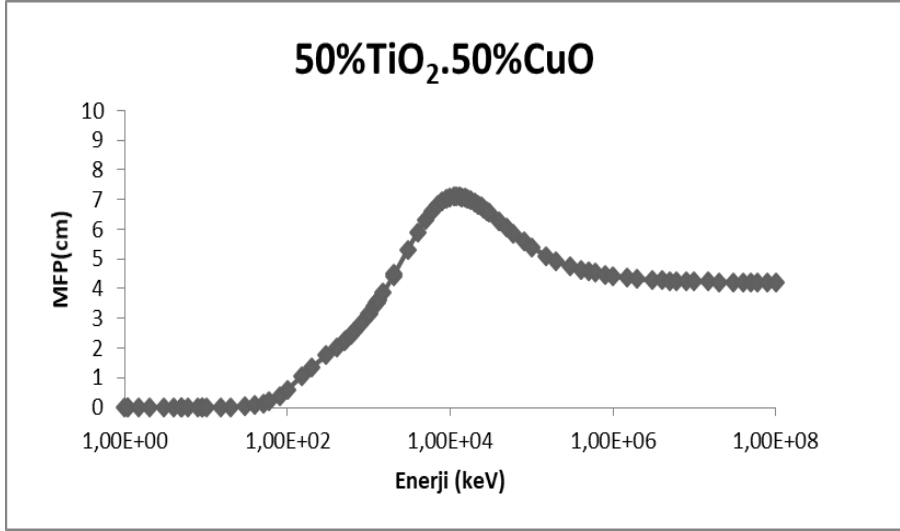
Şekil 3.55. 50%PbO.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



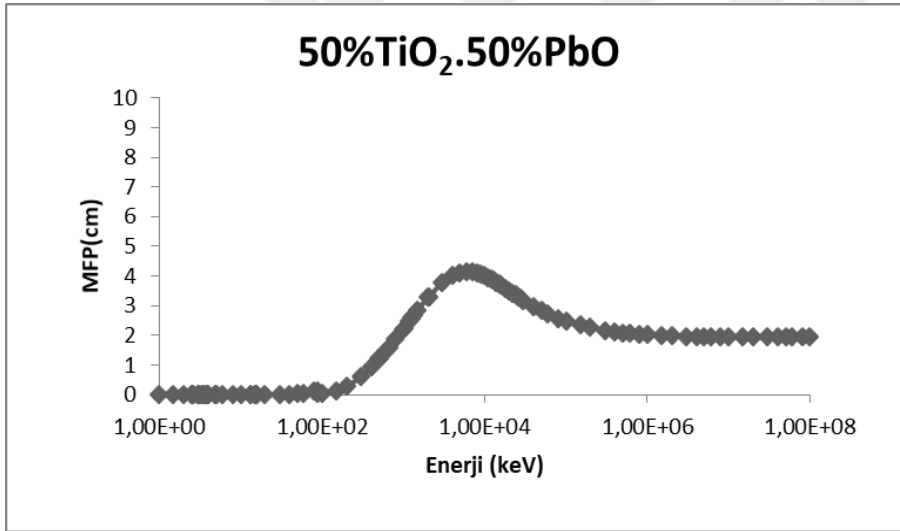
Şekil 3.56. 50% ZrB_2 .50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



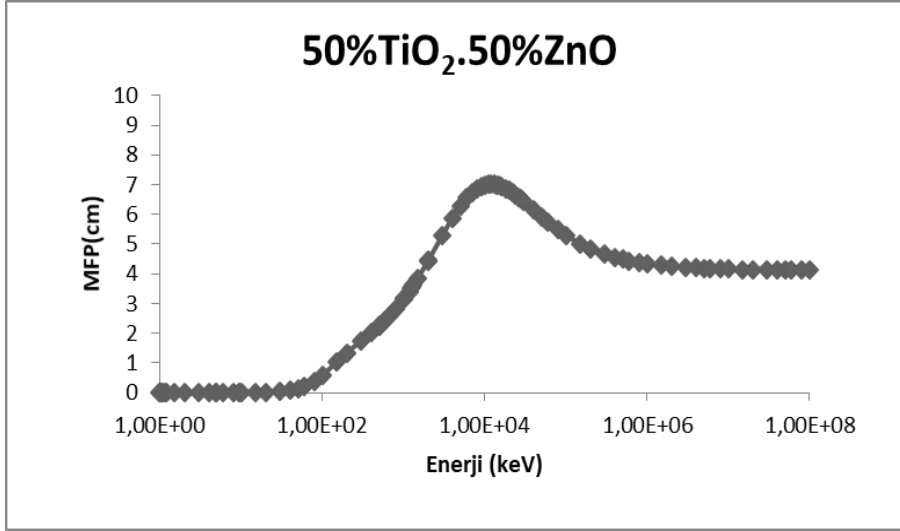
Şekil 3.57. 50% ZrB_2 .50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



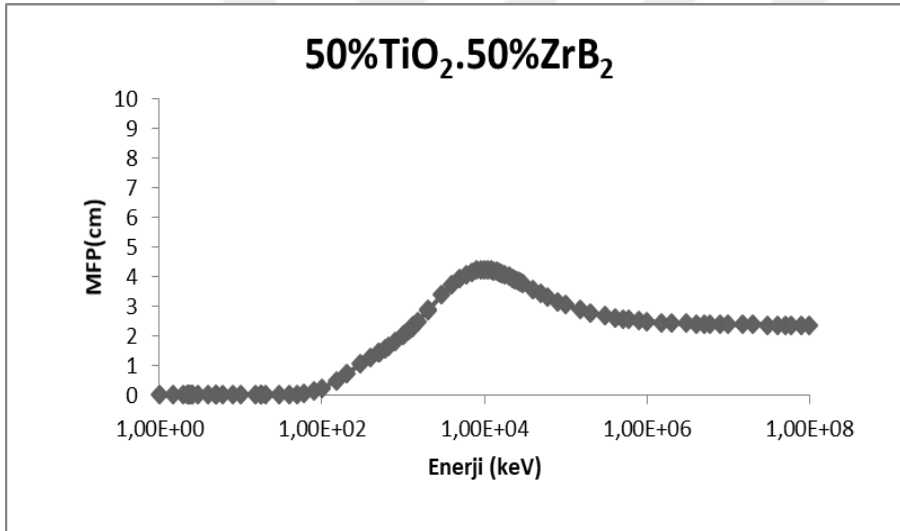
Şekil 3.58. 50% TiO₂.50%CuO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği



Şekil 3.59. 50%TiO₂.50%PbO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

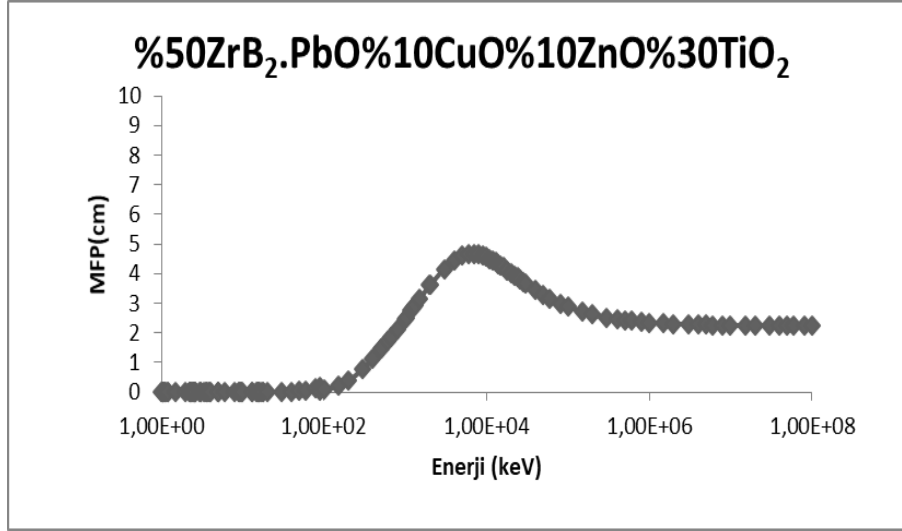


Şekil 3.60. 50%TiO₂.50%ZnO oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

