

Tellür Oksit Tabanlı Bazı Oksiflorür Camların Sentezi ve Fiziksel, Optik, Radyasyon
Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi

Sezgin KOCA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Mayıs 2025

Synthesis and Determination of Physical, Optical, Radiation Shielding Properties of Some
Tellurium Oxide-Based Oxyfluoride Glasses

Sezgin KOCA

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

May 2025

Tellür Oksit Tabanlı Bazı Oksiflorür Camların Sentezi ve Fiziksel, Optik, Radyasyon
Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi

Sezgin KOCA

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KILIÇ

Mayıs 2025

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Sezgin KOCA** 'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “ Tellür Oksit Tabanlı Bazı Oksiflorür Camların Sentezi ve Fiziksel, Optik, Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan KILIÇ

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Gökhan KILIÇ

Üye: Doç. Dr. Duygu ŞEN BAYKAL

Üye: Doç. Dr. Erkan İLİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Gökhan KILIÇ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tellür Oksit Tabanlı Bazı Oksiflorür Camların Sentezi Ve Fiziksel, Optik, Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/05/2025

SEZGİN KOCA

İmza

ÖZET

İyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığı, çevre ve teknolojik sistemler üzerindeki olumsuz etkileri, güvenli ve sürdürülebilir zırhlama malzemelerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Kurşun, beton ve çelik gibi geleneksel materyaller toksik, ağır ve işlenmesi zor olmasından, çevre dostu ve şeffaf alternatifler önem kazanmıştır. Tellür oksit (TeO_2) esaslı camlar, yüksek yoğunluk, kimyasal kararlılık, optik şeffaflık ve modifiye edilebilirlikleriyle gama ve nötron radyasyonuna karşı etkili zırhlama sağlayarak medikal, nükleer ve fotonik uygulamalarda öne çıkmaktadır.

Bu tezde, TeO_2 - ZnO - ZnF_2 tabanlı oksiflorür camlara farklı oranlarda CeF_3 katkısı yapılarak hazırlanan numunelerin fiziksel, yapısal, optik ve radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Eritme-tavlama yöntemiyle sentezlenen camların yoğunluk ve molar hacmi belirlenmiş, XRD ile amorf yapıları doğrulanmıştır. UV-Vis spektroskopisiyle yapılan optik analizlerde, CeF_3 katkısının artmasıyla optik bant aralığı (E_g) değerleri azalmış ve katkı iyonlarının cam ağına katılımıyla yeni enerji seviyeleri oluşmuştur. Urbach enerjisi (E_u) değerlerindeki düşüş, cam matrisindeki yapısal düzensizliklerin azaldığını göstermiştir. Radyasyon zırhlama performansı, lineer zayıflatma katsayısı (LAC), kütle zayıflatma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (mfp), enerji yığılma faktörü (EBF) ve enerji soğurma yığılma faktörü (EABF) gibi parametreler üzerinden değerlendirilmiştir. CeF_3 katkısının bu parametrelerde genel olarak iyileştirici etkiler gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, CeF_3 katkılı TeO_2 - ZnO - ZnF_2 cam sistemlerinin; şeffaflık, modifiye edilebilirlik ve gelişmiş radyasyon zayıflatma performansı gibi özellikleri ile nükleer enerji sistemleri, medikal radyoloji, optoelektronik ve fotonik cihazlar gibi alanlarda şeffaf zırhlama malzemesi olarak kullanılmaya son derece uygun olduğu ortaya konmuştur. Özellikle %3 mol CeF_3 katkısına sahip olan TZC3 cam numunesi, tüm enerji aralıklarında gösterdiği üstün zırhlama parametreleri ile bu çalışma kapsamında en etkin radyasyon zırhlama performansını gösteren kompozisyon olarak öne çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: TeO_2 camları, oksiflorür cam, CeF_3 , optik bant aralığı, radyasyon zırhlama.

SUMMARY

The negative effects of ionizing radiation on human health, the environment, and technological systems are increasing the need for safe and sustainable shielding materials. Traditional materials such as lead, concrete, and steel are toxic, heavy, and difficult to process, making environmentally friendly and transparent alternatives increasingly important. Tellurium oxide (TeO_2) based glasses stand out in medical, nuclear, and photonic applications by providing effective shielding against gamma and neutron radiation with their high density, chemical stability, optical transparency, and modifiability.

In this thesis, the physical, structural, optical, and radiation shielding properties of samples prepared by adding different amounts of CeF_3 to TeO_2 - ZnO - ZnF_2 -based oxyfluoride glasses were investigated. The density and molar volume of the glasses synthesized by the melt-anneal method were determined, and their amorphous structures were confirmed by XRD. In the optical analyses conducted using UV-Vis spectroscopy, the optical band gap (E_g) values decreased with the increase in CeF_3 addition, and new energy levels were formed with the participation of the dopant ions in the glass network. The decrease in Urbach energy (E_u) values indicates a reduction in structural irregularities within the glass matrix. Radiation shielding performance has been evaluated through parameters such as linear attenuation coefficient (LAC), mass attenuation coefficient (MAC), half-value layer (HVL), mean free path (mfp), energy buildup factor (EBF), and energy absorption buildup factor (EABF). It has been determined that the addition of CeF_3 generally shows improving effects on these parameters.

In conclusion, it has been demonstrated that CeF_3 -doped TeO_2 - ZnO - ZnF_2 glass systems are highly suitable for use as transparent shielding materials in fields such as nuclear energy systems, medical radiology, optoelectronics, and photonic devices, due to their properties such as transparency, modifiability, and enhanced radiation attenuation performance. Especially, the TZC3 glass sample with 3 mol% CeF_3 addition has stood out as the composition showing the most effective radiation shielding performance in this study, with its superior shielding parameters across all energy ranges.

Keywords: TeO_2 glasses, oxyfluoride glass, CeF_3 , optical band gap, radiation shielding.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamda desteğini, tecrübesini ve bilgisini benden esirgemeyen, rehberliğiyle çalışmama büyük destek ve yön veren tez danışmanım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Gökhan KILIÇ’a içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de bana yardımcı olan, desteğini üstümden çekmeyen ve bana güç veren canım sevgilim Zehra ÜNAL’a sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve bu günlere gelmemde büyük emeği olan canım aileme teşekkür ederim.

Sezgin KOCA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Camlar.....	4
2.2. Cam Çeşitleri	5
2.2.1. Oksit Camlar	5
2.2.2. Oksit Olmayan Camlar	6
2.2.3. Metalik Camlar	6
2.3. Tellür Camlar	6
2.4. Radyasyon	9
2.4.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	10
2.4.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	13
2.5. Radyasyon Madde Etkileşimi	14
2.5.1. Fotoelektrik olay	16
2.5.2. Compton saçılması	17
2.5.3. Çift oluşumu	18
2.6. Radyasyon Zırhlama Materyalleri	18
2.7. Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Parametreleri	20

İÇİNDEKİLER

Sayfa

3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. TZCx Camların Sentezi	24
3.2. Sentez ve Ölçüm Cihazları	25
3.2.1. Yüksek Sıcaklık Fırını.....	25
3.2.2. Tavlama Fırını.....	27
3.2.3. Parlatma Cihazı	28
3.2.4. UV-Vis Spektrofotometre.....	29
3.2.5. Analitik Terazı	30
3.2.6. XRD cihazı	31
3.3. Karakterizasyon.....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Fiziksel ve Yapısal Özellikler	35
4.1.1. Yoğunluk ve Molar Hacim	35
4.1.2. XRD	37
4.2. Optik Özellikler	38
4.2.1. UV-Vis bölgede Geçirgenlik ve Absorpsiyon	38
4.2.2. Optik Bant Aralığı (E_g) ve Urbach enerjisi (E_u)	40
4.3. Radyasyon Zırhlama Özellikleri	42
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Kristal düzen ve amorf yapı.....	4
2.2. Tellür bazlı camlar içerisinde tellürün yapısal birimleri (a) TeO_4 (tbp), (b) TeO_{3+1} (bozulmuş tbp), (c) TeO_3 (tp)	7
2.3. Radyasyon kaynakları ve yüzdeleri	10
2.4. Elektromanyetik spektrum.....	12
2.5. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi.....	16
2.6. Compton saçılmasının şematik gösterimi.....	17
2.7. Çift Oluşumunun şematik gösterimi	18
3.1. TZCx cam numuneleri: (a) ham, (b) zımparalanmış ve parlatılmış halde	25
3.2. Yüksek sıcaklık fırını (1700°C)	26
3.3. Tavlama fırını (1100°C)	27
3.4. Zımparalama - parlatma cihazı	28
3.5. UV-Vis spektrofotometre	29
3.6. Analitik terazi	30
4.1. TZCx camlarının CeF_3 konsantrasyonuna bağlı yoğunluk ve molar hacim değişimi ..	35
4.2. TZCx camlarının X- Işını kırınımı (XRD) spektrumları.....	37
4.3. TZCx camlarının geçirgenlik - dalga boyu grafikleri	39
4.4. TZCx camlarının absorpsiyon / geçirgenlik- dalga boyu grafikleri.....	39
4.5. TZCx camlarına ait Tauc grafikleri.....	41
4.6. TZCx camlarının Urbach enerjilerini belirlemek için $\ln \alpha \sim h\nu$ grafikleri	41
4.7. TZCx numunelerine ait LAC – foton enerjisi değişimi grafiği	43
4.8. TZCx numunelerine ait MAC – foton enerjisi değişimi grafiği	44
4.9. TZCx numunelerine ait yarı değer kalınlığı – foton enerjisi değişimi grafiği.....	47
4.10. TZCx numunelerine ait onda değer kalınlığı – foton enerjisi değişimi grafiği	47
4.11. TZCx numunelerine ait ortalama serbest yol – foton enerjisi değişimi grafiği	49
4.12. TZCx numunelerine ait Z_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği.....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

4.13. TzCx numunelerine ait N_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği	52
4.14. TzCx numunelerine ait C_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği.....	54
4.15. TzCx numunelerine ait Z_{eq} – foton enerjisi değişimi grafiği	55
4.16. Tz için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları	58
4.17. TzC1 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.....	58
4.18. TzC2 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.....	59
4.19. TzC3 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.....	59
4.20. Tz için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları	60
4.21. TzC1 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.....	60
4.22. TzC2 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.....	61
4.23. TzC3 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

4.1. TZCx camların bileşenleri, yoğunluk, molar hacim ve kalınlık değerleri	36
4.2. TZCx camların optik bant aralıkları (E_g) ve Urbach parametreleri	42
4.3. Her bir numune için foton enerjisine karşılık MAC ve LAC değerleri	45
4.4. Her bir numune için foton enerjisine karşılık HVL ve TVL değerleri.....	48
4.5. Her bir numune için foton enerjisine karşılık MFP değerleri.....	50
4.6. Her bir numune için foton enerjisine karşılık Z_{eff} ve N_{eff} değerleri	53
4.7. Her bir numune için foton enerjisine karşılık C_{eff} ve Z_{eq} değerleri.....	56
4.8. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)	62
4.9. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)	63
4.10. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)	64
4.11. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)	65
4.12. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)	66
4.13. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)	67
4.14. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)	68
4.15. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)	69
4.16. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

4.17. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)	71
4.18. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)	72
4.19. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)	73
4.20. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)	74
4.21. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)	75
4.22. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)	76
4.23. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)	77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α	Absorpsiyon katsayısı
A_i	Atom Kütlesi
Å	Angstrom
Al	Alüminyum
As	Arsenik
β	Beta Bozunması
σ	Malzemenin Elektriksel İletkenliği
Ba	Baryum
Be	Berilyum
Bi	Bizmut
°C	Santigrat Derece
Ca	Kalsiyum
Ce	Seryum
d	Numune Kalınlığı
Dy	Disprosyum
Er	Erbiyum
Eu	Evropiyum
F	Flor
g	Gram
Gd	Gadolinyum
Ge	Germanyum
Ho	Holmiyum
h	Planck Sabiti
I	Radyasyon Şiddeti
K	Potasyum
Li	Lityum
Lu	Lütesyum
Mg	Magnezyum

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Mo	Molibden
Na	Sodyum
N _A	Avogadro Sayısı
Nb	Niyobyum
Nd	Neodimyum
μ	Lineer Zayıflatma Katsayısı
μ_p	Kütle Zayıflatma Katsayısı
O	Oksijen
R ²	R-kare Uyum Oranı
P	Fosfor
ρ	Yoğunluk
Pb	Kurşun
Pr	Praseodimyum
S	Kükürt
Sb	Antimon
Se	Selenyum
Si	Silisyum
Sm	Samaryum
Sr	Stronsiyum
t	Malzeme Kalınlığı
Ta	Tantal
Tb	Terbiyum
Te	Tellür
Ti	Titanyum
Tm	Tulyum
V	Vanadyum
ν	Foton Frekansı
w _i	Ağırlık Fraksiyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

Yb	İterbiyum
Z	Atom Numarası
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum

Kısaltmalar

Açıklama

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
C_{eff}	Etkin İletkenlik
cm	Santimetre
EABF	Enerji Soğurma Yığılma Faktörü
EBF	Enerji Yığılma Faktörü
E_g	Optik Bant Aralığı
E_u	Urbach Enerjisi
eV	Elektron Volt
HEA	Yüksek Entropili Alaşımlar
HVL	Yarı Değer Kalınlığı
IR	Kızılötesi
keV	Kilo Elektron Volt
LAC	Lineer Zayıflatma Katsayısı
MAC	Kütle Zayıflatma Katsayısı
MeV	Mega Elektron Volt
mfp	Ortalama Serbest Yol
N_{eff}	Etkin Elektron Yoğunluğu
NTE	Nadir Toprak Elementler

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar****Açıklama**

NBO	Bağ Yapmayan Oksijenler (Non-Bridging Oxygen)
SAXS	Küçük Açılı X-Işını Saçılması
SiC	Silisyum Karbür
tp	Üçgen Piramit (trigonal pyramid)
tbp	Üçgen Bipiramit (trigonal bipyramid)
TVL	Onda Değer Kalınlığı
TZCx	Numunelerin Genel Kodu
UV	Morötesi
UV-Vis	Morötesi-Görünür (Ultraviolet-Visible)
XRD	X-ışını kırınımı
XRR	X-ışını reflektometresi
V_M	Molar Hacim
Z_{eff}	Etkin Atom Numarası
Z_{eq}	Eşdeğer Atom Numarası

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Anorganik maddeler ve katılarla UV-Vis radyasyonu ve X-ışını/gama radyasyonu arasındaki etkileşimler, radyasyon türlerinin enerjileri ve malzeme özellikleriyle ilişkili temel fiziksel olaylara dayanır. UV-Vis radyasyonu, anorganik maddeler ve katılarla etkileşimde temel olarak valans elektronlarının uyarılmasına neden olmaktadır. X-ışınları ve gama radyasyonu ise çok daha yüksek enerjileri sayesinde farklı mekanizmalarla etkileşime girer. UV-Vis radyasyonunun etkisi çoğunlukla tersine çevrilebilir ve yıkıcı değildir. Yapıda kalıcı bir hasar bırakmaz. X-ışınları ve gama radyasyonu, iyonizasyon ve atomik yer değiştirmeler yoluyla malzemenin yapısında kalıcı radyasyon hasarlarına neden olabilir. Bu yüzden özellikle yüksek enerjili radyasyondan korunma, insan sağlığı, çevre ve teknolojik sistemler için kritik bir öneme sahiptir. Radyoterapi gibi tıbbi uygulamalarda, nükleer enerji sistemlerinde radyasyona maruz kalma, DNA hasarı, kanser riski ve malzeme deformasyonu gibi ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle radyasyon zırhlama malzemeleri zorunlu bir ihtiyaçtır. Zırhlama malzemesi olarak cam, şeffaflığı, modifiye edilebilirliği ve yapısal esnekliğiyle önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Özel cam sistemlerinden başka radyasyon zırhlamada kullanılan malzemeler arasında kurşun, beton, çelik, bor, polimerler, seramikler, alaşımlar, yüksek entropili alaşımlar (HEA) gibi malzemeler geniş bir yelpaze oluşturmaktadır. Kurşun, yüksek atom numarası sayesinde gama ve X-ışınlarını yüksek oranda soğurur. Kurşunun etkin zırhlama kapasitesi avantajken, toksisiteden ötürü çevresel zararları dezavantajdır. Beton, nötron ve gama zırhlamasında ekonomik bir seçenek olarak ön plana çıksa da düşük elastikiyet ve taşınabilirlik eksikliği dezavantajdır. Çelik, mekanik dayanıklılığı, yoğunluğu ve sertliği ile nükleer santrallerde ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Bor karbür gibi bor içeren malzemeler nötron zırhlamasında yüksek nötron yakalama kesitiyle etkilidir. Ancak gama zırhlamasında aynı derecede etkili değildir. Özellikle polimer esaslı kompozitler, hafif, esnek ve çevre dostu olmaları ile dikkat çeker; metallerle katkılanarak zırhlama performansları artırılabilir. Seramikler, kimyasal dayanıklılık ve yüksek zırhlama kapasitesi sunar ancak kırılabilirlik ve üretim karmaşıklığı dezavantajdır. Tungsten veya kurşun-çinko bazlı alaşımlar, yüksek yoğunluk ve mekanik dayanımları sayesinde gama zırhlamasında kullanılır. Tungsten alaşımları kurşuna alternatif olarak toksisiteyi azaltsa da, yüksek maliyeti ve işleme zorluğu dezavantajdır. Literatürde, HEA'ların gama ve nötron zırhlamasında etkili olduğu belirtilmiştir. HEA'ların nispeten

düşük yoğunluğa sahip varyantlarının hafiflik avantajı sağladığı bilinmektedir. Karmaşık üretim süreçleri ve maliyetleri yaygın kullanımın önündeki en büyük engeldir. TeO_2 bazlı veya TeO_2 , PbO katkılı özel cam sistemleri, özellikle şeffaflık ve kolay modifiye edilebilmeleri ile tıbbi ve nükleer alanlarda öne plana çıkar. PbO , Bi_2O_3 gibi ağır metal oksitlerle veya geçiş metal oksitleri ile birleştirilerek gama zırhlama etkinlikleri artırılabilir. Bor, flor ve lityum gibi hafif elementlerin katkısı ise bu camların nötron zırhlamasını güçlendirebilir. Bu özel kompozisyona sahip camlar, yoğunluk, etkin atom numarası ve amorf yapısıyla radyasyon emilimini güçlendirirken, sağladıkları mekanik dayanıklılık ve kimyasal dayanım ile uzun ömürlü bir kullanım vadeder. Buna göre, her malzemenin avantaj ve dezavantajları vardır ve maruz kalacağı radyasyonun türü ve uygulama alanına göre seçilmelidir. Örneğin cam, özellikle şeffaflık gerektiren durumlarda öne plana çıkmalıdır. TeO_2 bazlı cam sistemlerin geliştirilmesi bu nedenle büyük öneme sahiptir.

Tipik olarak ortalama $5\text{-}6\text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip TeO_2 camlar, yoğunlukları, amorf yapıları ve nispeten düşük sıcaklıklarda sentezlenebilmesi açısından radyasyon zırhlamasında önemli bir yere sahiptir. TeO_2 camların özellikle gama zırhlamasında yüksek emilim kapasitesine sahip oldukları bilinmektedir. Sadece X-ışını ve gama radyasyonu zırhlamasında değil, optik özellikler açısından da UV'den IR'e geniş şeffaflık sunan bu camlar, sahip oldukları düşük fonon enerjisi ile optik dalga kılavuzları gibi uygulamalara da uygundur. Yapısal olarak Te-O-Te köprü bağları ve TeO_4 tetrahedral birimleri ile karakterize edilir. Kırılma gibi dezavantajları ise, ZnO gibi ek bileşenlerle güçlendirilebilir. TeO_2 - ZnO ikili camlar, TeO_2 cam ağına ZnO ' nun eklenmesiyle hem zırhlamayı hem de yapıyı modifiye eder. Gama ve nötron zırhlamasını iyileştirir. Optik olarak ZnO ile daha yüksek şeffaflık sağlanırken, yapısal olarak ZnO ' nun ağ düzenleyici rolü TeO_4 birimlerini TeO_3 ' e dönüştürerek camın optik ve fiziksel özelliklerini değiştirir. Tüm avantajlarına rağmen ZnO fazlalığı kristalleşmeyi tetikleyebilir; bu nedenle katkı malzemelerinde flor içeren alternatifler tercih edilebilir. TeO_2 - ZnO sistemine alternatif olabilecek ikili TeO_2 - ZnF_2 oksiflorür camlar, flor içeriğiyle yeni ve farklı kompozisyon olarak ortaya çıkar. Bu oksiflorür camlar gama zırhlamasında ZnO katkılı TeO_2 bazlı camlara göre çok büyük bir etkinlik sağlamasa da nötron zırhlamasında iyileşme sağlar. Optik şeffaflık görünür bölgede korunur, hatta iyileşebilir ancak yoğunluk daha düşük değerlere iner. Flor cam ağını gevşetip kırılma gücü artırsa da, nötron emilimindeki avantajı ZnF_2 ' nin TeO_2 - ZnO kompozisyonuna eklenmesi gerektiği fikrini doğurur. Bu birleşim, üçlü TeO_2 - ZnO - ZnF_2 cam yapılarını ortaya

çıkartır. Optik olarak geniş şeffaflık aralığıyla fotonik cihazlara uygundur. Yüksek katkı oranlarında yapısal olarak ZnO ağ oluşturunca, ZnF_2 ise ağ modifiye edici rol oynar. Yapı içerisinde F^- iyonları O^{2-} ile yer değiştirerek ağı gevşetir, nötron zırlamasını iyileştirir, optik özellikleri geliştirebilir ancak mekanik dayanıklılığı azaltabilir. Optik özellikler oksiflorür camları nadir toprak elementler (NTE) için uygun konaklar haline getirebilir ayrıca nadir toprak elementi katkısı mekanik dayanımı güçlendirebilir. NTE katkısı, TeO_2 ve oksiflorür sistemlerini radyasyon zırlama özellikleri açısından güçlendirmektedir. Özellikle etkin atom numarasının artması gama zırlamasında yüksek etkinlik sağlar. Optik açıdan lazer uygulamaları için potansiyel malzeme olarak ortaya çıkar. NTE iyonları cam ağına entegre olduğunda, oksijenle yaptıkları bağlar sayesinde yoğunluk artışına neden olur. Literatürde NTE'nden seryum katkılı çeşitli cam yapılarına rastlanmaktadır. Borosilikat bazlı Ce katkılı camlar, yüksek termal kararlılık ve kimyasal direnç sergilemektedir. Ancak düşük yoğunlukları nedeniyle ZnO- TeO_2 camına göre gama zırlamasında daha az etkilidir. Fosfat bazlı Ce katkılı camlar ise düşük fonon enerjisi ile optik şeffaflıkta üstünlük sağlamaktadır. Bu cam türlerinin ise mekanik dayanıklılıkları ZnO- TeO_2 'den düşüktür. ZnO- TeO_2 cam ağına katkılanan CeO_2 , Te-O-Ce bağları oluşturarak ağı güçlendirir, cam yoğunluğunu artırır. CeO_2 katkısı, ZnO- TeO_2 sistemine entegre olduğunda etkin atom numarasını artırır, UV absorpsiyonu ve optik berraklık sağlar. Yapısal olarak Ce^{+4} iyonları TeO_4 birimlerini modifiye eder, Te-O-Ce bağları cam ağını güçlendirir, ortalama $5\text{-}5,5 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değerine ulaştırabilir. Ancak optik açıdan değerlendirildiğinde yüksek Ce içeriği yoğun renklenme riski taşır. Camlara CeF_3 katkısının ise, CeO_2 'den farklı olarak flor içeriğiyle nötron zırlamasını iyileştireceği tahmin edilebilir. Cam ağına F'nin girişi düşük fonon enerjisi sunar ve optik şeffaflık sağlar.

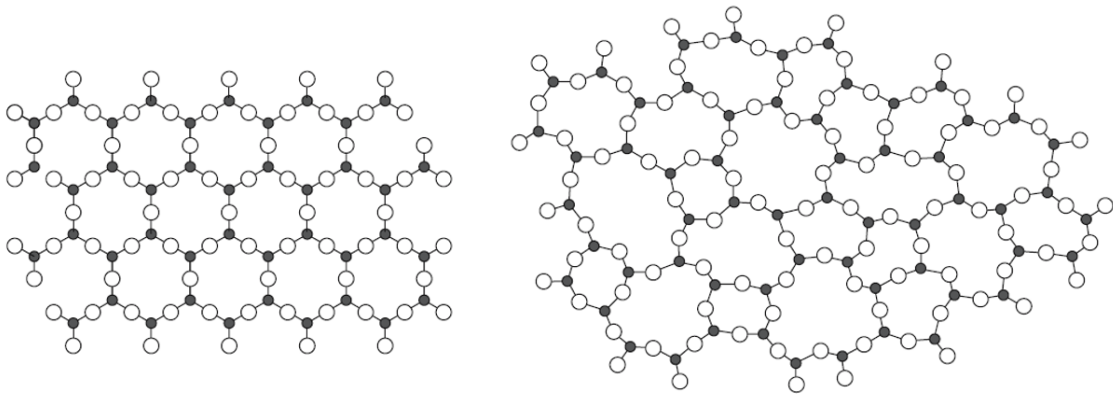
Bu çalışma, TeO_2 -ZnO- ZnF_2 temel kompozisyonuna sahip oksiflorür cam yapısına CeF_3 katkısının, UV-Vis bölgesinde optik özellikleri ile X-ışını ve gama radyasyonu zırlama performansları üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Sentezlenen cam numunelerin fiziksel ve optik özelliklerindeki değişimler ile LAC, MAC, HVL, TVL, mfp, N_{eff} , Z_{eff} , C_{eff} , Z_{eq} , EBF, EABF gibi radyasyon zırlama parametreleri detaylı bir şekilde analiz edilerek, bu camların fotonik uygulamalar ve radyasyon zırlama için yenilikçi malzeme potansiyeli ortaya konmuştur. Çalışma, çevre dostu ve şeffaf zırlama malzemelerine duyulan ihtiyacı karşılamak üzere, TeO_2 bazlı camların modifiye edilebilirliğini ve işlevselliğini tartışmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Camlar

Gündelik yaşamın vazgeçilmezi olan cam materyaller eski çağlardan beri kullanılmakta ve insanların ilgisini çekmektedir. Bunun başlıca sebeplerinden birisi tabi ki insanlara sağladığı konfordur. Optik ve mekanik özellikleriyle insanların ilgisini çekmiş ve gündelik yaşamdaki kullanışlılığı insanların vazgeçilmezlerinden biri olmasını sağlamıştır. Eski çağlarda doğal yollardan kendiliğinden oluşan veya deneme yanına yöntemiyle üretilen cam materyaller, bilimin ve teknolojinin hızlı yükselişinden, değişen ve gelişen çevre koşullarından, ihtiyaçların artık daha teknik hale gelmesinden kaynaklı, çeşitli, özelleştirilmiş ve belirli kurallar altında üretilmektedir.

Genel olarak camlar inorganik maddelerin yüksek sıcaklıklardan kristalleşmeyecek kadar hızlı bir şekilde soğutulmasıyla oluşan ve bu sırada yüksek viskozitesi sebebiyle amorf yapıda olan; sert, kırılkan, termodinamik olarak kararsız, opak olmayan bir seramik malzemedir (Kılıç, 2006; Çelikkilek, 2013). Cam malzemeler, kristaller gibi düzenli bir molekül yapısına sahip olmamasına rağmen kendi içerisinde oldukça kısa mesafeli düzen barındırır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Kristal düzen ve amorf yapı

Teorik olarak sıvı halden kristalleşmeyecek kadar hızlı soğutulan bütün malzemelerden cam malzeme üretilebilmektedir ancak deneysel olarak istenilen soğutulma hızlarına ulaşmak mümkün değildir (Tatar, 2006). Soğutulma hızı ve kristallenme hızı cam materyal için önemli ve üzerine durulması gereken iki parametredir.

Cam oluşumu üzerine çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Goldschmidt bir metal katyonu ile oksit bileşiminin camlaşma eğilimleri ile iyonik yarıçapları arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. A metal katyonu olmak üzere A_mO_n ile ifade edilen oksit cam için $R_A/R_O = 0,2$ ila $0,4$ arasında olmalıdır. Oksit esaslı bileşiklerde R_A/R_O oranı koordinasyon sayısını belirler. $R_A/R_O = 0,255$ olduğunda koordinasyon sayısı dört olmakta ve silikat camların genelinde gördüğümüz tetrahedralli yapı görülmektedir (Tatar, 2006). Tek bağ dayanımı üzerine çalışmalar yapan Sun, kristalleşme kopan bağların yeniden düzenlenmesiyle mümkündür. Oksit bileşiklerdeki amorf yapı bileşik içerisindeki kuvvetli bağlarla ilişkilidir. Bağlar arasındaki kuvvetle doğru orantılı olarak cam oluşumu kolaylaşır (Çetin, 2012). Stanworth yapmış olduğu çalışmalarda oksidin camlaşma kabiliyeti ve A-O bağının kovalentlik derecesi arasındaki kantitatif ilişkiye dikkat çekmiştir. Stanworth cam yapıcı oksitleri üç grupta sınıflandırmıştır. Kuvvetli cam yapıcılar; SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , AsO_3 gibi oksitli bileşikler eritilip karıştırılmalarıyla cam oluştururlar. Hızlı soğutma ile cam oluşturabilen Sb, Te, W, Mo gibi metallerin oksitleri orta derece cam yapma eğilimi gösterir. Son grup ise ara oksitler olarak adlandırılır. (Tatar, 2006).

2.2. Cam Çeşitleri

2.2.1. Oksit Camlar

Yaygın olarak kullanılan ve ticari önemi yüksek olan oksitlerle oluşturulan camlar en önemli cam oluşturuculardandır. Başlıcaları; SiO_2 , TeO_2 , V_2O_5 ve P_2O_5 ' dir (Kılıç, 2006). Bazıları tek bileşenli cam yapıcılar olabildikleri gibi birden fazla oksidin karışımından çok bileşenli camlar oluşur. Tek bileşenli veya çok bileşenli cam oluşumları ticari önemi arttırmakta, çeşitli ve teknik bir üründe kullanılmak üzere özelleştirilmiş olmaları sebebiyle insanların ilgisini çekmektedir.

Çok bileşenli oksit camlarda cam karışımı içerisinde bulunan oksitler işlevleri sebebiyle üç grupta değerlendirilir. Cam yapıcılar, camın ağ yapısını oluşturan ve bulunması zorunlu olan gruptur. Başlıca cam yapıcılar; B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 , TeO_2 , As_2O_3 dir. Düzenleyiciler ağ yapının bozulmasına sebep olur. Başlıca düzenleyiciler; Al_2O_3 , Sb_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , PbO , BeO , ZnO ’ dur. Aradakiler ağ yapıyı hem bozucu etki gösterip hem de ağ yapı içerisinde yer alırlar. Başlıca aradakiler; MgO , Li_2O , BaO , CaO , SrO , Na_2O , K_2O dur. (Kılıç, 2006).

2.2.2. Oksit Olmayan Camlar

Bileşiminde oksit içermeyen camların özellikleri bakımından dikkat çeken grubu halojen camlardır. BeF_2 , ZrF_4 , $AgCl$, $PbBr$, $ZnCl_2$ gibi halojenler kristalleşmeye olan yatkınlıkları ve neme olan hassasiyetleri sebebiyle dezavantajlı ancak yüksek IR geçirimi ve yüksek elektronegativiteleri yönünden ilginçtirler.

Bir diğer oksit olmayan cam grubu ve en bilinen ikinci grubu kalkojen camlardır. Kalkojen elementlerden; S, Se, Te, Ge, Si, As gibi elementlerin bir veya daha fazlasının karışımıyla oluşan camlardır (Kılıç, 2006).

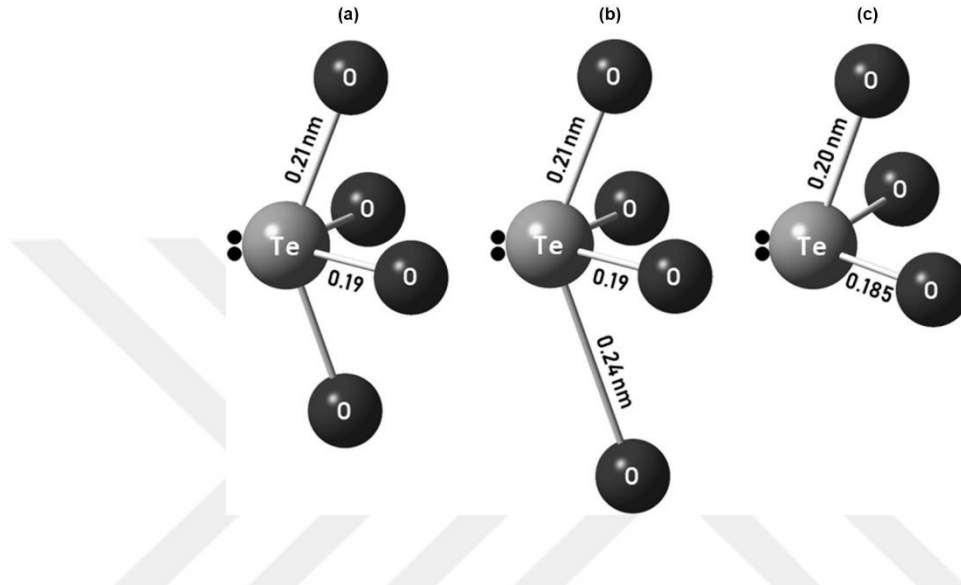
2.2.3. Metalik Camlar

Metalik camlar diğer cam çeşitlerinden farklı olarak yüksek iletkenlikleri ve manyetik özellikleri bakımından ilgi çekmektedir. Metalik camlar kristalleşmesinin önlenmesi amacıyla diğer cam bileşimlerine göre çok daha hızlı bir şekilde soğutulur ve ince bir tabaka şeklinde üretilebilir. Metalik cam üretimi için en sık kullanılan yöntem “soğuk bloklu eriyik savurmadır” (Kılıç, 2006). Pek çok avantajının yanında metalik camlar yüksek üretim maliyeti sebebiyle tıbbi implant, profesyonel tenis raketi, kol saati yüksek fiyatlı ürünlerde kullanılmaktadır.