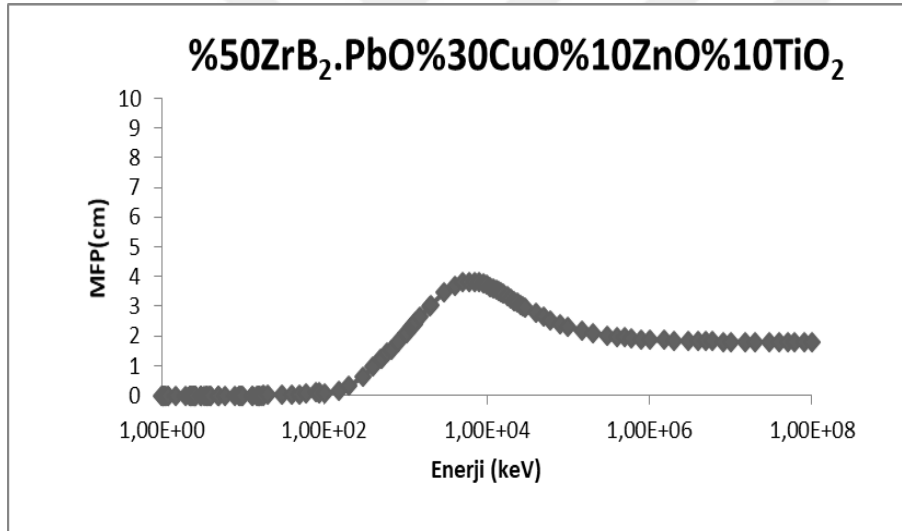


Şekil 3.61. 50% TiO₂.50%ZrB₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

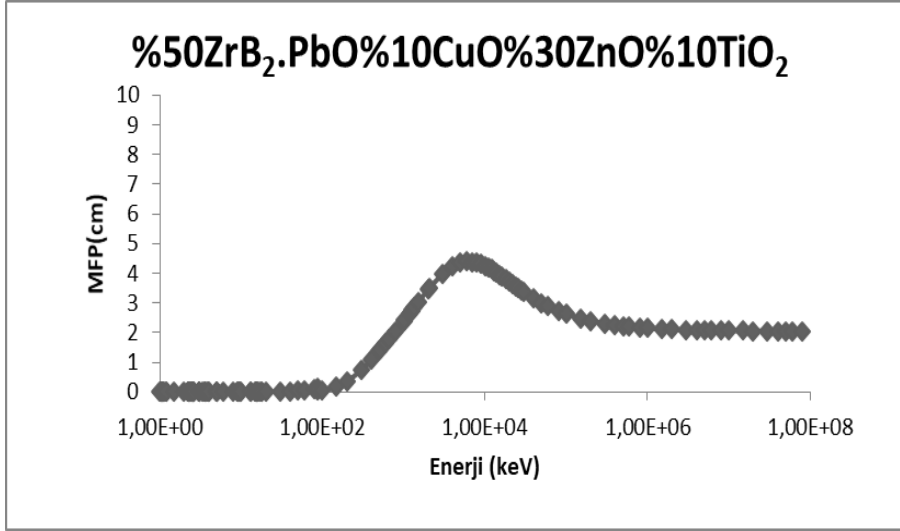
Oksit materyallerin %50ZrB₂.PbO karışımının sabit tutulması ile hazırlanan beşli karışımlara ait teorik MFP (ortalama serbest yol) hesaplama sonuçları Şekil 3.62- Şekil 3.64' de verilmiştir.



Şekil 3.62. %50ZrB₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

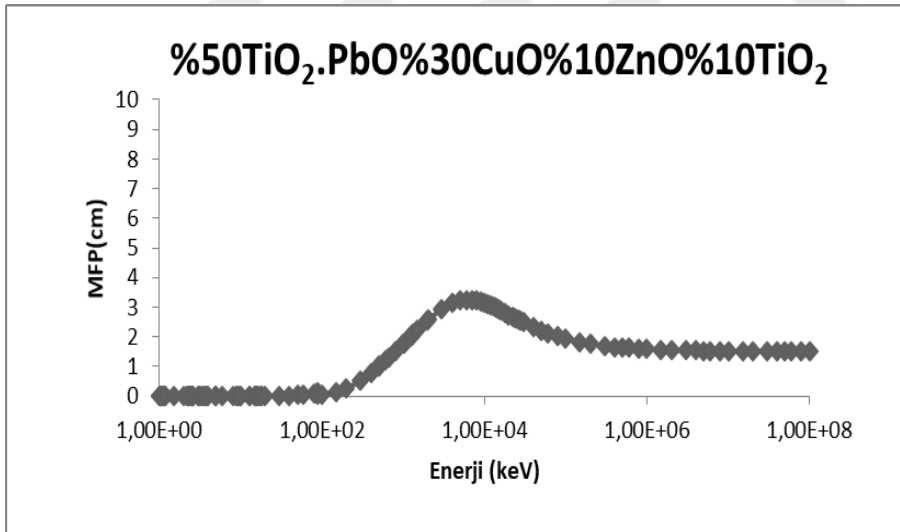


Şekil 3.63. %50ZrB₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

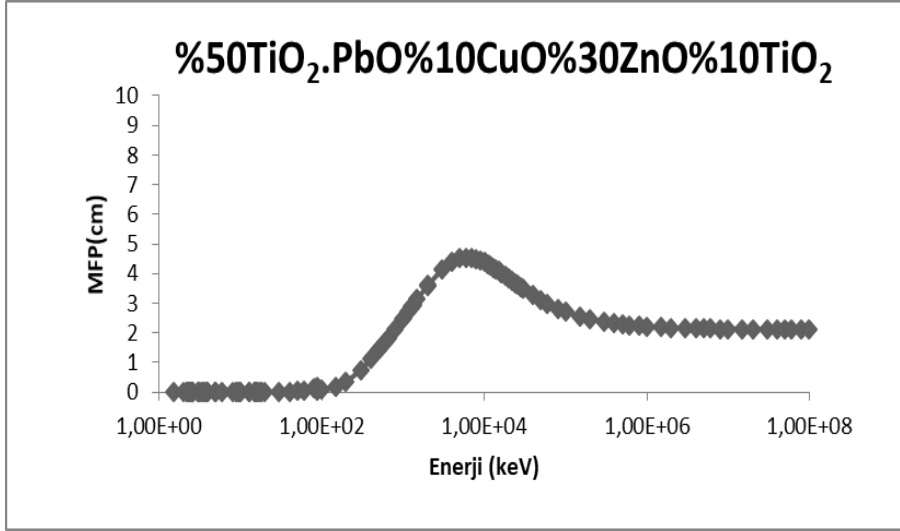


Şekil 3.64. %50ZrB₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

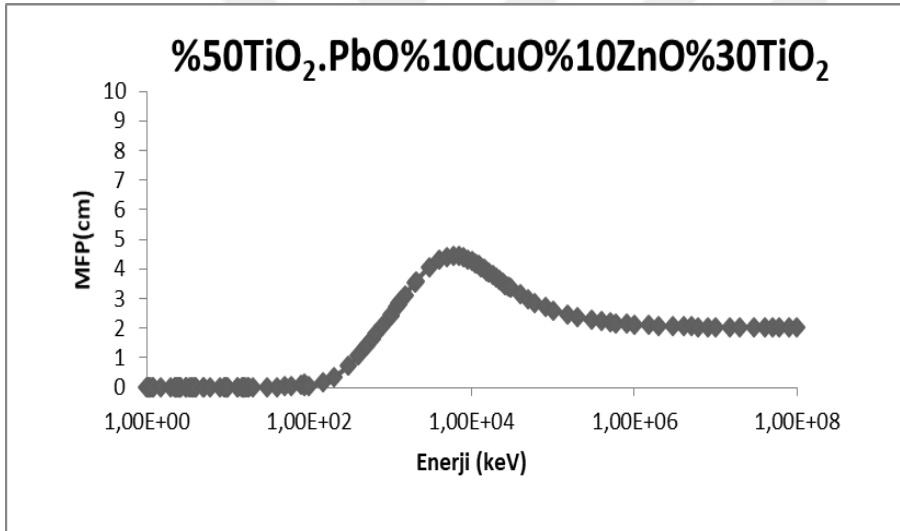
Oksit materyallerin %50TiO₂.PbO sabit tutulması ile hazırlanan beşli karışımlara ait teorik ortalama serbest yol hesaplama sonuçları Şekil 3.65- Şekil 3.67 de verilmiştir.