2.3. Tellür Camlar

Latince Tellus kelimesinden adını alan tellür, bir yarı metaldir ve genellikle gümüş-beyaz renktedir. Oda sıcaklığında katı olan tellür oldukça zehirlidir. Ticari önemi yüksek

olan tellür; cam ve seramiklerde, kauçuğu sertleştirmekte, DVD ve CD kaplamada kullanılır. Tellürün en kararlı oksidi TeO_2 'dir. Molar kütle 159,61 g/mol, yoğunluğu 6 g/cm³ olan TeO_2 'in erime sıcaklığı 733°C'dir. Koşullu bir cam yapıcı olan TeO_2 , kendi başına cam yapma özelliği göstermediğinden cam malzeme oluşturabilmek için diğer metal oksitlerle katkılandırma yapılmalıdır (Irmak, 2012).



Şekil 2.2. Tellür bazlı camlar içerisinde tellürün yapısal birimleri (a) TeO_4 (tbp), (b) TeO_{3+1} (bozulmuş tbp), (c) TeO_3 (tp) (Kılıç vd., 2019)

TeO_2 esaslı cam malzemeler, silka, borat, germanat camlara göre düşük sıcaklıklarda cam oluşturma kabiliyetleri, yüksek kırılma indisleri, yüksek elektriksel iletkenlikleri, düşük fonon enerjileri, UV ve IR bölgelerdeki yüksek geçirgenlikleri, termal karalılıkları, lantanit grubu elementlerle yüksek konsantrasyonlarda katkılanabilirlik, TeO_2 esaslı cam malzemeleri optik, mekanik ve radyasyon zırhlama özellikleri bakımından ilgi çekici kılmalıdır. TeO_2 esaslı cam malzemeler endüstride, optik ve elektronik vb. alanlarda kullanılmaktadır (İlik vd., 2022; Çelikkale, 2013; Kılıç vd., 2019).

Yarıiletken bir bileşik olan ZnO 'nun mol ağırlığı 81,408 g/mol, yoğunluğu 5,606 g/cm³'dür. Radyasyon zırhlama özellikleri, oda sıcaklığında geniş bir bant aralığına sahip olması hem yarıiletkenlik hem de piezoelektrik özellikleri, asit ve alkalilerde kolayca dağılanabiliyor olması, ZnO katkılı malzemelere dikkat çekmektedir (Irmak, 2012). ZnO 'nun TeO_2 tabanlı cam sistemine dahil edilmesi kristalleşme oranını düşürdüğü gibi cam

oluşturma kapasitesinin artmasına sebep olmaktadır (Kaky vd., 2023). Cam bileşimine ZnF_2 eklendiğinde cam oluşturma aralığını ve cam stabilitesini artırır, viskoziteyi düşürür ayrıca camın neme karşı dayanıklılığını artırır (Bassam vd., 2023).

Çinko-Tellür camlar üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri, çeşitli kullanım alanları, üstün radyasyon zırhlama özellikleri ve uygun maliyeti sebebiyle bu camlar üzerine değişik kompozisyonlarda yapılan çalışmalar artmıştır. $Bi_2O_3-Na_2O-TiO_2-ZnO-TeO_2$ cam sistemi üzerine yapılan çalışmada Bi_2O_3 'ün sistematik olarak artışıyla oluşan camın yoğunluğunun arttığı ve gama radyasyonu kalkanlama özelliklerinin iyileştiğini belirtilmiştir (Sayyed vd., 2021). $TeO_2-ZnO-LiF-Nb_2O_5-NaF$ cam sistemi üzerine yapılan çalışmada Nb_2O_5 'in radyasyon zırhlama verimliliğine etkisini incelenmiş ve Nb_2O_5 'in artışıyla radyasyon zırhlama verimliliğinin arttığı belirtilmiştir (Alharshan vd., 2022). $ZnO-MoO_3-TeO_2$ cam sistemi üzerine yapılan çalışmada oluşturulan cam numunelerinin yapılan ölçümler sonucunda sıradan betondan daha iyi bir radyasyon zırhlayıcı materyal olduğu belirtilmiştir (Çelikkalek Ersundu vd., 2019). $TeO_2-Ta_2O_5-ZnO/ZnF_2$ oluşturulan cam sisteminde en yüksek ZnO içeren camın üretilen diğer camlara göre daha üstün bir foton zayıflatma malzemesi olduğunu belirtilmiştir (Rammah vd., 2020).

Oksiflorür camlar düşük fonon enerjisi, yüksek kırılma indisi ve yüksek kristalleşme oranının yanında cam matrisine eklenmesiyle optik olarak şeffaf cam oluşumuna sebep olabilirler. Son on yılda oksiflorür camlar, teknolojiye uygulamaları ve nadir toprak elementi katkıdadıklarında düşük fonon enerjili, dayanımı yüksek ve kimyasal kararlı cam malzemeler üretilmesi sebebiyle ilgi görmüştür (Wang ve Cheng, 2017; Lakshminarayana vd., 2013).

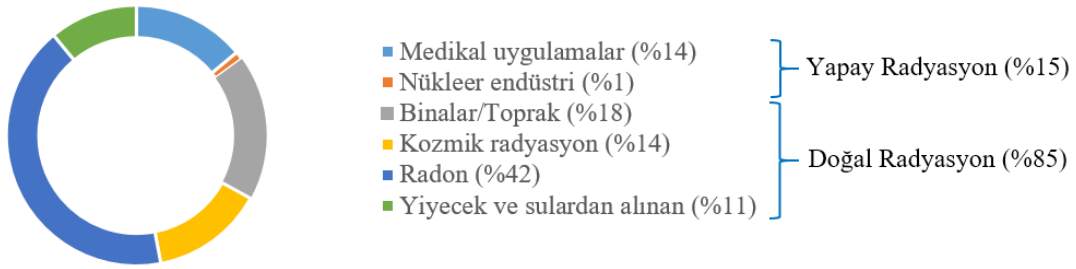
Lantanitler periyodik tabloda atom numarası 57 ve 71 arasındaki elementlerdir. Lantanitlerin tamamına nadir toprak elementi denilmekle birlikte 17 nadir toprak elementinin 15'i lantanitlerdir. Lantanitler nadir toprak elementi olarak adlandırılır. Lantanitlerin en önemli ortak özellikleri 4f orbitallerinin kısmi doluluğudur. Lantanitler; La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu' dir. Doğada en çok bulunan Lantanit adını Ceres astroidinden alan seryum (Ce) dur. Yüksek atom numarası ve yoğunluklarıyla öne çıkan lantanitler; metalurjide, petrokimyada, elektrik-elektronikte, cam ve seramik yapımında, nükleer reaktörlerde radyasyon kalkını olarak kullanılmaktadır.

Nadir toprak elementleriyle katkılanmış camlar, yoğunlukları, düşük üretim maliyetleri, cam malzemenin hazırlanmasını kolaylaştırması sebebiyle büyük ilgi görmüştür. Teknolojinin hızla gelişmesi sintilasyon malzemelerine olan ilgiyi arttırmış ve sintilasyon malzemelerinde en çok kullanılan nadir toprak elementleri; Ce, Tb ve Yb'dir (Du vd., 2019). Nadir toprak elementlerinin yüksek atom numarası ve yoğunlukları sebebiyle cam kompozisyonlarına eklendiklerinde radyasyon zırlama özellikleri üzerinde geliştirici etkisi olmaktadır.

2.4. Radyasyon

Radyasyon diğer bir deyişle ışıınım, doğal veya yapay bir şekilde karasız halde olan maddenin doğası gereği kararlı hale geçmek için elektromanyetik dalga veya parçacık biçimindeki enerji yayımı ya da aktarımıdır. Radyasyon uzayın bir noktasından başka bir noktaya enerji taşınması olarak tanımlanabilir. Radyasyon oluşumuna göre; radyasyon kaynağı, doğal radyasyon kaynağı ve yapay radyasyon kaynağı olarak sınıflandırılır (Uzun, 2021; Süt, 2023).

Doğal radyasyon insan müdahalesi olmadan kendiliğinden ışıınım yapan radyasyon kaynaklarıdır. İnsanların maruz kaldığı radyasyonun %85'i doğal radyasyon kaynaklıdır. Tüm canlıların etki alanı içerisinde bulunduran bu radyasyona arka plan radyasyonu da denilmektedir. Doğal radyasyon kaynakları; kozmik radyasyon, yerküre radyasyonu, içsel radyasyon olarak üç başlıkta incelenebilir. Kozmik radyasyon; gezegenimiz sürekli olarak güneşten, diğer yıldızlardan ve derin uzaydan kaynaklanan radyasyona maruz kalmaktadır. Dünyamızın manyetik alanı ve atmosferi bu ışınlardan bir miktar korumaktadır. Bunun bir örneği kuzey ışıklarıdır. Güzel bir görünüme sahip olan kuzey ışıkları güneşten gelen yüklü tanecikleridir. Yerküre radyasyonu; doğada bulunan ve karasız halde olan uranyum, toryum gibi elementler parçacık veya dalga şeklinde ışıma yaparlar. Bu yüzden yer kürenin kendisi de bir radyasyon kaynağıdır. İçsel radyasyon; tüm insanlar vücutlarında doğal olarak bulunan Potasyum-40 ve Karbon-14 gibi izotoplardan kaynaklı olarak içsel bir radyasyona maruz kalırlar ancak bunun etkisi yerküre radyasyonu ve kozmik radyasyondan oldukça azdır. Yakın zamana kadar doğal radyasyonun değiştirilemez bir arka plan radyasyonu olduğu düşünülüyordu ancak şu an en önemli doğal radyasyon kaynağı olan Radon için çeşitli önlemler alınmaktadır (Aydın, 2019; AFAD, 2025).



Şekil 2.3. Radyasyon kaynakları ve yüzdeleri (AFAD, 2025)

Canlılar doğal radyasyon dışında toplumsal ve teknolojik gelişmeler sebebiyle insan müdahalesiyle oluşturulmuş yapay radyasyona da maruz kalmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları; tıbbi kaynaklar, enerji üretimi için nükleer santrallerden salınan radyoaktif materyaller, askeri alandaki denemeler sonucu meydana gelen nükleer serpintiler, endüstride, hayvancılıkta kullanılan kaynaklar ve günlük kullanım ürünlerinden canlılar yapay radyasyona maruz kalmaktadır. İnsanların maruz kaldığı radyasyonun %15'i yapay radyasyon kaynaklıdır (Şekil 2.3.) (Aydın, 2019; AFAD, 2025).

2.4.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Radyasyon karşılaştığı maddesel ortamla enerjisine ve türüne göre yapacağı etkileşim de değişmektedir. Radyasyon maddeyle etkileşimine göre iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak sınıflandırmak mümkündür. İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği maddede iyon oluşturan radyasyondur. İyonizasyon olayı insan dahil tüm canlılarda ve cansız maddelerde gerçekleşebilir. İyonlaştırıcı radyasyonun canlı ve cansızlarla etkileşimleri sonucunda fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimler meydana gelir. İyonlaştırıcı radyasyon parçacık radyasyonu veya dalga radyasyonu şeklinde olabilir.

Parçacık radyasyonu kararsız elementlerin doğası gereği daha kararlı hale geçebilmek için yayınladığı kütlesi, momentumu ve enerjisi olan parçacıklardır. Parçacık radyasyonu; alfa parçacığı, beta parçacığı ve nötronlar olarak 3 başlık altında incelenebilir.

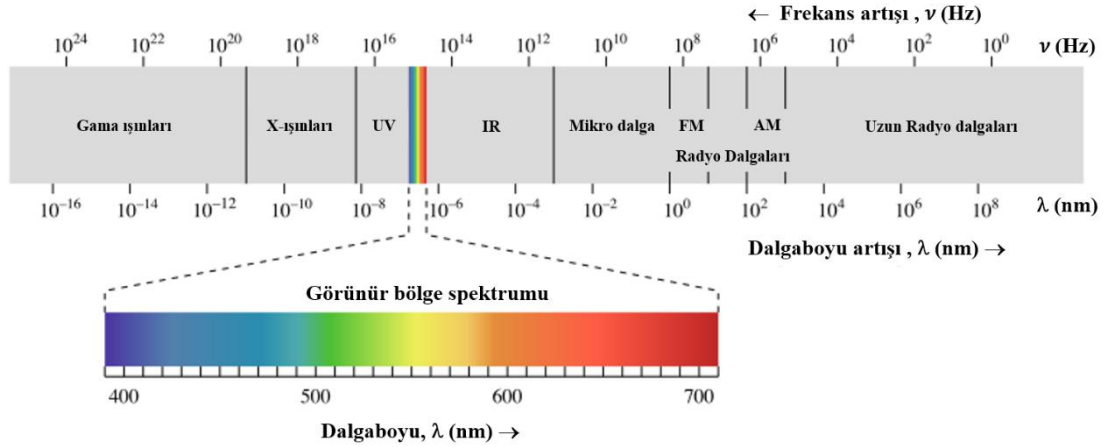
Alfa parçacıkları kararsız halde bulunan atomun çekirdeğinden yayınlanan iki nötron ve iki protondan oluşan kütlesi, momentumu ve enerjisi olan parçacıklardır. Alfa parçacıklarına +2 iyon helyum çekirdeği de denilebilir. Alfa bozunması yapan atom ilk durumuna göre daha kararlı hale geçer. Bozunma öncesi ve sonrası toplam kütle numarası, toplam proton sayısı, toplam enerji korunmaktadır. Alfa parçacıklarının erişme uzaklıkları kısadır. Girginliği sınırlı olan alfa parçacıklarını dar bir madde kalınlığı örneğin bir kâğıt parçası durdurabilir (Çiçek, 2020).

Beta parçacıkları kararsız atomların çekirdek içindeki proton-nötron dengesini sağlayabilmek ve daha kararlı hale geçebilmek için Beta bozunması yapmasıyla yayınlanan parçacıklardır. Çekirdekteki proton veya nötron fazlalığı atomu kararsız hale getirebilmektedir. Beta parçacıkları, çekirdekteki proton veya nötron fazlalığına bağlı olarak pozitron veya elektron olabilir. Kararsız hal nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa atom, β^- bozunmasıyla fazlalık nötronun protona dönüşmesiyle bir elektron ve antinötrino yayınlar. Kararsız hal proton fazlalığından kaynaklanıyorsa atom, β^+ bozunmasıyla fazlalık protonun nötrona dönüşmesiyle bir pozitron ve nötrino yayınlar ve çekirdek daha kararlı hale gelir. Girginliği alfa parçacıklarına göre daha fazla olan beta parçacıkları plastik bir levha ile durdurulabilir (Çiçek, 2020).

Elektrik yükleri olmayan ve kütleleri yaklaşık olarak protonun kütlesine eşit olan nötronlar nükleer reaksiyonlar sırasında, nükleer reaktörlerde, askeri silah denemelerindeki nükleer silah patlamalarında, güneşte oluşan nükleer patlamalarla uzaya saçılıp dünyamıza ulaşabilir. İyonlaştırıcı parçacık radyasyonu olan nötronların girginliği oldukça fazladır. Girginlikleri sebebiyle karmaşık yapıların incelenmesinde kullanılırlar. Ağır agregalı beton ile durdurulabilirler.

Yüklü parçacıkların ivmeli hareketi sonucu oluşan dalga tipi radyasyonun, birbirine dik elektrik ve manyetik alan vektörlerinin oluşturduğu, düzlemlere dik doğrultuda boşlukta ışık hızıyla yayılan iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan çeşitleri bulunmaktadır. Belirli bir

enerjiye sahip ancak kütsüz ve yüksüz radyasyon çeşididir. Dalga tipi radyasyona elektromanyetik radyasyon da denilmektedir. Elektromanyetik radyasyonun frekansa göre sınıflandırılmasıyla elektromanyetik spektrum oluşur. Elektromanyetik spektrum (Şekil 2.4.); Radyo dalgaları, Mikrodalgalar, Kızılötesi (IR), Görünür Işık, Morötesi (UV), X-ışını, Gama Işını' dır.



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum

Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık ve morötesi iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. X-ışını ve Gama ışını iyonlaştırıcı radyasyondur. Gama ışınının girginliği ve enerjisi X-ışınına göre oldukça fazladır.

X-ışını yüksek enerjili elektronların atomunun ilk enerji düzeyinden elektron koparması ve kopan elektron yerine üst enerji seviyelerinden gelen elektronun enerji fazlalığından yayınladığı enerjidir (Süt, 2023). Elektromanyetik dalga olan X-ışının dalga boyu 0,01 ile 10 nm arasındadır. X-ışını iyonlaştırıcı etkiye sahiptir ancak enerjisi ve giriciliği gama ışınından azdır. X-ışını fotoelektrik olay, koherent etki veya compton saçılmasına sebep olabilir. X-ışını özellikle maddenin kristal yapısının incelenmesinde ve tıpta medikal görüntülemelerde kullanılmaktadır. İyonlaştırıcı etkisi sebebiyle uzun süreli maruz kalındığında kanser riskini artırır (AFAD, 2025).