Şekil 3.65. %50TiO₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

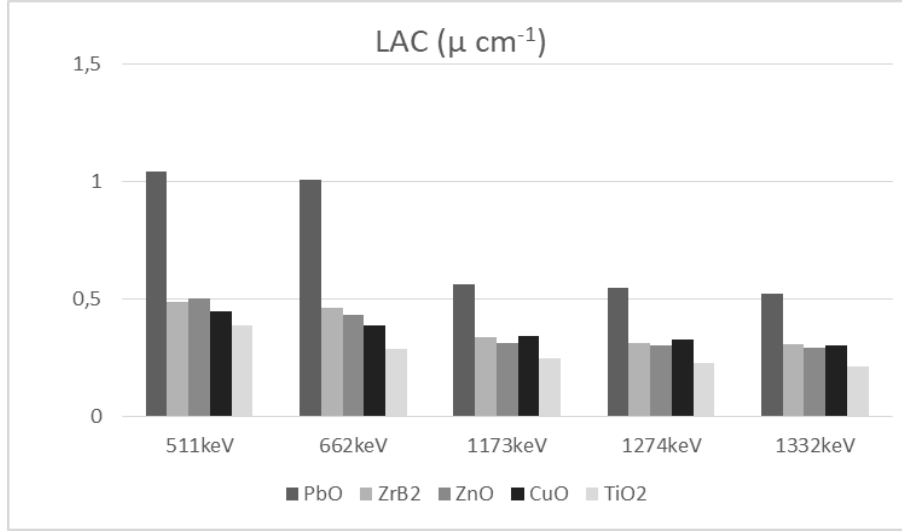


Şekil 3.66. %50TiO₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

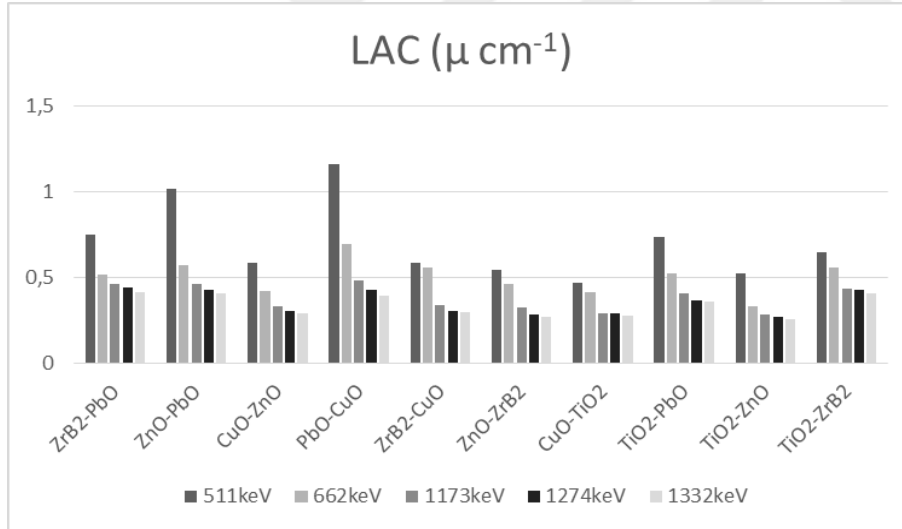


Şekil 3.67. %50TiO₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranında kaplanmış cam numuneye ait teorik ortalama serbest yol değeri grafiği

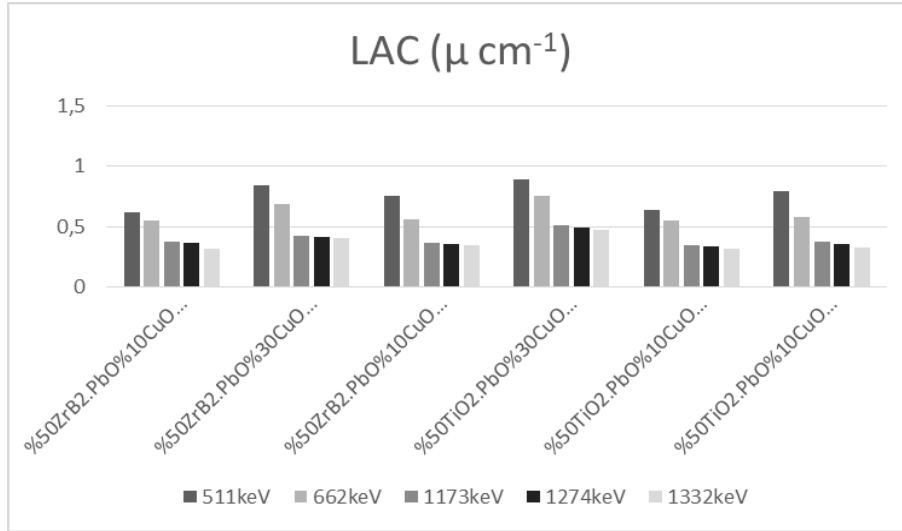
Numunelerin deneysel verilere göre elde edilen lineer soğurma katsayısı, yarıdeğer kalınlık ve ortalama serbest yol grafikleri Şekil 3.68, Şekil 3.76’de verilmiştir.



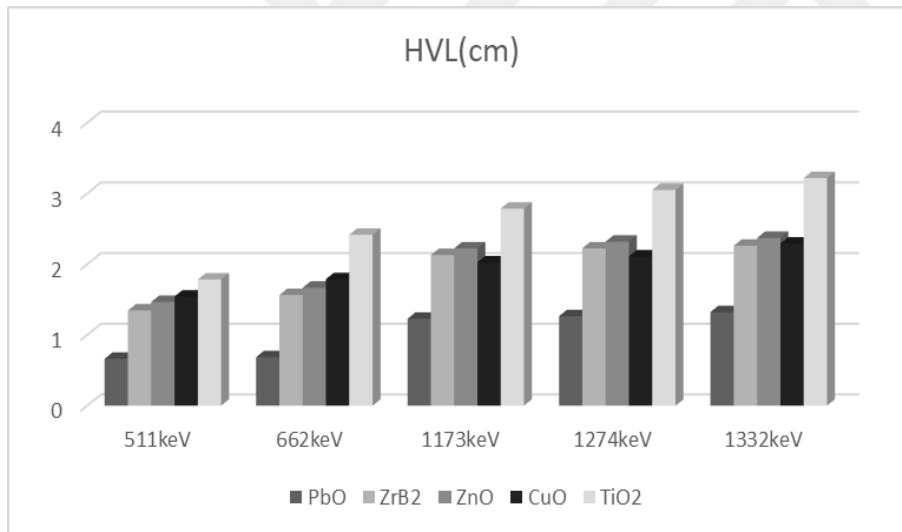
Şekil 3.68. PbO, CuO, ZnO, ZrB₂, TiO₂ bileşikleri ile kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği



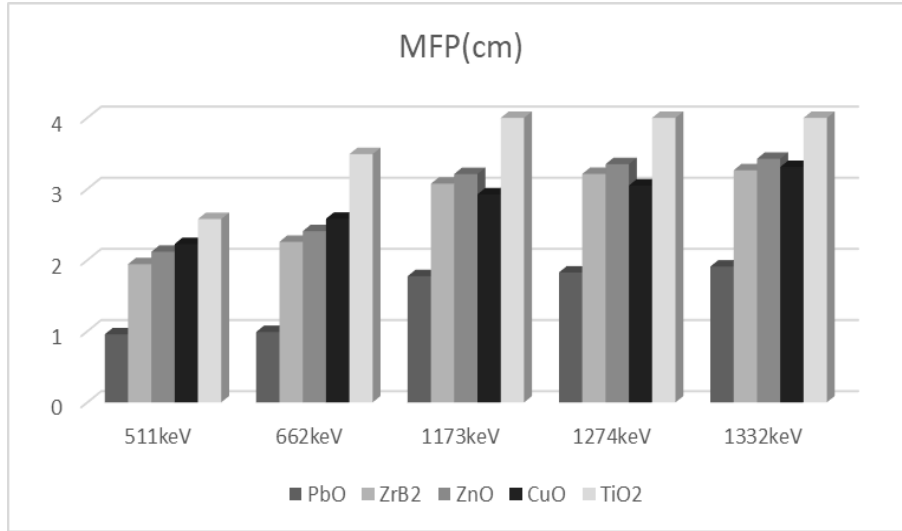
Şekil 3.69. %50 oranında PbO, CuO, ZnO, ZrB₂, TiO₂ bileşikleri ile kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği



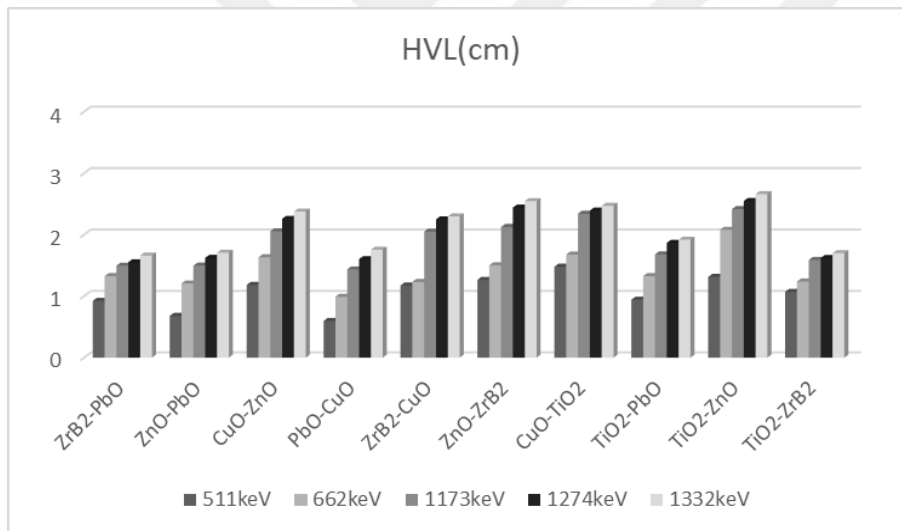
Şekil 3.70. %50ZrB₂.PbO ve %50TiO₂.PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış cam numunelere ait deneysel lineer soğurma katsayısı grafiği



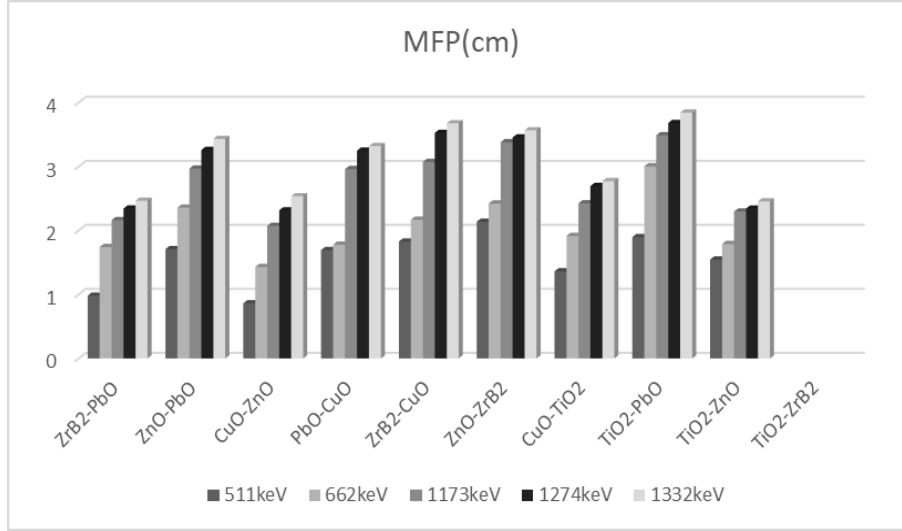
Şekil 3.71. PbO, CuO, ZnO, ZrB₂, TiO₂ kaplanmış cam numunelere ait yarıdeğer kalınlık grafiği



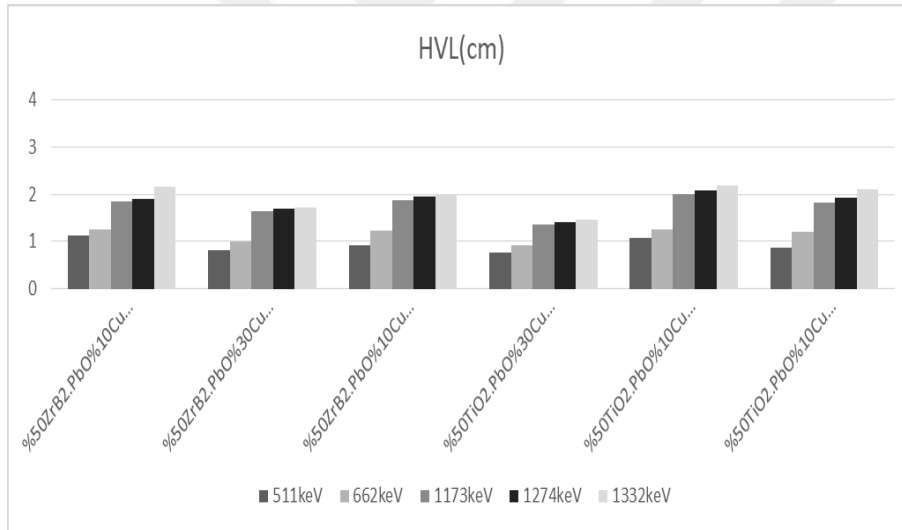
Şekil 3.72. PbO, CuO, ZnO, ZrB₂, TiO₂ kaplanmış cam numunelere ait ortalama serbest yol grafiği



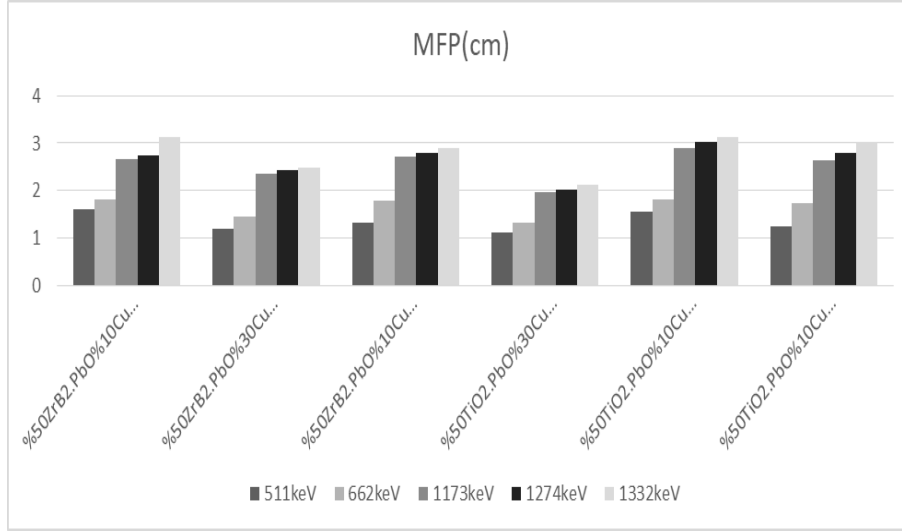
Şekil 3.73. Farklı oksitlerin %50 oranında alınmasıyla oluşturulan cam numunelere ait yarıdeğer kalınlık grafiği



Şekil 3.74. Farklı oksitlerin %50 oranında alınmasıyla oluşturulan ikili numunelere ait ortalama serbest yol grafiği



Şekil 3.75. %50ZrB₂.PbO ve %50TiO₂.PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış numunelere ait yarıdeğer kalınlık grafiği



Şekil 3.76. %50ZrB₂.PbO ve %50TiO₂.PbO ikili karışımları ile elde edilen beşli karışımla kaplanmış numunelere ait ortalama serbest yol grafiği

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Literatürde; Singh ve diğerleri (2014), Yue ve diğerleri (2013) ve Çeçen (2012) yapıldığı gibi birçok çalışmada deneysel veriler teorik veriler ile ve özellikle GEANT4 Monte carlo simülasyon program kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm çalışmalarda simülasyon uygulamasının deneysel veriler ile uyumlu olması çalışmamızı destekler niteliktedir. Ayrıca deneysel düzenekte kullanılan sintilasyon dedektörü doğal radyoaktivitenin cam kaplamada gama ışını absorpsiyonunu ortaya koyabilmek için geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Mostafa ve diğerleri (2017) WO_3 tabanlı olarak hazırladıkları $(100-x)(0,1B_2O_3-0,4P_2O_5PbO)-xWO_3$ oluşturdukları cam materyalinin γ -ışını için soğurma özelliklerini incelemişler, nokta kaynaktan yayınlanan γ -ışınlarına maruz bırakılan cam numuneleri NaI (TI) sintilasyon dedektörünü kullanarak ölçmüşlerdir. Hussein ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada; üçlü karışım olan lityum bizmut silikat cam bileşimine %2 PbO, BaO veya SrO (hepsi ağırlıkça % olarak alınmıştır) katkılayarak, NaI (TI) dedektörü ve Phy-X/PSD yazılımını kullanarak deneysel olarak ölçülen ve teorik olarak hesaplanan kütle zayıflama katsayısını hesaplayarak uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu tez çalışmasında; PbO, ZrB₂, ZnO, CuO, TiO₂, %50ZrB₂.%50PbO, %50ZnO.%50PbO, %50CuO.%50ZnO, %50PbO.%50CuO, %50ZrB₂.%50CuO, %50ZnO.%50ZrB₂, %50CuO.%50TiO₂, %50TiO₂.%50PbO, %50TiO₂.%50ZnO, %50TiO₂.%50ZrB₂, %50ZrB₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂, %50ZrB₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂, %50ZrB₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂, %50TiO₂.PbO%30CuO%10ZnO%10TiO₂, %50TiO₂.PbO%10CuO%30ZnO%10TiO₂, %50TiO₂.PbO%10CuO%10ZnO%30TiO₂ oranlarında karıştırılan malzemeler ince film şeklinde cam numune üzerine kaplanmıştır. Hazırlanan numunelerin yoğunlukları 6,31 g/cm³'ten 5,08 g/cm³ aralığında değişen 21 metal-ağır metal oksit katkılı cam yapılarının gama radyasyon absorpsiyonu teorik ve deneysel olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmanın amacı; literatürde geniş alan kaplamış olan radyasyon absorpsiyonunda ince film kaplı camların değerlendirilmesidir. Bu amaçla elde edilen nano tozlar çözelti haline getirilerek sol-gel yöntemi ile cam materyaller kaplanmıştır. Hazırlanan her numunenin kütle soğurma katsayısı teorik olarak XCOM ve GATE/GEANT4' te yoğunluk değerleri ve kimyasal formüller karışım ve tekli kimyasallar için ayrı ayrı tanımlanarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda numunelerin radyasyon absorpsiyonu hazırlanmış olan deneysel düzenek ile NaI (TI) katkılı dedektör kullanılarak

noktasal gama kaynakları Na-22 (511keV, 1274keV), Cs-137 (662keV) ve Co-60 (1173keV, 1332keV) ile ölçümler alınmıştır.