Gama radyasyonu kararsız atomların doğası gereği daha kararlı hale geçebilmek için yaptıkları bozunmalarda, hala yüksek enerjileri var ise atom çekirdeğinden yayınlanan yüksek enerjili, yüksek frekanslı, yüksek girginliğe sahip bir dalga tipi radyasyondur. Gama radyasyonu yayınlayan çekirdeğin proton ve nötron sayısında bir değişim olmazken enerjisi azalmıştır. Radyoaktif bozunmalar sonucu yayınlanan gama radyasyonun enerjisi birkaç keV ile 8-9 MeV arasında olabilir. Gama radyasyonu fisyon ve füzyon gibi nükleer reaksiyonlarda, radyoaktif bozunmalarda yayınlanabilirler. Yüksek enerjili ve yüksek girginliğe sahip olan gama radyasyonu yüksüz olduğu için elektrik ve manyetik alandan etkilenmez (AFAD, 2025).

Gama radyasyonu, iyonlaştırıcı etkisi sebebiyle dokularda oldukça tahribata sebebiyet verir. Canlı dokuda fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere üç etkisi vardır. Gama radyasyonun canlı dokuya fiziksel etkisi dokularda iyonlaşmaya ve uyarılmaya sebebiyet verir. Gama radyasyonun kimyasal etkisi hasar görmüş moleküller diğer hücresel yapılarla reaksiyona girerek oldukça aktif olan çiftleşmemiş elektronların ortaya çıkmasına sebep olur ve fiziksel ve kimyasal etkileşim sonunda biyolojik kademe başlar. İyonlaştırıcı radyasyon hücre içerisindeki DNA ve kromozomlara ciddi zararlar verebilir. Radyasyonun canlı dokuda meydana getireceği hasar genetik ve gövdesel olabilir. Hasar gövdesel ise kısa dönemde veya uzun bir süreçte iyi ya da kötü huylu tümöre veya vücutta yaralara sebebiyet verebilir. Hasar genetik ise gelecek nesillerde ortaya çıkan kalıtsal hastalıklara yol açar (Uzun, 2021; Aydın, 2019).

2.4.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun maddeyle etkileşiminde iyonizasyon olayı gerçekleşmez. Elektromanyetik spektrumda radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık ve morötesi dalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun giriciliği ve enerjisi iyonlaştırıcı radyasyona göre azdır. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun canlı doku üzerinde bıraktığı hasar, iyonlaştırıcı radyasyona göre az olsa da iyonlaştırıcı olmayan radyasyona da uzun süre maruz kalınması cilt yanıklarına ve göz gibi hassas dokularda hasara neden olabilir (AFAD, 2025).

Elektromanyetik spektrumun en uzun dalga boyuna ve en düşük frekansına sahip olan radyo dalgaları iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. Radyo dalgaları yıldırımlar ve astronomik olaylarla doğal olarak oluşabildiği gibi yapay olarak da üretilebilir. Radyo dalgaları da diğer elektromanyetik dalgalar gibi boşlukta ışık hızıyla hareket eder. Radyo dalgaları tv, radyo, cep telefonu görüşmeleri, Gps sinyalleri gibi kablosuz veri aktarımında kullanılmaktadır. Radyo dalgalarından sonra en yüksek dalga boyu değerine mikrodalgalar sahiptir. Mikrodalga da radyo dalgaları gibi iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. Mikrodalgalar uzun mesafeli bilgi aktarımında, radarlarda, cep telefonlarında, mikrodalga fırınlarda günlük hayatta birçok yerde kullanılmaktadır. Elektromanyetik spektrumun bir parçası olan kızılötesi (IR) dalgaların dalga boyu mikrodalgalardan küçük, görünür ışıktan büyüktür. Bütün canlı ve cansızlar kızılötesi ışınlar yayar. Kızılötesi dalgalar veri aktarımında, termal kameralarda, tv kumandalarında, gece görüş sistemlerinde, takip sistemlerinde, astronomide ve spektroskopide kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalga olan görünür ışık 400 nm ile 700nm arasında dalga boyuna sahiptir. Görünür ışık iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur ve elektromanyetik spektrumun insan gözünün algılayabildiği bölgesidir. Morötesi dalgalar (UV) 400 nm civarında görünür ışığın mor renginden hemen sonra başlamaktadır. Morötesi dalgaları UV A, UV B ve UV C olarak sınıflandırılabilir. UV A ve UV B iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmakla beraber UV C iyonlaştırıcı radyasyondur. Morötesi dalga genel olarak maddenin valans elektronlarının uyarılmasına neden olur ve yapıda kalıcı hasar bırakmaz. Güneş doğal UV ışın kaynağıdır ayrıca morötesi dalga elektrik arklarından ve gaz boşalmalarından da meydana gelebilir. Morötesi dalgalar sterilizasyonda, yıldız ve galaksilerin incelenmesinde kullanılır.

2.5. Radyasyon madde etkileşimi

Radyoaktif elementler kararsız doğaları gereği kararlı hallerine ulaşabilmek amacıyla, barındırdıkları fazla enerjilerini elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar halinde yayınlarlar. Bu süreçte açığa çıkan radyasyon, karşılaştığı maddesel ortamlar ile etkileşime girerek enerjilerini maddesel ortamlara aktarırlar. Uzayın bir noktasından başka bir noktasına enerji taşınımı olarak tanımlanan radyasyonun, karşılaştığı maddesel ortamlardaki atom veya atom çekirdeği ile yapacağı etkileşimlerde yayınlanan radyasyonun enerjisine ve türüne bağlı olduğu gibi etkileşime girdiği ortamın atomik yoğunluğuna da bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleşebilmektedir (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019).

Radyasyon maddesel ortam içerisinde karşılaştığı atomlar ile etkileşime girdiğinde, bu atomları iyonize edip etmeme özelliğine göre iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi iyonize radyasyon ve bir diğeri iyonize olmayan radyasyondur. İyonize olmayan radyasyon, maddesel ortamda yük oluşumuna sebep olamayan elektromanyetik radyasyon türüdür. İyonize radyasyon ise, maddesel ortamda yüklü parçacıklar oluşturabilme yeteneğine sahiptirler. Yapısal değişime sebep olan iyonize radyasyon türleri; alfa, beta ve nötron parçacıkları ile X ışınları ve gama ışınlarıdır (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019).

Ağır yüklü parçacıklar (protonlar ve alfa parçacıkları), Coulomb kuvveti aracılığıyla madde içerisindeki atomların elektronlarıyla etkileşir. Kısa menzillerde enerjilerini kaybederek binlerce çarpışma gerçekleştirirler. Bu süreçte iyonizasyon ve uyarıma neden olurlar. Çekirdeklerle etkileşimleri sırasında Bremsstrahlung ışınımı oluşabilir. Parçacıkların enerjilerinin tamamen sönmüldüğü noktada Bragg piki adı verilen maksimum iyonizasyon meydana gelir ve bu özellik kanser tedavisinde kullanılır (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019).

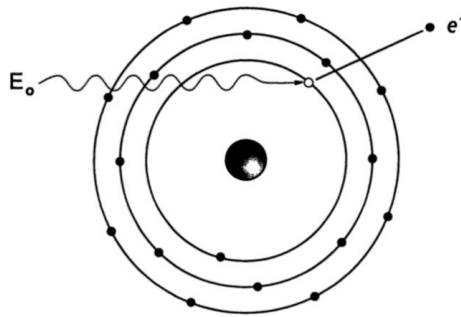
Hafif yüklü parçacıklar (elektronlar), küçük kütleleri nedeniyle zikzak bir hareketle ilerler. Coulomb kuvvetiyle esnek veya esnek olmayan çarpışmalar yaparlar. Esnek çarpışmalarda enerji kaybı olmazken, esnek olmayan çarpışmalar sırasında iyonizasyon veya Bremsstrahlung ışınımı gerçekleşir (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019).

Nötronlar, yüksüz oldukları için Coulomb kuvvetine maruz kalmadan çekirdeklerle doğrudan nükleer kuvvetler aracılığıyla etkileşir. Madde içerisindeki yolculuklarında farklı reaksiyonlara neden olabilirler. Temel etkileşim türleri elastik ve esnek olmayan saçılma ile absorpsiyon reaksiyonlarıdır. Absorpsiyon durumunda fisyon veya çeşitli parçacıkların salınımı gerçekleşebilir (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019).

Fotonlar (X-ışınları ve gama ışınları), yüksüz olduklarından Coulomb kuvvetleriyle değil, atomların yörünge elektronları ve çekirdek kuvvetleriyle etkileşir. Fotonların başlıca etkileşimleri; fotoelektrik olay, Compton saçılımı, çift oluşumu, koherent saçılma ve fotonükleer etkileşimdir. Fotonlar maddeye nüfuz ederken enerjilerinde azalma değil, şiddetlerinde eksponansiyel bir azalma meydana gelir (Agar vd., 2019).

2.5.1. Fotoelektrik Olay

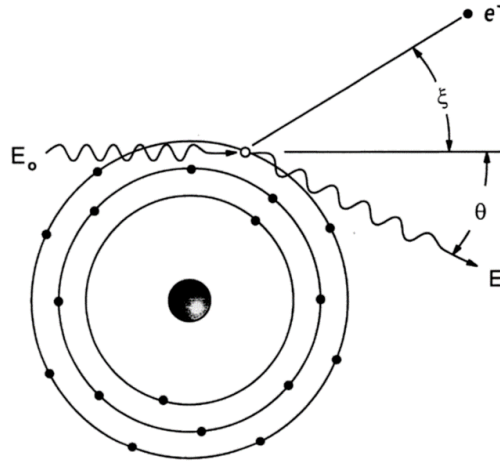
Düşük enerjili bir foton, bir atomun yörünge elektronuyla etkileşerek enerjisini tamamen aktarır ve elektronu atomdan koparır (Şekil 2.5.). Bu elektron "fotoelektron" olarak adlandırılır. Eğer etkileşim iç yörünge elektronlarıyla gerçekleşirse, dış yörüngedeki bir elektron bu boşluğu doldurur ve X-ışını yayılımı oluşur. Fazla enerji bir başka elektronu koparmak için kullanıldığında Auger olayı meydana gelir. Fotoelektrik olay, foton enerjisinin elektron bağlanma enerjisinden büyük olması durumunda gerçekleşir (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019; Singh vd., 2018). Fotoelektrik etkinin atom numarasına (Z) bağlılığı, atomun elektron kabuklarının enerji seviyeleri ve çekirdek yüküyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek Z değerine sahip atomlarda, çekirdek yükü daha büyük olduğundan, iç kabuk elektronlarının bağlanma enerjisi artar. Bu nedenle, fotoelektrik olay için gerekli foton enerjisi de yükselir. Fotoelektrik etkinin kesit alanı, 100 keV'in altındaki düşük enerjili fotonlar için baskındır ve yaklaşık olarak Z^5/E^3 bağıntısıyla orantılıdır. Burada E , foton enerjisidir. Bu, 82 atom numarasına sahip kurşun gibi yüksek atom numaralı maddelerde fotoelektrik olayın düşük atom numaralı maddelere oranla çok daha olası olduğunu gösterir. Ayrıca, foton enerjisi, atomun K, L veya M kabuklarındaki elektronların bağlanma enerjilerine yakınsa, absorpsiyon kenarları nedeniyle kesit alanında keskin artışlar gözlenir (K-Edge, L-Edge gibi). Bu olay, özellikle yüksek atom numaralı maddelerde, düşük enerjili gama veya X-ışını uygulamalarında (örneğin tıbbi görüntüleme) önemlidir.



Şekil 2.5. Fotoelektrik olayın şematik gösterimi (Beutel, 2020)

2.5.2. Compton Saçılması

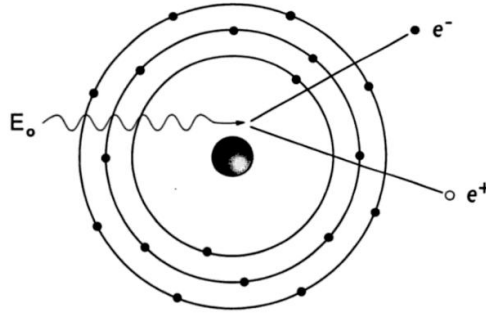
Compton saçılması, bir fotonun atomdaki zayıf bağlı bir elektronla elastik olmayan çarpışması sonucu enerji ve momentum transferiyle saçılmasıdır (Şekil 2.6.). Bu süreçte fotonun enerjisi azalır ve saçılma açısına bağlı olarak dalga boyu değişir. Foton enerjisi tamamen sönmülenemez; bu nedenle düşük enerjili fotonlar, fotoelektrik olaya yönelir. Compton saçılımı genellikle 0,5–1 MeV aralığında gerçekleşir ve saçılan fotonun dalga boyunda değişim olur (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019; Singh vd., 2018). Compton saçılmasının atom numarasına bağlılığı, fotoelektrik olay veya çift oluşumuna kıyasla daha zayıftır, çünkü bu olay esas olarak atomdaki elektron yoğunluğuna bağlıdır. Compton kesit alanı, yaklaşık olarak Z ile doğrusal orantılıdır, çünkü her elektron bağımsız bir saçılma merkezi olarak davranır. Bu nedenle, yüksek Z 'li atomlarda daha fazla elektron olduğundan, Compton saçılması olasılığı artar, ancak bu artış Z^5 gibi bir bağımlılık göstermez. Compton saçılması, 100 keV ile 1 MeV arası orta enerjili fotonlar için baskındır ve foton enerjisi arttıkça kesit alanı $1/E$ ile azalır. Yüksek atom numaralı maddelerde, Compton saçılması, fotoelektrik olay ile çift oluşumu arasında bir geçiş bölgesinde kalır. Bu olay, radyasyon dozimetresi ve gama ışını spektroskopisi gibi uygulamalar için önemlidir.



Şekil 2.6. Compton saçılmasının şematik gösterimi (Beutel, 2020)

2.5.3. Çift Oluşumu

Foton enerjisi 1,022 MeV'den büyükse, atom çekirdeğinin Coulomb alanında pozitif ve negatif bir parçacık çifti (pozitron ve elektron) oluşturabilir (Şekil 2.7.). Pozitron, kısa süre içinde bir elektronla etkileşerek yok olur (anihilasyon), bu süreçte zıt yönlü iki foton (0,511 MeV) açığa çıkar. Çift oluşumu, yüksek atom numarasına sahip malzemelerde daha sık gözlenir (Abouhaswa vd., 2021; Agar vd., 2019; Singh vd., 2018). Çift oluşumunun atom numarasına bağlılığı oldukça güçlüdür, çünkü çekirdeğin elektrik alan gücü Z^2 ile orantılıdır. Bu nedenle, çift oluşumu kesit alanı yaklaşık olarak Z^2 'ye bağlıdır. Yüksek atom numaralı maddelerde, çekirdeğin büyük yükü nedeniyle çift oluşumu olasılığı düşük atom numaralı maddelere oranla çok daha yüksektir. Ayrıca, foton enerjisi 10 MeV ve üzerine çıktıkça, çift oluşumu baskın etkileşim haline gelir ve kesit alanı $\ln(E)$ ile logaritmik olarak artar.



Şekil 2.7. Çift oluşumunun şematik gösterimi (Beutel, 2020)

2.6. Radyasyon Zırhlama Materyalleri

Radyasyonun canlı doku üzerinde yarattığı tahribat etkilerinin kısa veya uzun dönemli olması ve insan ve canlılıkların yaşam fonksiyonlarını tehdit etmesi hatta gelecek nesilleri bile etkilemesi radyasyondan korunma yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Bu yöntemlerden birisi ALARA (as low as reasonably achievable: makul ölçüde elde edilebilecek en düşük seviye) prensibidir. ALARA prensibinin üç temel unsuru vardır; zaman, mesafe ve zırhlama. Bu prensibe göre radyasyon kaynağı ile maksimum mesafe ve radyasyona maruziyet minimum olmalıdır. Bu şekilde vücuda alınan doz minimuma

inecektir. Bu iki değişken ayarlanabilir ve bazen mesleki vb. değişkenlerden kaynaklı sınırlandırılabilir olsa da radyasyondan korunmada en önemli parametre zırhlamadır (Aydın, 2019).

Zırhlayıcı materyal, radyasyon kaynağı ve canlı veya cansız radyasyondan korunması gereken materyalin arasına konulan ve duruma göre zırhlama özellikleri değişen bir materyaldir. Zırhlama özelliklerinin kullanılan bileşik ve materyallere göre değişmesi zırhlama için kullanılan materyali ilgi çekici kılar. Zırhlama materyali olarak ihtiyaç ve kullanım yerine göre kurşun, demir, tungsten, beton ve cam kullanılmaktadır. Maliyet, kullanışlılık ve zırhlayıcı özellikleri bakımından diğer materyallere göre üstün olan materyal kurşundur. Kurşun yüksek yoğunluğu, yüksek atom numarası, maliyetinin düşük olması, zırhlama özelliklerinin iyi olması kurşun ve kurşun katkı malzemelerin radyasyon zırhlamada yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır (Aydın, 2019) ancak kurşun toksik ve ağır bir metaldir ayrıca solunum yoluyla vücuda girebilir. Vücuda solunum yoluyla giren kurşun akciğerlerden kana karışmakta organlar tarafından absorbe edilmekte ve vücutta birirmektedir. Kurşunun vücutta birikmesi kurşun zehirlenmesine, davranış bozukluklarına, hipertansiyona, baş ve karın ağrılarına, felce, ölüme vb. rahatsızlıklara sebep olabilir (Uzun, 2021). Bu sebeple kurşun ve kurşun katkı materyaller dışındaki zırhlayıcı materyaller üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Radyasyon zırhlamada kullanılacak malzemenin seçimi, radyasyonun türüne göre farklılık gösterir. X ve gama ışını gibi yüksek enerjili fotonların azaltılması için malzeme tasarımında kullanılan bileşenlerin atom numaraları ve yoğunluklarının yüksek olması arzu edilirken, nötronların zırhlanmasında daha düşük yoğunluklu malzemeler tercih edilir. Gama ve X-ışınlarından korunmada beton, alaşım, ağır metal oksitli camlar ve kurşun gibi yüksek yoğunluklu malzemeler kullanılmaktadır (Singh vd., 2013; Singh ve Badiger, 2014; Oto vd., 2019; Singh vd., 2018; Tekin ve Kilicoglu, 2020; Issa vd., 2019; Rammah vd., 2020; Issa, 2016).