Şekil 3.5- Şekil 3.9'da PbO, ZnO, CuO, TiO₂, ZrB₂ bileşiklerine ait lineer soğurma katsayıları verilmiştir. Lineer zayıflatma katsayısı (LAC (μ)); malzeme yüzeyine gelen enerjinin birim kalınlıkta zayıflatılma oranını veren katsayıdır. Bu katsayı gelen ışının enerjisine, içinden geçtiği hedef maddenin kalınlığına, hedef maddenin atom numarasına ve yoğunluğuna bağlıdır. İncelenen cam örneklerinin her birinde enerji değeri arttıkça LAC değerlerinde azalma gözlenmektedir.

Çizelge 3.4, 3.5 ve 3.6' da XCOM bulguları, deneysel veriler ve GATE bulguları verilmektedir. Yapılan çalışmada teorik ve deneysel veriler uyumlu görülmektedir. Özellikle PbO' e ait lineer soğurma katsayısının değeri sırasıyla XCOM, Deneysel yöntem, Gate için 1,4409, 1,0449, 1,4403 cm⁻¹ olarak elde edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar birbiri ile uyum içindedir. 511 keV için 1,4409 cm⁻¹ lineer soğurma katsayısı enerjinin artması ile azalarak 0,5344 cm⁻¹ değerine düşmektedir. Bu durum her materyal için geçerli olup foton madde etkileşimi ile açıklanabilmektedir. Düşük enerjilerde Fotoelektrik etki söz konusu iken enerji yükseldikçe Compton olayı gerçekleşmektedir. Elde edilen soğurma özelliklerine bakıldığında en yüksek soğurma özelliği PbO' da izlenmiştir.

%50 oranında alınmasıyla oluşturulan karışımların soğurma özelliklerine bakıldığında PbO' e ZnO katkısı sonrası PbO'nun 511 keV'de değeri çok fazla değiştirmezken 662 keV'de soğurma katsayılarının düştüğü görülmektedir. Diğer taraftan PbO'e CuO katkısı soğurma özelliğini anlamlı olarak artırmıştır. İkili oluşturulan karışımlarda en yüksek soğurma özelliği %50PbO.%50CuO 'ya aittir. μ değeri tüm hesaplamalarda en yüksek değeri vermektedir.

%50 ZrB₂.PbO ikili karışımı ile oluşturulan beşli karışımda en yüksek soğurma özelliği %30CuO.%10ZnO.%10TiO₂'ye ait olup μ değeri 511 keV'de 0,83 cm⁻¹ olarak elde edilmiştir. Yine enerjinin artması ile bu değer 0,40 cm⁻¹ düşmektedir.

%50 TiO₂.PbO ikilisine farklı olarak yapılan katkılı karışımda μ değeri en yüksek değerini %30CuO%10ZnO%10ZrB₂ 'de vererek bu değer 511 keV 'de 0,89 cm⁻¹ olarak elde

edilmiştir. Enerjinin 1332 keV 'e yükselmesi ile lineer soğurma katsayısı $0,47 \text{ cm}^{-1}$ 'e düşmektedir.

Teorik ve deneysel lineer soğurma değerleri Şekil 3.5- Şekil 3.17'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Şekil 3.24-3.28 numaralı şekillerde yarıdeğer kalınlık (HVL) değerleri verilmiştir. Şekil 3.45-3.46'e kadar çizilen ortalama serbest yol (MFP) değerlerine ait teorik hesaplamalar verilmiştir. Bir malzeme üzerine gelen radyasyonun, malzeme içerisinde gerçekleştireceği temel etkileşimlere bağlı olarak malzeme içerisinde geçen fotonun, gerçekleştireceği iki etkileşim arasında ortalama olarak ne kadar yol kat ettiğini belirleyebilmemizi sağlayan parametre ortalama serbest yoldur (MFP). Bir hedeften geçen radyasyon şiddetinin, hedefe gelen radyasyon şiddetinin yarısına düşebilmesi için gereken malzeme kalınlığı yarı değer kalınlık (HVL) olarak verilmektedir.

Elde edilen verilere göre en yüksek HVL ve MFP değeri 1332 keV'de TiO_2 'te izlenmektedir. İkili karışımlara ait en yüksek HVL, MFP değeri $\text{TiO}_2\text{-PbO}$ karışımında görülmektedir. En yüksek HVL, MFP değerinin $\%50\text{ZrB}_2\text{-PbO}$ ikilisine $\%10\text{CuO}\%10\text{ZnO}\%30\text{TiO}_2$ katkılanması sonucu oluşan karışımda olduğu görülmektedir. Enerji değeri arttıkça malzemenin gelen radyasyon şiddetini yarı değerine düşürdüğü kalınlık değerleri ne kadar düşük değerde olursa, malzeme o kadar yüksek oranda radyasyonu bünyesinde sönümleyecektir. Yarıdeğer kalınlık arttıkça radyasyon absorpsiyonu azalmaktadır. Aynı zamanda ortalama serbest yol malzeme içinde kat ettiği yolu gösterdiği gibi MFP değerinin artması radyasyon sönümlemesinin azaldığını ifade etmektedir.

Çalışma sonucunda soğurma özelliği en yüksek olan tekli kimyasal PbO, ikili karışımlarda $\%50\text{PbO}\%50\text{CuO}$, beşli karışımlarda $\%50\text{TiO}_2\text{PbO}.\%30\text{CuO}\%10\text{ZnO}\%10\text{ZrB}_2$ olarak bulunmuştur. Özellikle PbO'e yapılan katkılar literatürde alternatif zırh malzemesi arayışına katkı sağlayacaktır. PbO'e alternatif daha hafif ve daha az toksik zırh malzemesi üretilmektedir. Elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar PbO katkısı ile soğurma özelliğinin yükseldiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Abou Hussein, E. M., Madbouly, A. M. and El Alaily, N. A. (2021). Gamma ray interaction of optical, chemical, physical behavior of bismuth silicate glasses and their radiation shielding proficiency using Phy-X/PSD program. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 570, 121021.
- Abouhaswa, A. S., Alsaif, N. A., Al-Ghamdi, H., El-Hamalawy, A. A. and Rammah, Y. S. (2023). The impact of SrO on borophosphate glasses: synthesis, structure, optical properties as well as gamma-ray shielding performance. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(6), 478.
- Ahn, J., Carson, C., Jensen, M., Juraku, K., Nagasaki, S. and Tanaka, S. (2015). Reflections on the Fukushima Daiichi nuclear accident: Toward social-scientific literacy and engineering resilience (p. 454). Springer Nature.
- Akçaalan, U. (2015). Farklı maddelerle katkılanmış beton malzemenin gama soğurma katsayılarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Akkurt, I., Akyıldırım H., Mavi B., Kilincarslan S. and Basyigit C. (2010). Photon Attenuation Coefficients of Concrete Includes Barite in Different Rate. *Annals of Nuclear Energy* 37(7):910–14.
- Akman, F., Sayyed, M. I., Kaçal, M. R. and Tekin, H. O. (2018). 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.
- Akyıldırım, H. (2011). Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 95s, Isparta.
- Aladailah, M. W., Abdelmunem, E. M., Marashdeh, M. W. and Tashlykov, O. L. (2023). Role of GeO₂ on enhancing the shielding properties of phosphate and borate-phosphate glasses. *Bulletin of Materials Science*, 46(1), 1-10.

- Alajerami, Y. S. (2021). Radiation Shielding Properties for NaO–CdO–Bi₂O₃–B₂O₃ Glasses Using XCOM, Phy-X/PSD and Srim Programs. *Glass Physics and Chemistry*, 47 (Suppl 1), S10-S20.
- Al-Buriahi, M. S. and Rammah, Y. S. (2019). Investigation of the physical properties and gamma-ray shielding capability of borate glasses containing PbO, Al₂O₃ and Na₂O. *Applied Physics A*, 125, 1-8.
- Aldhuhaibat, M. J., Farhan, H. S., Hassani, R. H., Tuma, H. M., Bakhtiar, H. and Salim, A. (2022). Gamma photons attenuation features of PbO-doped borosilicate glasses: a comparative evaluation. *Applied Physics A*, 128 (12), 1058.
- Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M.I. and Demir, L. (2020). Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I, *Radiat. Phys. Chem.*, 166, 108455.
- Aloraini, D. A., Sayyed, M. I., Jecong, J. F. M., Kumar, A., Elbashir, B. O., Almuqrin, A. A. and Yasmin, S. (2022). Structural and gamma ray shielding behavior of dual heavy metal oxide doped magnesium sodium borate glasses. *Optik*, 268, 169771.
- Alzahrani, J. S., Kavas, T., Kurtulus, R., Olarinoye, I. O. and Al-Buriahi, M. S. (2021). Physical, structural, mechanical, and radiation shielding properties of the PbO–B₂O₃–Bi₂O₃–ZnO glass system. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(14), 18994-19009.
- Aral, İ. (2019). Alumina Ve Zirkonya Esaslı Seramiklerin Nükleer Zırhlama Kabiliyetlerinin MCNP-X Kodu İle Araştırılması. Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Aygün, B., Şakar, E., Korkut, T., Sayyed, M.I., Karabulut, A. and Zaid, M.H.M. (2019). Fabrication of Ni, Cr, W reinforced new high alloyed stainless steels for radiation shielding applications. *Results in Physics*, 12, 1-6.
- Bagheri, R., Maghaddam, A.K. and Yousefnia, H. (2017). Gamma ray shielding study of Barium-Bismuth-Borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCom program and available experimental data. *Nuclear Engineering and Technology*, 49, 216-223.