Camların zırhlayıcı materyal olarak kullanımı son dönemde yapılan çalışmalarla hız kazanmıştır. Camların saydam oluşu, ucuz maliyeti, kolay şekillendirilebilmesi, insan sağlığına zararlı etkisinin olmaması cam materyalleri diğer zırhlayıcı materyallere karşı üstün kılmaktadır (Aydın, 2019). Öte yandan, malzeme bilimleri ve fizik bilimi, nükleer

santraller ve tıbbi radyasyon tesisleri gibi çeşitli radyasyon alanlarında yüksek koruma yetkinlikleri sağlayabilecek üstün cam malzemelerin geliştirilmesine odaklanılmasını sağlamıştır (Sayyed vd., 2020; Kharita vd., 2012; Bulus vd., 2019). Cam materyalleri ilginç kılan bir diğer özellik çok bileşenli olmalarıdır. Cam yapısındaki kimyasal varyasyonların çeşitliliği, çok sayıda farklı cam sistemlerinin geliştirilmesine müsaade etmektedir. Son yıllarda, çok sayıda araştırma üstün özellikte cam radyasyon zırhları geliştirmeyi amaçlamıştır.

2.7. Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Parametreleri

Malzemelerin zırhlama özellikleri, radyasyona karşı koruma sağlama kapasitesini belirlemek amacıyla lineer zayıflatma katsayısı (Linear Attenuation Coefficient, LAC), kütle zayıflatma katsayısı (Mass Attenuation Coefficient, MAC), yarı değer kalınlığı (Half-Value Layer, HVL), onda değer kalınlığı (Tenth-Value Layer, TVL), ortalama serbest yol (Mean Free Path, mfp), etkin elektron yoğunluğu (Effective Electron Density, N_{eff}), etkin atom numarası (Effective Atomic Number, Z_{eff}), etkin iletkenlik (Effective Conductivity, C_{eff}), eşdeğer atom numarası (Equivalent Atomic Number, Z_{eq}), enerji yığılma faktörü (Exposure Build-Up Factor, EBF), enerji soğurma yığılma faktörü (Energy Absorption Build-Up Factor EABF) gibi fiziksel parametrelerle değerlendirilir. Bu parametreler, radyasyonun maddeyle olan etkileşim mekanizmalarına dayanır ve malzeme seçimi, tasarım ve radyasyon güvenliği açısından büyük önem taşır.

Lineer zayıflatma katsayısı, LAC, (μ), bir fotonun madde ile etkileşiminde enerjisini soğuran veya saçan süreçlerin toplamını ifade eder. Birim uzunluk başına gerçekleşen etkileşimlerin bir ölçüsüdür ve malzemenin kalınlığı, atom numarası ve yoğunluğu gibi faktörlere bağlıdır. LAC,

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{t} \quad (2.1)$$

ile hesaplanır burada t malzeme kalınlığı, I , t kalınlığındaki malzemeden geçen radyasyon şiddeti, I_0 malzemeye gelen radyasyon şiddetidir.

Kütle zayıflatma katsayısı, MAC, (μ_p) ise lineer katsayının malzemenin yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanır. Fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşumu gibi etkileşimlerin toplam katkısı, toplam zayıflatma katsayısını oluşturur. Bu katsayılar, radyasyonun madde içindeki davranışını analiz etmek için kritik öneme sahiptir (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982). MAC,

$$\text{MAC}, \mu_p = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln\left(\frac{1}{I_0}\right)}{t\rho} \quad (2.2)$$

ile hesaplanır. Burada ρ , g/cm³ cinsinden yoğunluk, μ , cm⁻¹ cinsinden LAC değeridir.

Yarı değer kalınlığı (HVL), radyasyon şiddetinin yarıya düşmesi için gereken malzeme kalınlığını ifade ederken, onda değer kalınlığı (TVL) bu oranı onda bire düşürmek için gereken kalınlıktır. Bu parametreler, radyasyon zırhlamasında kullanılan malzemelerin etkinliğini değerlendirmede temel göstergelerdir ve malzemenin lineer zayıflatma katsayısına bağlıdır (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982). Tek enerjili ışınlar için HVL, Beer-Lambert Yasası

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.3)$$

kullanılarak türetilir. Burada

$$I = \frac{I_0}{2} \quad (2.4)$$

alındığında,

$$\text{HVL} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.5)$$

formülüyle hesaplanır. Burada μ , cm⁻¹ cinsinden ölçülen lineer zayıflama katsayısıdır.

Ortalama Serbest Yol, MFP bir fotonun malzeme ile emilme veya saçılma olmadan kat ettiği ortalama mesafedir. Bu parametre, fotonların madde içerisinde ne kadar

ilerleyebileceğini ve çarpışmaların sıklığını belirler. Maddenin lineer zayıflatma katsayısı ile ters orantılıdır ve malzeme tasarımı açısından önemli bir veridir (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982).

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (2.6)$$

Etkin Elektron Yoğunluğu, N_{eff} birim kütle başına düşen elektron sayısını ifade eder. Elektron yoğunluğu, bir malzemenin radyasyonla etkileşim kapasitesini belirleyen temel faktörlerden biridir ve etkin atom numarası ile doğrusal bir ilişki içindedir. Elektronların radyasyonun zayıflatılmasındaki rolü, malzemenin karışım veya bileşik yapısına göre değişiklik gösterebilir (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982).

N_{eff} ,

$$N_{eff} = \rho \cdot \frac{\sum_i w_i Z_i}{A_i} \cdot N_A \quad (2.7)$$

ile hesaplanır. Burada ρ , yoğunluk, w_i , ağırlık fraksiyonu, Z_i , atom numarası, A_i , atom kütlesi ve N_A , Avogadro sayısıdır.

Etkin Atom Numarası, Z_{eff} , radyasyonun maddeyle etkileşimindeki karakteristik özelliklerini tanımlayan bir parametredir. Maddenin atom numarasıyla ilgili bilgiler sunar ve özellikle bileşik ya da karışımlardaki radyasyon davranışını anlamada önemlidir. Etkin atom numarası, foton enerjisine bağlı olarak değişir ve radyasyonun absorpsiyon ya da saçılma özelliklerini tahmin etmekte kullanılır. Fotoelektrik olay, Compton saçılımı gibi farklı etkileşim türlerinin her biri için kısmi etkin atom numarası hesaplanır ve bu değerler bir araya getirilerek toplam etkin atom numarası elde edilir (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982).

Etkin İletkenlik, C_{eff} , özellikle foton zırhlama ve dozimetri hesaplamalarında, malzemenin elektriksel iletkenliğinin radyasyon etkileşimleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır. C_{eff} , malzemenin elektron yoğunluğu ve atomik yapısıyla ilişkilidir ve genellikle gama veya X-ışını gibi iyonlaştırıcı radyasyonlarla etkileşimlerde dikkate alınır. C_{eff} , malzemenin dielektrik özellikleri, iletkenlik özellikleri ve radyasyon

absorpsiyon kapasitesini bir arada ele alarak, zırhlama performansını anlamada yardımcı olabilir. Yaklaşık olarak,

$$C_{eff} \propto \sigma \cdot N_{eff} \quad (2.8)$$

ifadesiyle tanımlanabilir. Burada σ , malzemenin elektriksel iletkenliği, N_{eff} etkin elektron yoğunluğudur.

Eşdeğer Atom Numarası, Z_{eq} , bir malzemenin radyasyonla etkileşim özelliklerini, özellikle Compton saçılması gibi baskın süreçleri, tek bir elementin atom numarasına eşdeğer bir şekilde ifade eder. Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) ile benzerlik gösterse de, Z_{eq} genellikle EBF ve EABF yığılma faktörleri hesaplamalarında kullanılmak üzere özel olarak tanımlanır. Z_{eq} , malzemenin bileşimine ve foton enerjisine bağlı olarak hesaplanır ve zırhlama malzemelerinin performansını karşılaştırmada kullanılır.

Yığılma faktörleri malzeme içerisindeki saçılma ve absorpsiyon süreçlerini dikkate alan bir parametrelerdir. Saçılmamış fotonlarla etkileşime giren fotonların toplam radyasyon şiddetine oranını ifade eder. İki tür yığılma faktörü vardır: Maruz Kalma Yığılma Faktörü (EBF) ve Enerji Soğurma Yığılma Faktörü (EABF). EBF, havadaki radyasyon etkileşimlerini ölçerken, EABF, malzeme içerisindeki radyasyon soğurma davranışını analiz eder. Bu faktörler karmaşıktır ve genellikle G-P (Geometrik Progresyon) uyum yöntemi veya Monte Carlo simülasyonları ile hesaplanır. Bu faktörler, zırhlama malzemelerinin tasarımı ve radyasyon güvenliği çalışmalarında önemli bir yere sahiptir (Kaewkhao vd., 2010; Sodhi vd., 2015; Issa, 2016; Hubbell, 1982).

Malzemelerin zırhlama parametreleri, radyasyon zırhlama malzemelerinin performansını belirlemek, uygun malzeme seçimi yapmak ve güvenli bir radyasyon koruma sistemi oluşturmak için temel bilimsel araçlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. TZCx camların sentezi

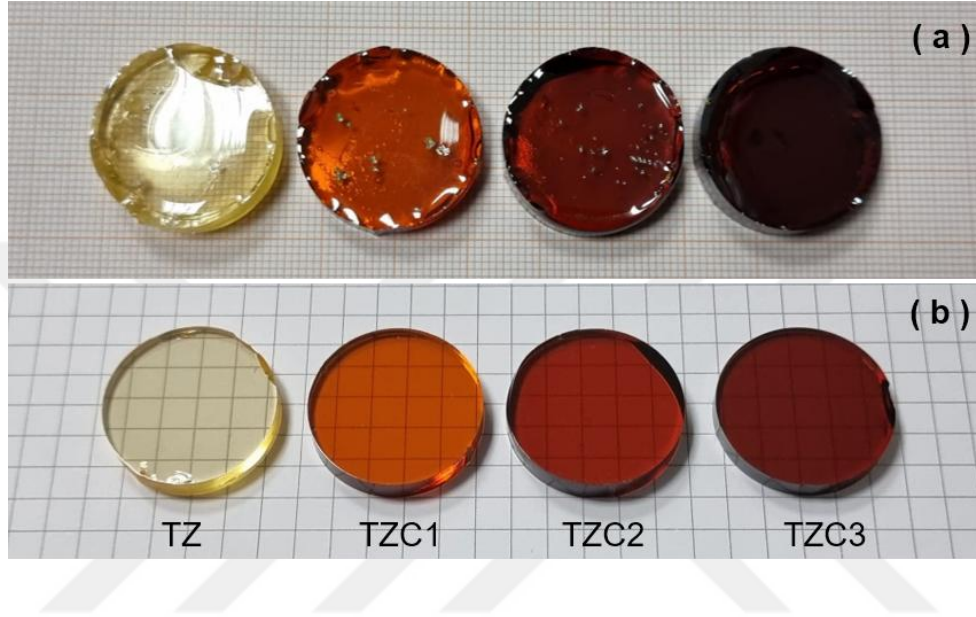
Tez çalışmasının deneysel kısımda tellür cam yapısı olarak çinko-tellür camlar seçilmiştir. Bu tellür camların oksiflorür olması kararlaştırılmış ve çinko oksidin yanında çinko florür de kullanılmıştır. Böylelikle temel cam yapısı $\%(100-x)(\%70\text{TeO}_2-\%20\text{ZnO}-\%10\text{ZnF}_2)-\%x\text{CeF}_3$ ($x=0, 1, 2, 3 \%$ mol) (TZCx) olarak belirlenmiştir. Bu camların sentezinde eritme-tavlama yöntemi tercih edilmiştir.

Her bir kompozisyon, toplam 0,15 mol olacak şekilde toplamda 22 g'lık toz karışımlar halinde, yüksek saflıktaki hammaddeler kullanılarak hazırlanmıştır. Alfa Aesar marka TeO_2 , ZnO , ZnF_2 ve CeF_3 bileşikleri, %99,9'dan fazla saflığa sahiptir. Kern marka hassas analitik terazi ile ayrı ayrı tartılan bileşikler homojen bir karışım elde etmek için kapalı bir kutuya konmuş ve iyice karıştırılmıştır. Ardından elde edilen bu karışım platin kroze, üstü kapalı olacak şekilde Nabertherm marka yüksek sıcaklık fırınında 900°C 'de 60 dakika boyunca erimeye bırakılmıştır. İşlem sırasında üzeri kapalı kroze kullanılmış ve bu sayede bileşenlerin buharlaşması minimuma indirip kayıp engellenerek, kompozisyonun doğruluğu korunmaya çalışılmıştır. Homojenliğin sağlanması amacıyla eriyik her 15 dakikada bir mekanik olarak karıştırılmıştır.

60 dakika sonunda platin kroze fırından çıkarılarak, eriyik 310°C 'ye önceden ısıtılmış çelik bir kalıba dökülmüş ve iç gerilmeleri önlemek için 1 saat boyunca 310°C 'de sabit tutulmuş bir tavlama fırınında bekletilmiştir. Tavlama işlemi tamamlandıktan sonra tavlama fırını kapatılmış ve numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Çelik kalıp sayesinde elde edilen cam numuneler, yaklaşık 2,5 cm çapında ve ortalama 5 mm kalınlığında madeni para şekline sahip olmuştur.

Optik şeffaflık ve yüzey homojenliğini sağlamak için numunelerin her iki yüzü 800 grit zımpata kağıdı kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparadan ötürü yüzeyde kalan çizikleri gidermek için 1200 ve 2000 grit zımparalarla tekrar zımparalan numunelerde yüzey çizikleri tamamen yok edilmiştir. Daha sonra parlatma işlemine geçilmiş ve Forcipol 1v cihazına ait

parlatma çuhasıyla elmas solüsyonlar parlatma işlemi için kullanılmıştır. Şekil 3.1.a'da işlenmemiş ham haldeki cam numuneler Şekil 3.1.b'de ise zımparalanmış ve parlatılmış cam numuneler görülmektedir. Katkılanmamış cam açık sarımsı bir renge sahipken, CeF_3 içeren camlar kompozisyona bağlı olarak açıktan koyuya doğru değişen kahverengi tonlar sergilemiştir. Camların nominal bileşimleri ve numune kodları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. TzCx cam numuneleri: (a) ham, (b) zımparalanmış ve parlatılmış halde

3.2. Sentez ve ölçüm cihazları

3.2.1. Yüksek sıcaklık fırını

Nabertherm LHT 16/17 LB, maksimum 1700°C sıcaklığa ulaşabilen, 16 litre iç hacme sahip ve asansör mekanizmalı (lift-bottom) bir yüksek sıcaklık fırınıdır (Şekil 3.2.). İnert gaz ortamında çalışmaya uygun gaz girişi özelliğine sahiptir. Fırın, 1700°C maksimum sıcaklık kapasitesine sahiptir ve hassas sıcaklık kontrolü için PID tabanlı bir kontrol sistemi ile donatılmıştır. 16 litre iç hacme sahip hazne, yüksek sıcaklıklara dayanıklı teknik seramik malzemelerden üretilir. Dört taraflı molydenum disilisit ısıtma elemanları (rezistans), homojen sıcaklık dağılımı sağlar ve yük ile kimyasal etkileşimi en aza indirir. Asansör mekanizması, motorlu bir dişli kayış sistemi ile çalışır ve yükleme-boşaltma işlemini yaklaşık 30 saniyede tamamlar. Çift duvarlı paslanmaz çelik gövde ve fan soğutma sistemi,

dış yüzey sıcaklığını düşük tutar. Yalıtım, yüksek kaliteli fiber malzemelerden oluşur. Kontrol ünitesi, 50 program ve 40 segment kapasitesiyle programlanabilir ısıtma basamakları sunar. Gaz girişi özelliği, manuel veya otomatik gaz besleme sistemiyle (solenoid valf ve rotametre ile) donatılabilir; bu sistem, hava, koruyucu gaz (örneğin nitrojen, argon) veya vakum atmosferlerinde çalışmayı destekler, ancak gaz geçirmez değildir.