- Bakırhan, E. (2017). Kurşun maden atığı katkılı ağır betonların radyasyon soğurma katsayılarının 662-1460 Kev enerji aralığında incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Ballsieper, B. (2006). Radiation protection material based on silicone. United States Patent Application Publication; No: US 2006/0217477 A1.
- Baştuğ, A., İçelli, O., Gürol, A. and Şahin, Y. (2011). Photon Energy Absorption Parameters for Composite Mixtures with Boron Compounds, *Annals of Nuclear Energy* 38, 2283-2290.
- Bektasoglu, M. and Mohammad, M. A. (2020). Investigation of radiation shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glasses at medical diagnostic energies. *Ceramics International*, 46(10), 16217-16223.
- Buyuk, B. and Tugrul, A. B. (2014). An investigation on gamma attenuation behaviour of titanium diboride reinforced boron carbide-silicon carbide composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 97, 354-359.
- Can, Ö. (2016). İyonlaştırıcı elektromanyetik radyasyonun tutulması için polimer esaslı tungsten (volfram) tuzları katkılı yeni kompozit madde sentezi, karakterizasyonu ve deneme çalışmaları. Yüksek lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- Chang, K-H., Wonho L., Dong-Myung C., Choon-Sik L. and Youhyun K. (2009). Dose Reduction In Ct Using Bismuth Shielding: Measurements And Monte Carlo Simulations Department of Radiologic Science, Korea University, Seoul, Korea Department of Nuclear and Radiological Engineering, University of Florida, Gainesville, USA.
- Chen, S., Bourham, M. and Rabiei, A. (2014). Novel light-weight materials for shielding gamma ray. *Radiation Physics and Chemistry*, 96, 27-37.
- Chilton, A. B. and Shultis J.K. (1984). *RE of Radiation Protection* Prentice Hall Inc, Eski Tappan, NJ (1984).
- Çeçen, R. (2012). Pomza taşının radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılması. Yüksek lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.

- Demir, F. (2009). Bor ve barit agregalı ağır betonların nötron parçacıkları, x ve γ ışınları için radyasyon soğurganlıklarının belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Demir, F. (2010). Determination of mass attenuation coefficients of some boron ores at 59.54 keV by using scintillation detector, *Applied Radiation and Isotopes*, 68, 175–179.
- Demirel, İ. (2019). Mamografik, Tanısal ve Endüstriyel X- Ve Gama Enerji Aralıklarında Kullanım İçin Epoksi Matrise Yüksek Z'li Kimyasal Toz Katkılanarak Yeni Bir Zırh Malzemesi Geliştirilmesi ve Foton Zayıflatma Özelliklerinin Standart Demet Kalitelerinde İyon Odası Yöntemiyle Belirlenmesi. Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Dheyaa, BM., Jassim WH. and Hameed, NA. (2018). Evaluation of epoxy/antimony trioxide nanocomposites as flame retardant. *J. Phys. Conf.* , 1003 (1) , s. P012078.
- Dodoo-Amoo, D.N.A., Landsberger, S., MacDonald, J.M. and Castro, J.M. (2003) Development of composite materials for non-lead gloves for use in radiological hand protection. *Health Phys*, 84: 737-746.
- Eder, H, Panzer, W. and Schöfer, H. (2005). Is the lead-equivalent suited for rating protection properties of lead-free radiation protective clothing? *Medizinphysik und Technik Fortschr Röntgenstr*, 177: 399-404.
- Eder, H., Schlattl, H. and Hoeschen, C. (2010). X-Ray Protective Clothing: Does DIN 6857-1 Allow an Objective Comparison Between Lead-Free and Lead Composite Materials? *RöFo-Fortschritte Auf Dem Gebiet Der Röntgenstrahlen Und Der Bildgebenden Verfahren*, 182(05), 422-428.
- Elsaman, R., Issa S. A., Tekin H. O., Susoy G., Showahy A. A., Elokr M. M., ... and Saddeek Y. B. (2020). (59.5–x) P_2O_5 –30 Na_2O –10 Al_2O_3 –0.5 CoO –x Nd_2O_3 glassy system: an experimental investigation on structural and gamma-ray shielding properties. *Applied Physics A*, 126, 1-13.
- Ermiş, Ş. (2014). X veya γ Işını Soğuran Camların Etkin Atom ve Elektron Numaralarının Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- Ersundu, A.E., Büyükyıldız, M., Ersundu, M.Ç., Şakar, E. and Kurudirek, M. (2018). The heavy metal oxide glasses with in the WO_3 - MoO_3 - TeO_2 system to investigate the shielding properties of radition applications. *Progress in Nuclear Energy*, 104, 280-287.
- Fan, G.H., Geng, L., Wang, G.S. and Zheng, Z.Z. (2009). A Novel Radiation Protection Material: $BaPbO_3$ /Al Composite, *Materials And Design*, 30, 862-868.
- Fujiwara, T., Mitsuya, Y., Fushie, T., Murata, K., Kawamura, A., Koishikawa, A., ... and Takahashi, H. (2017). Gas scintillation glass GEM detector for high-resolution X-ray imaging and CT. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 850, 7-11.
- Grupen, C. and Buvat, I. (2011). Handbook of particle detection and imaging. Springer Science and Business Media. *Gamma Spectroscopy with a Scintillation Detector and Multichannel Analyzer"* (PDF). American University in Bulgaria. Erişim Tarihi: 17 Nisan 2023.
- Güler, C. and Çobanoğlu, Z. (1994). Elektromanyetik Radyasyon Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi, 32: 28-11.
- Günoğlu, K. (2012). Türkiye'deki Bazı Doğal Taşların Radyoaktivite Tayini ve Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 96s, Isparta.
- Han, I., Demir, L. and Sahin, M. (2009). Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for some natural minerals *Radiation Physics and Chemistry* 78, 760–764.
- Hubbell, J. H. (1982). Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 33.11: 1269-1290.
- Hubbell, J. H. (2006). Electron–positron pair production by photons: A historical overview. *Radiation Physics and Chemistry* 75, 614–623.
- Hubbell, J. H., Veigele, W., Briggs, E. A., Brown, R. T., Cromer, D. T., Howenon, R. J. (1975). Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections., *J. Phys. Chern. Ref. Data*, Vol. 4, No. 3, 1975
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection .(Erişim Tarihi: 02.10.2023)

ICRU Report 31, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair, "International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC, 1979. (Erişim Tarihi: 02.10.2023)

Issa, S., Issa S., Tekin, H.O., Elsaman, R., Kilicoglu, O., Saddeek, Y.B. and Sayyed, M.I. (2019). Radiation shielding and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{OB}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ glasses using MCNPX Monte Carlo Code. Materials Chemistry and Physics, 223, 209-219.

Issa, S. A., Kumar, A., Sayyed, M. I., Dong, M. G., & Elmahroug, Y. (2018). Mechanical and gamma-ray shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-NiO}$ glasses. Materials Chemistry and Physics, 212, 12-20.

Issa, S., Saddeek, Y.B., Tekin, H.O., Sayyed, M.I. and Shaaban, K. (2018). Monte Carlo yöntemi kullanılarak $\text{PbO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ camların radyasyon koruma ve elastik özelliklerinin araştırılması. Curr. Appl.Phys., 18, 717-727.

İnternet 1 URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2> (Erişim tarihi:20.07.2022)

İnternet 2 URL: https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan_korunma. (Erişim Tarihi: 29.07.2022)

İnternet 3 URL: http://fizz.phys.dal.ca/files/25-Radiation_Detection&Measurement_I.ppt. (Erişim Tarihi: 20.07.2023)

İnternet 4 URL: http://www.physics.isu.edu/radinf/detect_or1.htm. (Erişim Tarihi: 20.07.2023)

İnternet 5 URL: http://besergil.cbu.edu.tr/2_iyon_dedektorleri.pdf. (Erişim Tarihi: 20.07.2023)

İnternet 6 URL: <http://scientificsentence.net/PhysMeas/index.php?keyyes&IntegerGeiger>. (Erişim Tarihi: 20.07.2023)

İnternet 7 URL: http://nsspi-apps.ne.tamu.edu/NSEP/basic_rad_detection/index?course=040203. (Erişim Tarihi: 20.07.2023)

http://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum4_03.html. (Erişim Tarihi: 30.03.2019)

İnternet 8 URL: Industrial Laser Applications." Industrial Laser Solutions. <https://www.industrialasers.com/home/article/16487463/industrial-laser-applications> (Erişim Tarihi: 02.10.2023)

İnternet 9 URL: Laser Applications." SPIE- The International Society for Optics and Photonics. <https://www.spie.org/about-spie/advocacy/laser-applications>. (Erişim Tarihi: 02.10.2023)

İnternet 10 URL: <https://www.jstor.org/stable/26459025>. (Erişim Tarihi: 02.10.2023)

Jackson, D.F. and Hawkes, D.J. (1981). X-Ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures. *Phys Rep* 70, 169-233.