Şekil 3.2. Yüksek sıcaklık fırını (1700°C)

Cihazın tepesinde bulunan paslanmaz çelik egzoz başlığı, gaz tahliyesini kolaylaştırır. Fırın, tip S termokupl kullanır. Uygulama alanları, teknik seramiklerin sinterlenmesi, zirkonyum oksit gibi dental malzemelerin işlenmesi, cam eritme, metal alaşımların ısıl işlemi ve ileri malzeme testlerini içerir. Gaz girişi sayesinde, oksidasyonu önlemek için koruyucu gaz atmosferinde çalışılması gereken süreçler (örneğin, metal tozlarının sinterlenmesi veya seramik kaplamaların üretimi) için uygundur. Laboratuvarlarda, Ar-Ge çalışmalarında ve küçük ölçekli üretimde kullanılır. Asansör mekanizması, hassas veya ağır yüklerin güvenli ve kolay yerleştirilmesini sağlar (Nabertherm, 2025).

3.2.2.Tavlama Fırını

Nevola Reis Serisi 1100°C laboratuvar fırını, 10 litrelik iç hacme sahiptir (Şekil 3.3.). Laboratuvar ve endüstriyel uygulamalarda yüksek sıcaklık işlemleri için uygundur. Isı odası, düşük ısı transfer katsayısına sahip fiber boardlar ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı izole tuğlalardan yapılmıştır; bu malzemeler homojen ısı dağılımını sağlar ve fiziksel darbelere karşı dayanıklılık sunar. Çift duvarlı yapı, dış yüzey sıcaklığını düşürerek kullanıcı güvenliğini artırır.



Şekil 3.3. Tavlama fırını (1100°C)

Fırın kapağı yukarı açılır şekilde tasarlanmış olup, kapak açıldığında elektriği kesen emniyet anahtarı ve yüksek sıcaklık koruma alarmı içerir. Isıtıcı elemanlar, 1100°C çalışma sıcaklığına uygun rezistanslardan oluşur. PID kontrol özellikli EVO serisi kontrol cihazı, sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirir, çalışma anında sapma sıcaklığı yaklaşık 1°C dir.

3.2.3. Parlatma cihazı

Metkon Forcimat 1V ve Forcimat bileşik cihazı, metalografik numune hazırlama süreçlerinde kullanılan bir zımparalama ve parlatma sistemidir (Şekil 3.4.). Forcimat 1V, tek diskli bir zımparalama ve parlatma cihazı olarak tasarlanmıştır ve 200, 250 veya 300 mm çapındaki disklerle çalışabilir. Cihaz, 0,75 kW gücünde bir elektrik motoruna sahiptir ve 50-600 rpm arasında değişken hız ayarı sunar. Bu özellik, farklı numune türleri ve hazırlama prosedürleri için uygun hızın seçilmesine olanak tanır. Motor, saat yönünde ve saat yönünün tersine dönebilme yeteneğine sahiptir. Yumuşak kalkış ve duruş fonksiyonları, işlem sırasında numunelerin zarar görmesini önler ve titreşimsiz bir çalışma sunar. Cihazın ergonomik tasarımı, kullanım kolaylığı sağlar ve standart su besleme ve tahliye boruları ile donatılmıştır. Forcimat 1V, manuel numune hazırlama işlemleri için uygun bir konfigürasyona sahiptir.

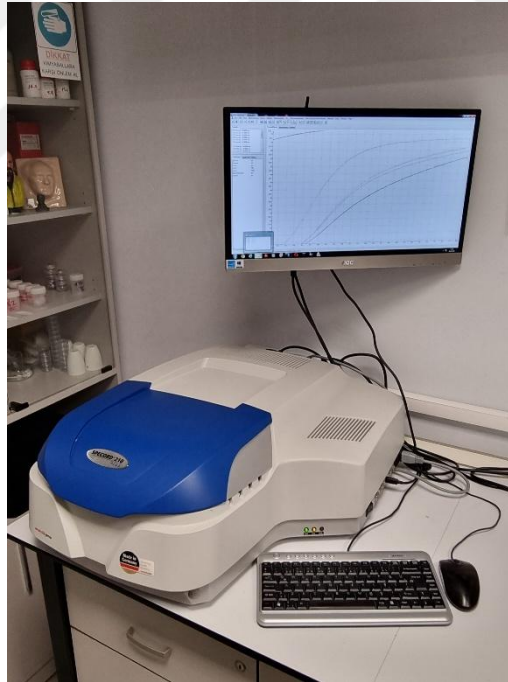


Şekil 3.4. Zımparalama - parlatma cihazı

Forcimat, Forcimat 1V ile entegre çalışabilen bir otomatik kafa ünitesidir ve numune hazırlama sürecini otomatikleştirir. Bu ünite, 25-50 mm veya 1-2 inç çaplı numune tutucularla çalışabilir ve aynı anda altı numuneyi hazırlayabilme kapasitesine sahiptir.

Pnömatik olarak uygulanan bireysel kuvvet, ön panelden ayarlanabilir, böylece farklı numune türleri için hassas kuvvet kontrolü sağlanır. Forcipol 1V ve Forcimat 52 kombinasyonu, manuel ve otomatik modlar arasında geçiş yapabilme esnekliği sunar. Soğutma suyu, işlem başında ve sonunda otomatik olarak devreye girip çıkar, bu da işlem verimliliğini artırır. Cihazın kontrol paneli, disk hızı, işlem süresi ve su akışı gibi parametrelerin kolayca ayarlanmasını sağlar. Dijital ekran, anlık disk hızını ve kalan işlem süresini gösterir. SiC zımpara kağıtları, yüksek sertlik ve aşınma direnci sayesinde metal, seramik ve kompozit gibi farklı malzeme türlerinin zımparalanmasında etkili bir performans sağlar. Genellikle 800 ila 2500 grit arasında değişen tane boyutlarındaki zımparalar cam numunelerin zımparalanması hatta ön parlatma için uygundur. Parlatma aşamasında ise kumaş ve kadife çuhalar elmas solüsyonlar ile birlikte kullanılmaktadır (Metkon, 2025).

3.2.4. UV-Vis Spektrofotometre



Şekil 3.5. UV-Vis spektrofotometre

Analytik Jena Specord 210 Plus, UV/Vis spektroskopisi için tasarlanmış çift ışınlı bir spektrofotometredir (Şekil 3.5.). 185-1200 nm dalga boyu aralığında çalışır ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Cihaz, 0,2; 0,5; 1; 2 ve 4 nm değişken bant genişlikleri sunar,

böylece yüksek optik çözünürlük gerektiren ölçümler için uygundur. Dalga boyu doğruluğu $\pm 0,1$ nm, absorbans kayması ise 500 nm’de $\pm 0,0005$ A/saat seviyesindedir. Kombine halojen ve döteryum lamba kaynakları, tüm dalga boyu aralığında yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Monokromatör, holografik ızgara ve asferik optiklerle donatılmıştır ve düşük saçılma ışığı için optimize edilmiştir. Dahili holmium oksit filtresi, otomatik dalga boyu kalibrasyonu sağlar. İki sıcaklık kontrollü dedektör (CDD), uzun süreli ölçüm stabilitesi sunar (Analytikjena, 2025).

3.2.5. Analitik Terazı

Kern ABT 100-5M, laboratuvar ortamlarında hassas tartım işlemleri için tasarlanmış bir analitik terazidir (Şekil 3.6.). Tek hücreli tartım sistemine sahiptir. Bu sistem, yüksek hassasiyet ve stabilite sağlar. Terazı, 0,00001 gram (10 µg) okunabilirlik sunar ve 100 gram maksimum tartım kapasitesine sahiptir. Analitik ve araştırma amaçlı tartımlar için uygundur, özellikle küçük numunelerin ölçümünde kullanılır. LCD ekranı, ölçülen değerlerin net bir şekilde okunmasını sağlar. Arkadan aydınlatmalı bu ekran, düşük ışık koşullarında bile rahat okuma imkanı sunar.



Şekil 3.6. Analitik terazi

Terazi, RS-232 veri arayüzüne sahiptir; bu sayede ölçüm verileri bir yazıcıya, bilgisayara veya başka bir cihaza aktarılabilir. Ayrıca, parça sayımı, yüzde tartımı ve alttan tartım gibi özellikler desteklenir. Otomatik kalibrasyon sistemi, sıcaklık değişimlerinde (2°C) veya her 4 saatte bir zaman kontrollü olarak devreye girer, böylece ölçüm doğruluğu korunur.

Cihaz yoğunluk belirleme gibi özel uygulamalar için yoğunluk kiti ile uyumludur. Yoğunluk kiti, katı, sıvı ve gözenekli maddelerin yoğunluğunu ölçmek için tasarlanmış bir aksesuardır. Bu kit, Arşimet prensibine dayalı kaldırma kuvveti (buoyancy) yöntemiyle çalışır. Yoğunluk kiti, tartım kefesinin yerine kolayca takılır ve destek plakası, cam deney şişeleri, termometre, yüzen ve yüzmeyen maddeler için tutucular ile bir şişe ısıtıcı madde içerir. Ölçüm işlemi sırasında numune önce havada, ardından bir referans sıvısında tartılır. Terazi, entegre yoğunluk uygulaması sayesinde ölçüm sürecini adım adım yönlendirir ve otomatik hesaplamalar yapar (Kern-Sohn, 2025).

3.2.6. XRD cihazı

Bruker D8 Advance, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri için tasarlanmış çok yönlü bir laboratuvar cihazıdır. Toz, kütle, ince film ve katmanlı numuneler üzerinde yüksek doğrulukla yapısal karakterizasyon yapabilen bu sistem, malzeme bilimi, kimya, farmasötik, metalurji ve mineraloji gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Cihaz, kristal yapı analizi, faz tanımlama, kalitatif ve kantitatif faz analizi, artık gerilim, doku, mikro-yapı analizi, X-ışını reflektometresi (XRR), küçük açılı X-ışını saçılması (SAXS) ve çift dağılım fonksiyonu (PDF) analizi gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

D8 Advance, farklı numune türlerini (sıvılar, tozlar, ince filmler, katı bloklar) tek bir cihazda analiz edebilme kapasitesine sahiptir. LYNXEYE XE-T gibi yüksek çözünürlüklü dedektörler ve EIGER2 R 500K gibi gelişmiş dedektör seçenekleri, üstün veri kalitesi sunar. DIFFRAC.SUITE yazılım paketi, veri toplama ve değerlendirme süreçlerini kolaylaştırır. Bu yazılım, yöntem planlama (WIZARD), yöntem yürütme (COMMANDER) ve veri analizi (EVA, DQUANT, TOPAS) gibi modüller içerir.

Cihaz, Bragg-Brentano geometrisinden yüksek çözünürlüklü paralel ışın $K_{\alpha 1}$ geometrisine kadar farklı ışın yolları arasında otomatik geçiş yapabilen TRIO optik sistemi kullanır. Bu, toz numunelerden epitaksiyel ince filmlere kadar geniş bir analiz yelpazesini destekler. Ayrıca, ortam ve ortam dışı koşullarda (örneğin, yüksek sıcaklık veya nem) analiz yapabilen çeşitli numune ortamları sunar (Bruker, 2025).

3.3. Karakterizasyon

Sentezlenen camlar için, yoğunluk hesaplamaları 20°C'de Arşimet prensibi yardımıyla gerçekleştirildi. Bu yöntemde daldırma sıvısı olarak yüksek saflıkta metanol kullanıldı. Numunelerin ağırlıkları önce havada, sonra sıvıda belirlendi ve her numunenin yoğunluğu aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$\rho_{\text{numune}} = \frac{W_A}{W_A - W_B} \rho_0 \quad (3.1)$$

Burada, W_A ve W_B numunenin havadaki ve sıvıdaki ağırlıklarıdır ve ρ_0 , kullanılan sıvının 20 °C'deki yoğunluğudur ($\rho_0 = 0,791 \text{ gcm}^{-3}$). Örneklerin molar hacim değerleri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$V_M = \frac{\sum x_i m_i}{\rho_{\text{numune}}} \quad (3.2)$$

Burada, m_i ve x_i sırasıyla ilgili örneğin ağırlığını ve mol oranını gösterir (Kılıç vd., 2020).

Numunelerin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla, numunelerin XRD ölçümleri Bruker D8 Advance cihazı ile 10 ile 90° arasında, 0,01° adım ve 18,8 s adım süresi ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi. XRD sayesinde, sentezlenen camların yapısal özellikleri hakkında bir fikir edinilebilir (Kılıç vd., 2020).

Numunelerin geçirgenlik ve absorpsiyon verileri, tarama ekipmanına sahip bir Analytik Jena SPECORD 210 UV-Vis Spektrofotometre kullanılarak 190-1100 nm dalga

boyu aralığında 23°C'de elde edilmiştir. Absorpsiyon spektrumu, tüm sentezlenen cam örneklerinin dolaylı geçiş optik bant aralıkları ve Urbach enerjilerini hesaplamak için kullanılmıştır.

Farklı dalga boyu ya da frekanslardaki fotonların enerjisi

$$E = h\nu \quad (3.3)$$

ile hesaplanır. Burada h Planck sabiti ve ν fotonun frekansıdır. Absorpsiyon katsayısı Lambert–Beer–Bouguer Yasası'ndan elde edilebilir ve hesaplama denklemi,

$$\alpha = \frac{A}{d} \quad (3.4)$$

dir. Burada A , UV-Vis spektrofotometreden elde edilen absorbans ve d numune kalınlığıdır. E_g optik bant aralığı olmak üzere ,absorpsiyon katsayısının foton enerjisine bağımlılığı Tauc tarafından şöyle tanımlanabilir:

$$(\alpha h\nu) \propto (h\nu - E_g)^2 \quad (3.5)$$

Bu denklik genel olarak dolaylı geçişler için şu şekilde yazılır:

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = C(h\nu - E_g) \quad (3.6)$$

C foton enerjisinden bağımsız bir sabittir. $(\alpha h\nu)^{1/2}$ nin foton enerjisine $(h\nu)$ bağlı çizilen grafiği Tauc grafiği (plot) olarak adlandırılır (Kılıç ve İşsever, 2020).

Optik ölçümlerde alınan veriler kullanılarak $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$ Tauc grafikleri her numune için ayrı ayrı çizilmiştir. Tauc grafikleri üzerindeki lineer bölümdeki veriler, Origin yazılımı kullanılarak bir çizgi ile örtüştürülmüş ve bu çizginin x eksenini $y=0$ da kestiği değerden optik bant aralıkları elde edilmiştir.

Urbach enerjileri, grafikteki soğurma kenarının eğimi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_u = \left[\frac{d(\ln \alpha)}{d(h\nu)} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

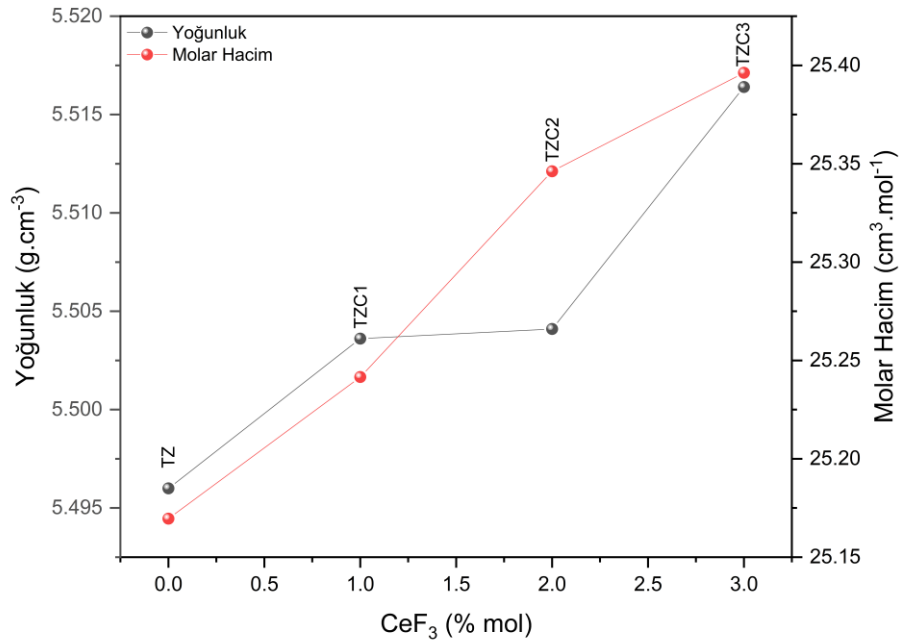
Bu formülde, E_u Urbach enerjisini belirtir, α absorpsiyon katsayısını temsil eder ve $h\nu$ foton enerjisini ifade eder (Kılıç ve İşsever, 2020). Urbach grafikleri üzerinde soğurma kenarını bir doğru ile örtüştürerek, doğrunun denklemini, R^2 ve eğim değerleri belirlenmiş ve Urbach enerjileri, bu eğimin tersinin (3.7) numaralı denklem kullanılmasıyla hesaplanmıştır.