Jaeger, R.G., Blizard, E.P., Chilton, A.B., Grotenhuis, M., Hönig, A., Jaeger, T.A. and Eisenlohr, H. (1968). *Engineering Compendium on Radiation Shielding*. Springer-Verlag, 537 s., New York

Jalali, M. and Mohammadi, A. (2008). Gamma ray attenuation measurement for neutron-absorbent materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 77, 523-527.

Kaewjaeng, S., Kaewkhao, J., Limsuwan, P. and Maghanemi, U. (2012). Effect of BaO on optical, physical and radiation shielding properties of $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ glasses system. *Procedia Engineering*, 32: 1080-1086.

Kamal, M., Moharam, B. M., Farag, H. I., El-Bediwi, Shosha A., Hany, A. and Aboshieasha, H. F. (2011). Newton's metal as a new home-made shielding material. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 53-57.

Kaundal, R.S., Kaur, S., Singh, N. and Singh, K.J. (2010). Investigation of structural properties of lead strontium borate glasses for gamma-ray shielding applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, 1191-1195.

Kirdsiri, K., Kaewkhao, J., Pokaipisit, A., Chewpraditkul, W. and Limsuwan, P. (2009). Gamma-rays shielding properties of $x\text{PbO}:(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$ glasses system at 662 KeV. *Annals of Nuclear Energy*, 36, 1360-1365.

Knoll, G.F. (1999). *Radiation Detectibn and Measurement Third Edition*, John Wiley and Sons, Michigan.

Knoll, A. H., Canfield, D. E., & Konhauser, K. O. (Eds.). (2012). *Fundamentals of geobiology*. John Wiley & Sons.

Korkut, T., Korkut, H., Karabulut, A. and Budak, G. (2011). A New Radiation Shielding Material: Amethyst ore, *Annals of Nuclear Energy* 38, 56-59.

Krane, S.K. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley and Sons, 404 s, New York

- Lakshminarayana, G., Baki, S.O., Kaky, K.M., Sayyed, M.I., Tekin, H.O., Lira, A., Kityk, I.V. and Mahdi, M.A. (2017). Investigation of structural, thermal properties and shielding parameters for multicomponent borate glasses for gamma and neutron radiation shielding applications. *Journal of Non-Crystalline solids*, 471, 222-237.
- Liu, J.H., Zhang, Q.P., Sun, N., Zhao, Y., Shi, R. and Zhao, Y.L. (2018). Elevated gamma-rays shielding property in lead-free bismuth tungstate by nanofabricating structures. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 112, 185-189.
- Maghrabi, AH., Vijayan, A. and Deb, P. (2015). Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray Shielding, *Textile Research Journal*.
- Maghrabi, H. A., Vijayan, A., Deb, P. and Wang, L. (2016) Bismuth Oxide-Coated Fabrics for X-Ray Shielding. *Textile Research Journal*, 86(6), 649-658.
- 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.
- Manninen, A. L. (2014). Clinical applications of radiophotoluminescence (RPL) dosimetry in evaluation of patient radiation exposure in radiology: determination of absorbed and effective dose.
- Michael, F. (2003). L'annunziata in *Handbook of Radioactivity Analysis* (Second Edition).
- Mkhaiber, A. F. and Dheyaa, A. (2018). Experimental study of some shielding parameters for composite shields. *Journal of Physics: Conference Series*, 1003, 012109.
- Mortazavi, S.M.J., Mosleh-Shirazi, M.A., Roshan-Shomal, P., Raadpey, N. and Baradaran-Ghahfarokhi, M. (2010). High-performance Heavy Concrete as a Multi-Purpose Shield. *Radiation Protection Dosimetry*, 142 (2-4), 120-124.
- Mostafa, A.M.A., Issa, S.A.M. and Sayyed, M.I. (2017). Gamma ray shielding properties of $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ doped with WO_3 . *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 294-300.
- Ni, M., Tang, X., Chai, H., Zhang, Y., Chen, T. and Chen, D. (2016). Preparation and Properties of the Fast-Curing γ -Ray-Shielding Materials Based on Polyurethane. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(6).

- Omer, M. and Hajima, R. (2018). Geant4 Physics Process for Elastic Scattering of γ -Rays. Technical report, Japan Atomic Energy Agency.
- Oto, B., Yıldız, N., Akdemir, F. and Kavaz, E. (2015). Investigation of gamma radiation shielding properties of various ores. *Progress in Nuclear Energy*, 85(2015)391-403.
- Qu, L., Mingwei T., Xiansheng, Z., Xiaoqing, G., Shifeng, Z., Guangting, H. and Changlei, L. (2015). Barium sulfate/ regenerated cellulose composite fiber with X-ray radiation resistance *Journal of Industrial Textiles*, 45(3), 352–367.
- Rahimi, A. R., Raisali, G., Sadrnezhaad, S. K. and Alipour, A. (2009). Chemical Corrosion and Gamma-Ray Attenuation Properties of Zr And Ti Containing Lead Silicate Glasses, *Journal of Nuclear Materials* 385, 527-532.
- Sakurai, Y., Sasaki, A. and Kobayashi, T. (2004). Development of neutron shielding material using metathesis-polymer matrix. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 522, 455-461.
- Saudi, H. A., Mostafa, A. G., Sheta, N., El Kameesy, S. U. and Sallam, H. A. (2011). The Structural Properties of CdO-Bi₂O₃ Borophosphate Glass System Containing Fe₂O₃ and Its Role in Attenuating Neutrons and Gamma Rays, *Physica B* 406, 4001-400.
- Sayyed, M. I., Tekin, H.O., Kılıcoglu, O., Agar, O. and Zaid, M.H.M. (2018). Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: Comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results. *Results in Physics*, 1140-45.
- Sayyed, M. I., Kurtulus, R., Balderas, C. V., Kavas, T. and Almuqrin, A. H. (2021). X-ray shielding behavior of TeO₂-Li₂O-GeO₂-ZnO-Bi₂O₃ glass system using EPICS2017 library and Phy-X software. *Applied Physics A*, 127, 1-7.
- Sayyed, M. I., Askin, A., Zaid, M. H. M., Olukotun, S. F., Khandaker, M. U., Tishkevich, D. I. and Bradley, D. A. (2021-a). Radiation shielding and mechanical properties of Bi₂O₃-Na₂O-TiO₂-ZnO-TeO₂ glass system. *Radiation Physics and Chemistry*, 186, 109556.
- Sayyed, M. I., Al-Hadeethi, Y., AlShammari, M. M., Ahmed, M., Al-Heniti, S. H. and Rammah, Y.S. (2021-b). Physical, optical and gamma radiation shielding competence of newly boro-tellurite based glasses: TeO₂-B₂O₃-ZnO-Li₂O₃-Bi₂O₃. *Ceramics International*, 47(1), 611-618.

- Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., Kurtulus, R., Javier-Hila, A. M. V., Kaky, K. and Kavas, T. (2021-c). X-ray shielding characteristics of $P_2O_5-Nb_2O_5$ glass doped with Bi_2O_3 by using EPICS2017 and Phy-X/PSD. *Applied Physics A*, 127, 1-8.
- Schlattl, H., Zankl, M., Eder, H. and Hoeschen, C. (2007). Shielding properties of lead free protective clothing and their impact on radiation doses *Medical physics*; 34: 4270 - 4280-Wiley Online Library.
- Schmid, E., Panzer W., Schlattland H. and Eder H. (2012). Emission of fluorescent x-radiation from non-lead based shielding materials of protective clothing: a radiobiological problem? *J. Radiol. Prot.* 32, N129–N139.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, G., Gerward, L., Khanna, A., Kumar, R., Nathuram, R. and Sahota, H.S. (2005). Gamma-ray shielding properties of $CaO-SrO-B_2O_3$ glasses. *Radiat. Phys. Chem.* 72, 225–228.
- Singh, V. P., Medhat, M. E. and Shirmardi, S. P. (2014). Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM and experimantel results. *Radiation Physics and Chemistry*, 106, 255-260.
- Standford University Radiation Safety Manual (2015) Environmental Health and Safety, Standford University, Standford California. (Erişim Tarihi: 02.10.2023)
- Şişman, G. (2015). Monte Carlo simülasyonu ile radyasyondan koruyucu malzemelerde kullanılabilen Bizmut, Kurşun ve alternatif kompozit malzemelerin atenüasyon etkilerinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Uo, M., Wada, T. and Sugiyama, T. (2015). Applications of X-ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Japanese Dental Science Review*, 51(1), 2-9.
- Wu, Y., Zhang, Q.P., Zhou, D., Zhou, Y.L. and Zheng, J. (2017). Controlled synthesis of anisotropic lead borate crystals and its co-shielding of neutron and gamma raditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 1027-1035.
- Wulandari, L., Idroes, R., Noviandy, T. R. and Indrayanto, G. (2022). Application of chemometrics using direct spectroscopic methods as a QC tool in pharmaceutical industry and their validation. *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*, 47, 327-379.