Radyasyon zırlama parametrelerinin elde edilmesi için gerekli teorik veriler Phy-X/PSD programı kullanılarak toplanmıştır (Şakar, 2020). Phy-X/PSD programından elde edilen farklı enerji değerlerine ait veriler, daha sonra Origin programı kullanılarak grafiksel temsillere dönüştürülmüştür. Bu süreç, malzemelerin radyasyon koruma parametrelerinin çıkarılmasını ve yorumlanmasını kolaylaştırmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Fiziksel ve yapısal özellikler

4.1.1. Yoğunluk ve molar hacim



Şekil 4.1. TZCx camlarının CeF₃ konsantrasyonuna bağlı yoğunluk ve molar hacim değişimi

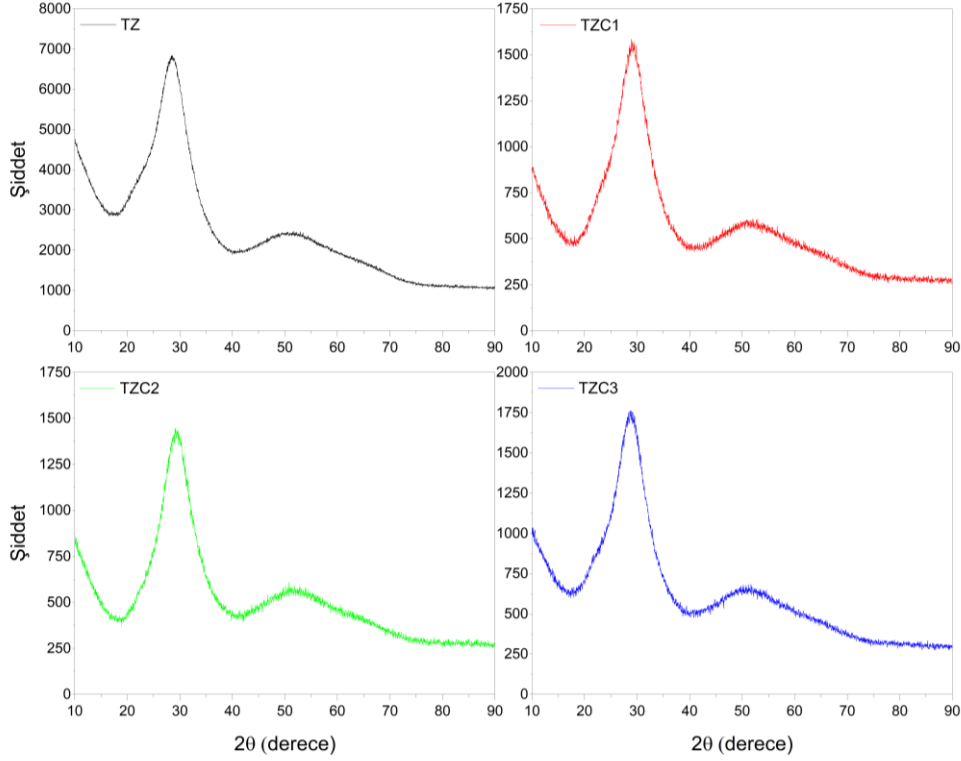
Sentezlenen cam numunelerine ait yoğunluk ve molar hacmin CeF₃ konsantrasyonuyla değişimini veren grafik Şekil 4.1.'de, değerler ise Çizelge 4.1.'de verilmiştir. CeF₃ ün cam ağına katılmasıyla numunelerdeki kompozisyon değişimi, camın yapısı ile fiziksel özellikleri olan yoğunluk ve molar hacim üzerinde belirgin değişimler yaratmıştır. CeF₃ konsantrasyonunun artışı ile hem yoğunluk hem de molar hacim sistematik bir şekilde artmıştır. Hesaplanan verilere göre, katkısız TZ numunesi için yoğunluk 5,496 g/cm³, molar hacim 25,166 cm³/mol iken, %3 mol CeF₃ içeren TZC3 numunesinde ise 5,516 g/cm³ ve 25,396 cm³/mol değerlerine yükselmiştir. Grafikten de anlaşılabacağı gibi

değerlerin, CeF_3 konsantrasyonu ile doğrusal bir değişim gösterdiği ve her ikisinin de artış eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Yoğunluktaki değişim CeF_3 'ün cam matrisine katkıda bulunduğu kütle ve hacim etkilerinden kaynaklanmaktadır. CeF_3 'ün yoğunluğu yaklaşık $6,16 \text{ g/cm}^3$, TeO_2 'nin $5,67 \text{ g/cm}^3$, ZnO 'nun $5,61 \text{ g/cm}^3$ ve ZnF_2 'nin $4,95 \text{ g/cm}^3$ 'tür. CeF_3 'ün yerini aldığı diğer cam bileşenlerinden daha yüksek yoğunluğa sahip olması her katkılı cam numunesinin yüksek yoğunluğa sahip olacağının kanıtıdır. Bu yüzden CeF_3 konsantrasyonunun artması camın ortalama yoğunluğunu arttırdığını düşündürmektedir. Bu, Ce^{+3} iyonunun ve F^- iyonlarının kütleli katkısının, daha düşük yoğunluklu bileşenleri domine etmesiyle açıklanabilir. Atomik hacimlere bakıldığında, seryum $20,67 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ile elementler içinde en yüksek değere sahiptir. F, Zn, O ve Te ise sırasıyla $17,1 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $9,16 \text{ cm}^3/\text{mol}$, $14,0 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ve $20,26 \text{ cm}^3/\text{mol}$ değerlerine sahiptir. Bu durum seryumun yapıya girmesiyle molar hacmi de arttırdığı anlamına gelir. Kütle artışının hacimsel artışla dengelenmesi yoğunluğun kayda değer oranlarda artışına engel olur. Ancak yine de yoğunlukta küçük bir oranda da olsa artış gerçekleşmiştir. Molar hacmin artışı elementlerin hacimleriyle ve ayrıca yapısal değişimlerle değerlendirilmelidir. Molar hacimdeki değişim cam ağ yapısındaki yapısal birimlerin ve katılan iyonların hacimsel durumlarından kaynaklanmaktadır. TeO_2 tabanlı camlarda, cam ağı $[\text{TeO}_4]$, $[\text{TeO}_3]$ ve $[\text{TeO}_{3+1}]$ gibi yapısal birimlerden oluşur (Şekil 2.2.). Te^{+4} iyonunun iyon yarıçapı yaklaşık $0,97 \text{ Å}$ 'dur. ZnO ve ZnF_2 yapıda ağ modifiye edici olarak yer alır. Zn^{+2} iyonunun iyonik yarıçapı $0,74 \text{ Å}$ ve F^- iyonunun yarıçapı $1,33 \text{ Å}$ 'dur. Cam ağına CeF_3 eklenmesiyle iyonik yarıçapı $1,01 \text{ Å}$ olan Ce^{+3} iyonları ve fazladan F^- iyonları cam ağına dâhil olur. F^- iyonlarının cam içinde artması, ağıdaki oksijen köprülerini kısmen kırarak veya yer değiştirerek, tellür ağının sıkı üç boyutlu yapısını bozar ve atomlar arasındaki mesafeleri artırır. Bu, yapısal birimlerin birbirleriyle olan bağlarının zayıflaması ve boşlukların artması anlamına gelir. Bu durum, molar hacmin artmasına neden olur.

Çizelge 4.1. TZCx camların bileşenleri, yoğunluk, molar hacim ve kalınlık değerleri

Numune kodu	TeO_2 (mol %)	ZnO (mol %)	ZnF_2 (mol %)	CeF_3 (mol %)	Yoğunluk (gcm^{-3})	Molar Hacim ($\text{cm}^3\text{mol}^{-1}$)	Kalınlık (cm)
TZ	70,0	20,0	10,0	-	5,49600	25,1696	0,3737
TZC1	69,3	19,8	9,9	1,0	5,50361	25,2416	0,4077
TZC2	68,6	19,6	9,8	2,0	5,50410	25,3462	0,4397
TZC3	67,9	19,4	9,7	3,0	5,51640	25,3962	0,3554

4.1.2. XRD



Şekil 4.2. TZCx camlarının X- Işını kırınımı (XRD) spektrumları

TZ taban yapı ve CeF_3 katkılı TZCx kodlu cam numunelerinin X-ışını kırınımı (XRD) desenleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. 2θ kırınım açısına (10° - 90°) karşı şiddet olarak çizilen desenler, camların yapı olarak amorf olduğunu ortaya koymaktadır. Tellür camlarının karakteristik geniş dağılım tümsekleri, XRD desenlerinin ana özelliğini oluşturmaktadır.

Hem katkısız hem de CeF_3 ile katkılanmış tüm numuneler, 25° - 30° ve 50° - 55° civarında geniş amorf tümseklerle kısa menzilli düzenler sergilemektedir. TeO_2 ağındaki TeO_4 üçgen çift piramitleri ve TeO_{3+1} çokyüzlüleri bir rastgele ağ oluşturmaktadır. Geniş tümsekler yapı içindeki kısa menzilli bu yapısal birimlere karşılık gelmektedir. CeF_3 katkısı tellür cam ağını değiştirmekte ancak kristalleşme oluşturmamaktadır.

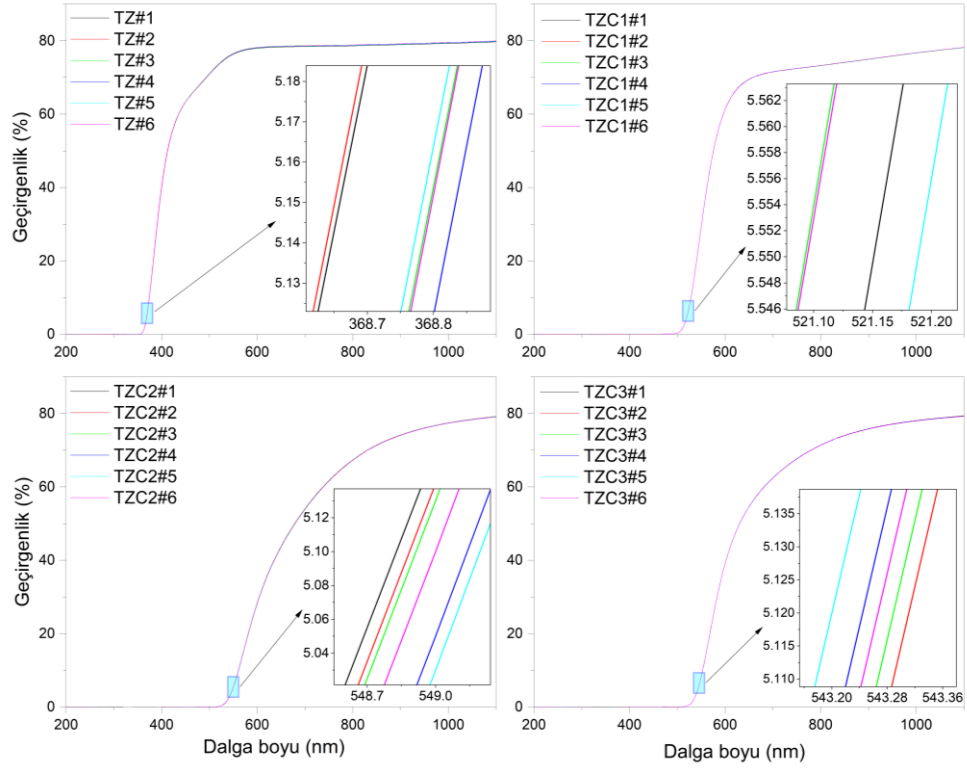
4.2. Optik Özellikler

4.2.1. UV-Vis bölgede Geçirgenlik ve Absorpsiyon

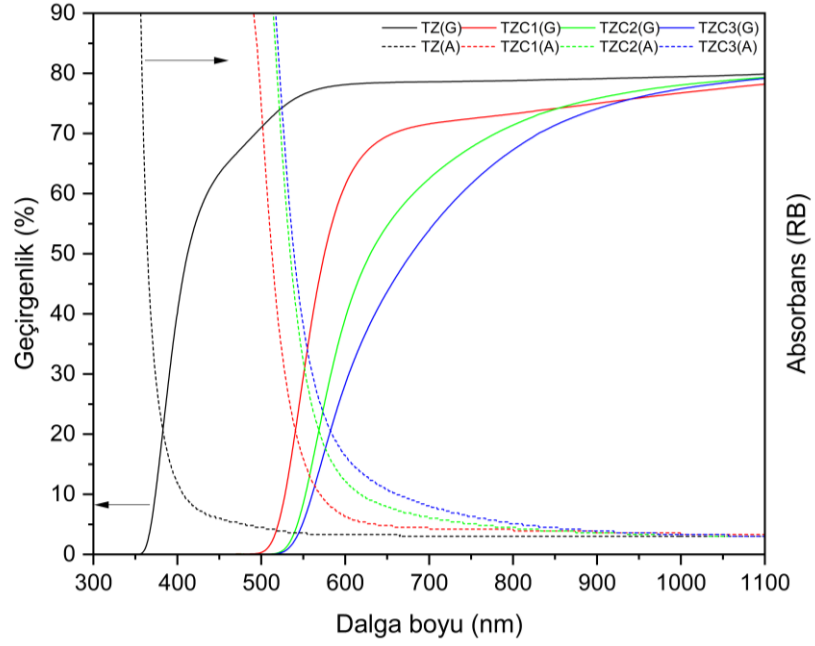
Şekil 4.3.'de verilen grafikler, sentezlenen dört cam numunesinin (TZ, TZC1, TZC2 ve TZC3) geçirgenlik-dalga boyu özelliklerini göstermektedir. Grafikler her bir numunenin altı farklı noktasından alınan ölçümlerden elde edilmiştir. Şekil 4.4. ise 4 numunenin absorpsiyon-dalga boyu, geçirgenlik-dalga boyu grafiklerini bir arada vermektedir ve camdaki CeF_3 değişimiyle absorpsiyon kenarının yer değiştirmesini incelemek için çizilmiştir.

Grafikler, her numune için yaklaşık 200 ila 1000 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik spektrumlarına karşılık gelmektedir. Her numune için numunenin altı farklı bölgesinden alınan ölçümler (#1, #2, #3, #4, #5, #6) absorpsiyon kenarında çok küçük değişkenlikler göstermektedir. Bu küçük değişimler, cam yapısının yüksek oranda homojen olduğunu ve ölçümlerin tutarlılığını yansıtır. Her bir numune için bu altı ölçümde absorpsiyon kenarındaki yaklaşık 0,1-0,3 nm aralığındaki ihmal edilebilecek kadar az olan kaymalar gözlenmiştir. Bu kaymalar cam numunelerdeki kusurların ışığın emilimini önemli ölçüde etkilemediğini gösterir.

Katkısız TZ numunesi için absorpsiyon kenarı (Şekil 4.4.) yaklaşık 365 nm civarında yer almaktadır ve geçirgenlik yaklaşık 3,737 mm kalınlığındaki camda 550 nm üzeri için yaklaşık %80 civarındadır. Bu durum, katkısız TeO_2 - ZnO - ZnF_2 cam matrisine özgü keskin bir geçişe karşılık gelir. CeF_3 'ün cam ağına girmesiyle absorpsiyon kenarı belirgin biçimde uzun dalga boyuna yani kırmızıya kaymaktadır. TZC1 numunesi için absorpsiyon kenarı yaklaşık 515 nm'ye kaymış ve geçirgenlik 4,077 mm 'lik cam kalınlığında 600 nm dalga boyunda %70, daha yüksek dalga boylarında yaklaşık %80'e ulaşmıştır. Bu kırmızıya kayma TZC2'de daha belirgin hale gelmiştir. TZC2 de absorpsiyon kenarı yaklaşık 529 nm de yer alır ve TZC3'te 532 nm değerine ulaşır. Absorpsiyon kenarındaki kırmızıya kayma, CeF_3 ile yapıda yer alan seryum iyonlarının (Ce^{+3} veya Ce^{+4}) camın elektronik yapısını değiştirmesiyle açıklanabilir. Ce^{+3} iyonları, 4f-5d elektronik geçişleriyle cam ağına yeni enerji seviyeleri oluşturur. Bu seviyeler, bant aralığını azaltarak daha uzun dalga boylarında absorpsiyonu sağlar.