- Yaramış, B. (1985). Nükleer Fizik. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, 258, İstanbul.
- Yue, K., Yao, Y., Luo, W. and Dong, X. (2013). A Novel Shielding Scheme Studied By The Monte Carlo Method For Electron Beam Radiotherapy, Health Phys. 104(3):277-281.
- Yülek, G.G. (1992). Radyasyon Fiziği. SEK Yayınları No:14, 198s. Ankara.
- Zoulfakar, AM., Abdel-Ghany, A.M., Abou-Elnasr, T.Z., Mostafa, A.G., Salem, S.M. and ElBahnaswy, H.H. (2017). Antimon oksidin bazı sodyum boro-silikat camların ekranlama özelliklerine etkisi Appl. Radiat. Isot., 127, 269-274.



ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Arzu COŞKUN

Öğrenim Durumu:

Derece	Öğrenim Alanı	Üniversite	Fakülte/Enstitü	Yıl
Önlisans	Optisyenlik	Amasya Üniversitesi	Sağlık Meslek Yüksekokulu	2016
Y. Lisans	Nükleer Fizik	Amasya Üniversitesi	Fen Bilimleri Enstitüsü	2015
Önlisans	İş Sağlığı ve Güvenliği	Atatürk Üniversitesi	Meslek Yüksekokulu	2015
İş Güvenliği Uzmanı	C Sınıfı	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı	Uzmanlık Eğitimi	2014
Pedagojik formasyon		Amasya Üniversitesi	Eğitim Fakültesi	2013
Lisans	Fizik	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Fen Edebiyat Fakültesi	2001
Önlisans	Radyoloji	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Sağlık Meslek Yüksekokulu	1997

Yüksek Lisans Tez Başlığı ve Tez Danışmanı: Radyoloji Bölümlerinin Radyasyon Doz Dağılımlarının İncelenmesi- Doç. Dr. Betül MAVİ

Eserler

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Coskun Arzu, Çetin Betül (2016). Measurement of the Radioactivity of Tc-99m Radio pharmaceuticals. IJNuRaSaT (Yayın No: 6520199)
2. Coskun Arzu, Çetin Betül (2016). Determination of the Natural Radioactivity Level of Amasya Seyhçui Region. Acta Physica Polonica A, 130(1), 309-310. (Yayın No: 6519898)
3. Coskun Arzu, Çetin Betül (2015). Investigation of External Radiation Dose Changes in Some Xray Applications. Acta Physica Polonica A, 128, 365-367. (Yayın No: 6519828)

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. Coskun Arzu, Yığıtöglü İbrahim (2015). Measurement of the Radioactivity of Tc-99m Radiopharmaceuticals. 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2015), 14-19 Ekim, Antalya-Türkiye (Tam Metin Bildiri/Poster) (Yayın No:6524683)
2. Coskun Arzu, Çetin Betül (2014). Natural Radioactivity Concentrations in Soil Samples Along The Boraboy Lake in Amasya-Turkey, (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:6524800)
3. Coskun Arzu, Çetin Betül (2014). Gamma ray Shielding of Paint Contains PSA, SA and Pig in Different Rate, International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (Tam Metin Bildiri/Poster) (Yayın No:6524824)

C. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Coskun Arzu, Çetin Betül (2023). The Effect of Lead Oxide on the Change in Gamma Ray Protection Parameters of Bismuth Oxide. European Journal of Science and Technology, Doi: 10.31590/ejosat.1234613 (Kontrol No: 8348096)

2. Coskun Arzu, Kayserili Aydan, Aksak Tıne (2022). Evaluation of digital healthcare services and satisfaction level of outpatients at the City Training and Research Hospital in Turkey during Covid-19 pandemic. Journal of International Health Sciences and Management, 48-57. (Yayın No: 7680907). Journal of International Health Sciences and Management, 8(15)-57., Doi: 10.48121/jihsam.994617 (Kontrol No: 7846586)
3. Coskun Arzu, Yığıtöglü İbrahim (2020). Measurement of Radiation Dose Emitted by $4 \times 4 \text{ cm}^2$ and cm^2 Aperture of Linear Accelerator. Journal of New Theory (Kontrol No: 6524961)
4. Coskun Arzu, Yığıtöglü İbrahim, etin Betöl, Gökbulut Melek, Demır Fadıme (2020). Examination of 99m Tc-MDP Radioactivity After Injection According to Time and Distance. Cumhuriyet Science Journal e- ISSN:2587-246X (Kontrol No: 7846624)

D.Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Coskun Arzu, etin Betöl, Yığıtöglü İbrahim (2020). Measurement of Radiation Dose Emitted by 4 cm^2 and $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Aperture of Linear Accelerator. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:6524860)
3. Yığıtöglü İbrahim, etin Betöl, Coskun Arzu (2020). The Variation of Tc-99m Radioactivity, Respect to Distance After Injection. (Tam Metin)
4. Coskun Arzu, etin Betöl (2015). 1.Coskun, A., Mavi, B., 2015. Determination of the Natural Radioactivity Level of Amasya Seyhcuı Region. 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESN 2015), 14-19 Ekim, Antalya-Türkiye. (Tam Metin Bildiri/Poster)
5. Coskun Arzu, etin Betöl (2015). Radyofarmasötiklerden Yayılan Radyasyonun Zamana ve Mesafeye Bağlı Değişiminin İncelenmesi, XV. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, 2015. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:6524774)
6. Coskun Arzu, etin Betöl (2015). Radyolojik işlemler Sırasında Maruz Kalınan External Radyasyon Doz Oranının Belirlenmesi, XV. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, 2015. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:6524733)
7. Coskun Arzu, etin Betöl (2014). Determination of Some Hematological Parameters of the Radiology Workers, International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering. (Tam Metin Bildiri/Poster) (Yayın No:6524815)

Diger Yayınlar

1. Coskun Arzu, Çetin Betül, Gökbulut Melek, Yığıtöglu İbrahim (2020). The Variation of Tc-99mRadioactivity, Respect to Distance After Injection. Türkiye Bilimsel Arastirmalar Dergisi, (Makale Özgün Makale) (Yayın No:7846637)

Sertifika

1. Is Güvenligi Uzmanı, C Sınıfı Uzman, Okyanus Eğitim Hizmetleri, Sertifika, 15.10.2015-15.11.2015 (Ulusal)
2. Ohsas 18001 Occupational Health And Safety Management System Basic Training (Süleyman Demirel Üniversitesi)
3. ISO 9001:2008 Kalite Yönetim Sistemi Eğitimi Başarı Sertifikası (Süleyman Demirel Üniversitesi)
4. ISO 9001: 2008 İç Tetkikçi Eğitimi Başarı Sertifikası (Süleyman Demirel Üniversitesi)
5. Ohsas 18001 Is Sağlığı ve Güvenligi Eğitimi Başarı Sertifikası (Süleyman Demirel Üniversitesi)
6. ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi Eğitimi Başarı Sertifikası (Süleyman Demirel Üniversitesi)
7. Uygulamalı Radyofarmasi Kursu, Uygulamalı Radyofarmasi Kursu, Ege Üniversitesi, Sertifika, 05.09.2014-08.09.2014 (Ulusal)
8. Formasyon, Pedogojik formasyon, Amasya Üniversitesi, Sertifika, 04.09.2012-04.09.2013 (Ulusal)

Kongre Düzenleme

1. Sağlıklı Yasam ve Obezite Farkındalık Kongresi, Sağlıklı yaşamak için düzenli beslenme ve egzersizin önemi, Toros Üniversitesi 45 Evler Kampüsü, Kongre Düzenleme, 18.04.2022-18.04.2022 (Ulusal)
2. Ulusal Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokul Sempozyumu, Multidisipliner, Toros Üniversitesi 45 Evler Kampüsü, Kongre Düzenleme, 07.04.2022-08.04.2022 (Ulusal)
3. Uluslararası sağlık Hizmetleri Kongresi, Sempozyumu, Multidisipliner, Toros Üniversitesi 45 Evler Kampüsü, Kongre Düzenleme, 21-22 Kasım 2023 (Uluslararası)