Şekil 4.3. TZCx camlarının geçirgenlik-dalga boyu grafikleri

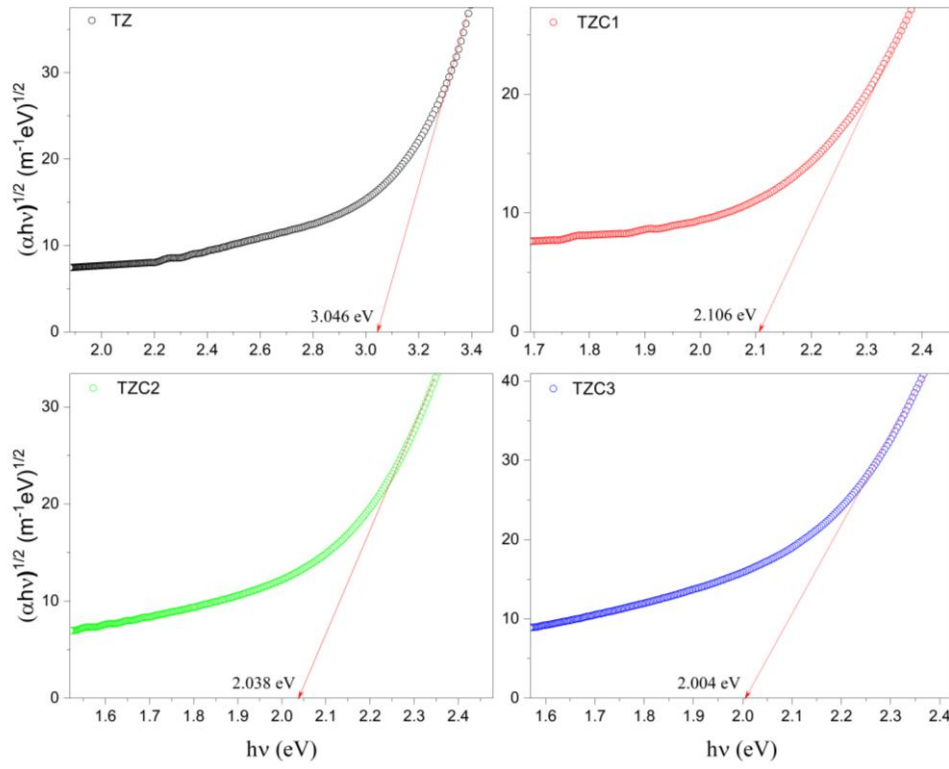


Şekil 4.4. TZCx camlarının absorpsiyon / geçirgenlik-dalga boyu grafikleri

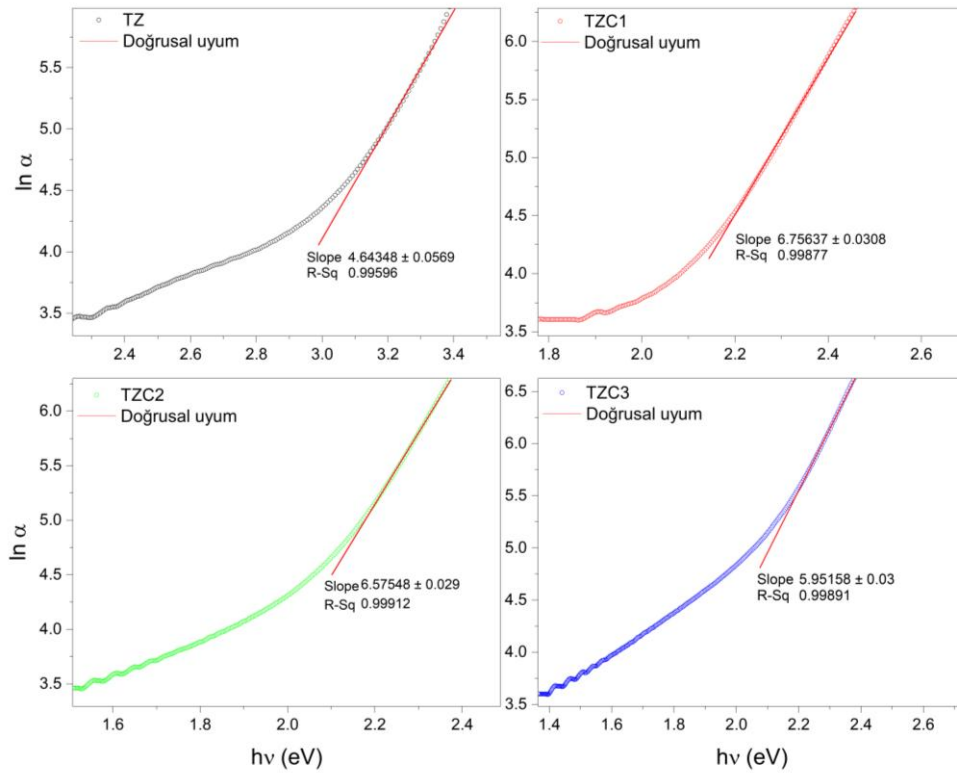
4.2.2. Optik Bant Aralığı (E_g) ve Urbach enerjisi (E_u)

Şekil 4.5. ve Şekil 4.6., TZ, TZC1, TZC2 ve TZC3 numunelerine ait dolaylı bant aralığı enerjilerini belirlemek için Tauc grafiklerini ve Urbach enerjilerini belirlemek için $\ln(\alpha)-(h\nu)$ grafiklerini göstermektedir. Tauc grafikleri yardımıyla belirtilen dolaylı bant aralıkları TZ, TZC1, TZC2 ve TZC3 için sırasıyla 3,046 eV; 2,106 eV; 2,038 eV ve 2,004 eV 'dur. Optik bant aralığı, CeF_3 içeriğinin artmasıyla 3,046 eV'den, 2,004 eV'ye kadar düzenli bir şekilde azalmıştır ve bu, yüksek bir azalma olarak kabul edilebilir. Bu büyük azalma, cam ağında CeF_3 'ten gelen Ce^{+3} veya muhtemel Ce^{+4} iyonlarının varlığıyla elektronik yapıda bir değişimin meydana geldiğini gösterir. Özellikle Ce^{+3} iyonları, 4f elektronları ile bant aralığında yeni yerel durumlar oluşturabilir. Oksijen ya da flor ligandları valans bandını yukarı taşıyabilir. Tellür camlarda, nadir toprak elementi katkısı genellikle bağ yapmayan oksijenlerin (non-bridging oxygen NBO) oluşumuna neden olur. Bu elektronik geçişler için gereken enerjinin azalarak bant aralığının daralması anlamına gelir.

Urbach grafiklerinden grafiğin doğrusal kenarındaki verilerin 0,995 ten büyük R^2 ($R-Sq$) değerleriyle örtüştüğü doğruya ait eğimlerin hesaplanmasıyla enerji değerleri bulunmuştur. Bu eğimlerin tersinden elde edilen enerji değerleri TZ, TZC1, TZC2 ve TZC3 numuneleri için sırasıyla 0,2154 eV; 0,1480 eV; 0,1521 eV ve 0,1680 eV olarak bulunmuştur. Urbach enerjisi, bant kuyruklarının genişliğini ve yapısal düzensizlik derecesini gösterir. TZ için 0,2154 eV olan Urbach enerjisi, TZC1'de 0,1480 eV ile dört numune içinde en düşük değere düşmüştür. TZC2'de bu değer 0,1521 eV'ye tekrar hafifçe yükselmiş ve TZC3'te 0,1680 eV'ye tekrar artmıştır. CeF_3 'ün %1 mol eklenmesiyle Urbach enerjisindeki ani düşüş, yapısal düzensizlikte azalmaya karşılık gelir. Bu, Ce^{+3} iyonlarının cam ağındaki düzenleyici etkisinden kaynaklanabilir. Düşük orandaki katkılamada, seryum iyonları Ce-O-Te veya Ce-F-Te bağları oluşturarak ağın yapısını değiştirdiği düşünülebilir. Böylece boşlukların azalmasına ve düzenin sağlanmasına neden olabilir. Ancak, CeF_3 oranı %2 ve %3 mol'e yükseldiğinde Urbach enerjisindeki artış, yapının tekrar düzensiz hale gelmeye başladığını gösterir. Bu düzensizlik, seryum iyonlarının kümelenmesi, faz ayrışması veya Ce-F ya da Ce-O-F komplekslerinin oluşumuyla cam ağının homojenliğini bozmasından kaynaklanabilir. Nadir toprak elementi iyonu katkılı camlarda gözlenebilen bu durum aşırı katkılama, iyon-iyon etkileşimleri veya ağ parçalanması yoluyla düzensizliği artırır.



Şekil 4.5. TZCx camlarına ait Tauc grafikleri



Şekil 4.6. TZCx camlarının Urbach enerjilerini belirlemek için $\ln \alpha \sim h\nu$ grafikleri

Çizelge 4.2. TZCx camların optik bant aralıkları (E_g) ve Urbach parametreleri

Numune kodu	E_g (eV)	Urbach Parametreleri		
		Doğru Denklemi	Eğim	E_u (eV)
TZ	3,046	$y = -9,81994 + 4,64348 \cdot x$	$4,64348 \pm 0,0569$	0,2154
TZC1	2,106	$y = -10,35 + 6,75637 \cdot x$	$6,75637 \pm 0,03087$	0,1480
TZC2	2,038	$y = -9,31668 + 6,57548 \cdot x$	$6,57548 \pm 0,02972$	0,1521
TZC3	2,004	$y = -7,53966 + 5,95158 \cdot x$	$5,95158 \pm 0,03109$	0,1680

Bant aralığındaki azalma, camın görünürden yakın kızılötesine kadar olan bölgesinde, optik amplifikatörler veya sensörler gibi uygulamalar için kullanım alanı yaratır. Daha düşük enerjilerde elektronik geçişlere olanak tanır. Ancak, yüksek CeF_3 konsantrasyonlarında Urbach enerjisinde gözlenen artış, düzensizlikten ötürü meydana gelen optik kayıpların yükselmesi anlamına gelir ve bu sentezlenen camın optik verimini sınırlandırabilir. Seryumun oksijenli bileşiğinin katkılındığı tellür camlar üzerine yapılan çalışmalar, $x = \%1$ mol gibi optimum düzeydeki katkı seviyelerinin, bant aralığı daralması ile minimum düzensizlik arasında bir denge sağladığını göstermektedir (İlik vd., 2022). Düşük miktarlardaki katkılar, düşük bant aralığı ve az kusur yoğunluğu gerektiren fotonik uygulamalar için en iyi performansı sunmaktadır. Sonuç olarak, CeF_3 içeriği arttıkça TZCx camların optik bant aralığındaki azalma, Ce ile ilişkili elektronik durumların ve ağ değişikliklerinin bir sonucudur. Urbach enerjisi ise düşük orandaki katkılarda dengeleyici bir etkiyi, yüksek konsantrasyonlarda ise artan düzensizliği yansıtır.

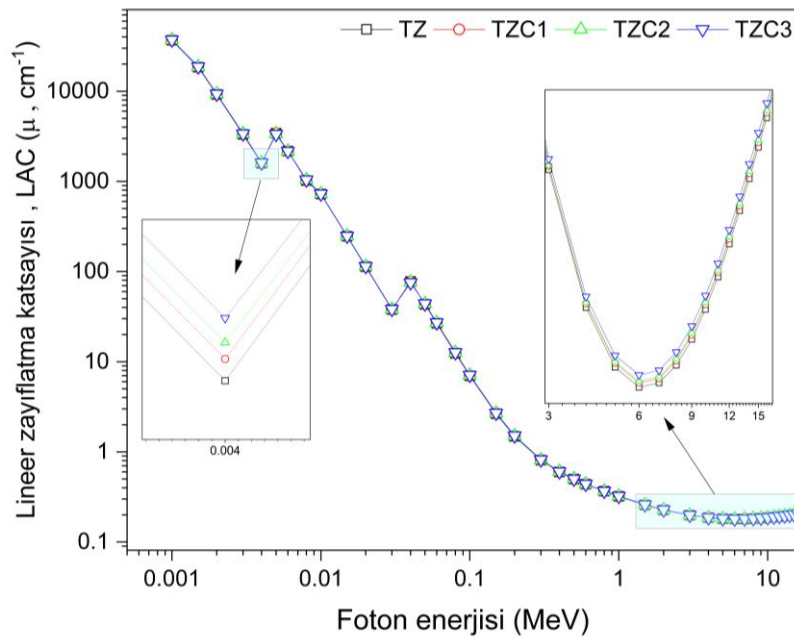
4.3. Radyasyon zırlama özellikleri

Foton madde etkileşim mekanizmasında birim uzunluk başına gerçekleşen etkileşimlerin bir ölçüsü olan lineer zayıflatma katsayısı (LAC) ile bir fotonun madde ile etkileşiminde enerjisini soğuran veya saçan süreçlerin toplamını ifade eden kütle zayıflatma katsayısı (MAC), malzemelerin radyasyon zırlama kabiliyetleri hakkında bilgi alabildiğimiz iki önemli parametredir.

İncelenen TZ, TZC1, TZC2 ve TZC3 malzemeleri için elde edilen lineer ve kütle zayıflatma katsayılarına ait grafiklerde (Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.), 0,001 MeV ile 0,1 MeV

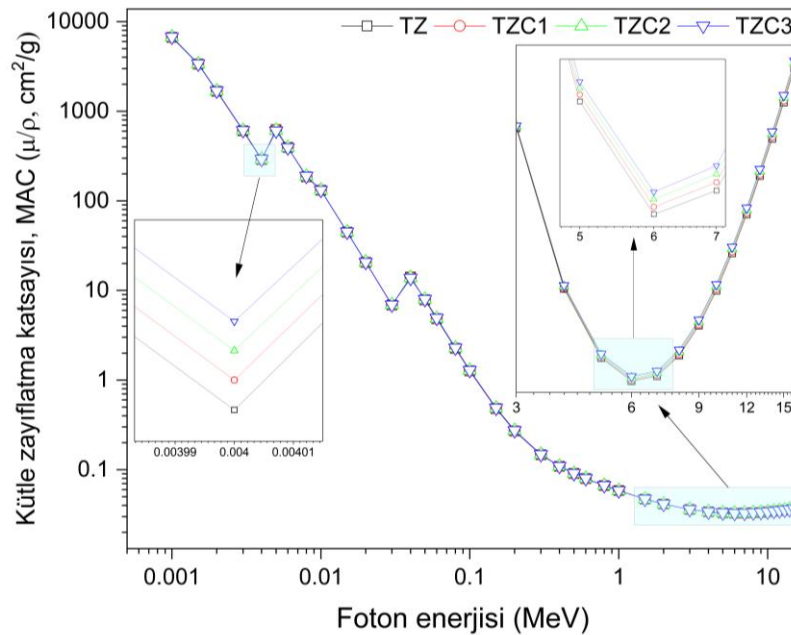
arasındaki düşük enerji aralığında iki belirgin pik gözlenmektedir. Düşük enerjili fotonların madde ile etkileşim mekanizmasında fotoelektrik olay, gerçekleşme olasılığı en yüksek olan etkileşim türüdür ve bu düşük enerjili bölgede gözlenen pikler, düşük enerjili fotonların malzeme ile daha güçlü etkileşimlere girdiğini ve bu enerjilerde daha fazla zayıflama sağladığını göstermektedir. Özellikle bu düşük enerjili etkileşimler, fotoelektrik etkinin baskın olduğu enerji seviyelerine denk gelir. Bu süreç, fotonların enerjisinin büyük bir kısmını malzeme içinde absorbe ederek, zırlama verimliliğini artırır.

0,001 MeV’de TZ numunesi için LAC değeri $36655,238 \text{ cm}^{-1}$ iken, TZC3 numunesi için $37225,854 \text{ cm}^{-1}$ ’dir (Çizelge 4.3.). Bu artış, seryumun yüksek atom numarası ($Z^{\text{Ce}}=58$) nedeniyle fotoelektrik soğurmanın artışından kaynaklanır. 0,004 MeV’deki pik tellürün L3 kenarına karşılık gelen piktir. 0,03 MeV’de ise tellürün K-kenarı gözlenmektedir ve LAC’da ikinci bir keskin pik olarak ortaya çıkar. 0,015 MeV’de TZ ve TZC3 numuneleri için LAC değerleri sırasıyla $245,69282 \text{ cm}^{-1}$ ve $248,18331 \text{ cm}^{-1}$ tür. Bu enerji değerinde numuneler arası farklar küçülür, çünkü Compton saçılması baskın hale gelir; bu süreçte fotonlar elektronlarla çarpışarak enerji kaybeder ve Z bağımlılığı azalır. 1 MeV’de dört numune arasındaki LAC farkı daha da düşer ve 15 MeV gibi yüksek enerjilerde tüm numuneler için yaklaşık $0,2 \text{ cm}^{-1}$ civarında stabilize olur; bu bölgede çift oluşumu baskındır.



Şekil 4.7. TZCx numunelerine ait LAC – foton enerjisi değişimi grafiği

0,004 MeV’de L3 kenarında TZ, TZC1, TZC2, TZC3 numuneleri için MAC değerleri sırasıyla 288,39595 cm²/g, 289,67062 cm²/g, 290,93455 cm²/g, 292,18788 cm²/g olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.3.). CeF₃ katkısı MAC’ta hafif bir artış sağlar; bu, tellürün L3 soğurma kenarında fotoelektrik etkileşimin artmasından kaynaklanır. Tellürün K-kenarı 0,03 MeV’de MAC değerleri 6,88034 cm²/g dan 6,93109 cm²/g’a artar, ancak numuneler arasında farklar daha azdır. Seryum (Z^{Ce}=58), tellür (Z^{Te}=52) ile birlikte toplam Z’yi yükselterek MAC’ı artırır. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim baskındır ve MAC, Z’ye bağlı olarak değişir; CeF₃ katkısı bu bölgede soğurma performansını güçlendirir. 0,1 MeV’de MAC değerleri TZ için 1,26613 cm²/g, TZC3 için 1,28788 cm²/g dir. Bu bölgede değerler azalır ve numuneler arasındaki farklar minimaldir. 1-15 MeV aralığında MAC değerleri daha da düşer; 15 MeV’de TZ için MAC değeri 0,03639 cm²/g iken TZC3 için 0,03649 cm²/g ’dır ve çift oluşumu baskındır ve bu enerjilerde artık CeF₃ etkisi ihmal edilebilir hale gelir. CeF₃ katkısı, düşük enerjilerde MAC’ı artırarak camların zayıflatma performansını iyileştirir; bu, özellikle düşük enerjili X-ışınları ve gama radyasyonu kalkını olarak potansiyellerini artırır. Orta ve yüksek enerjilerde ise numuneler arasında anlamlı fark gözlenmemektedir. Fotonların enerjisi arttıkça bu zayıflama oranları azalan bir trend izlemekle birlikte yüksek enerjili bölgede 15 MeV’de TZC3 malzemesi, incelenen malzemeler arasında en yüksek lineer ve kütle zayıflatma değerlerine sahiptir.



Şekil 4.8. TZCx numunelerine ait MAC – foton enerjisi değişimi grafiği

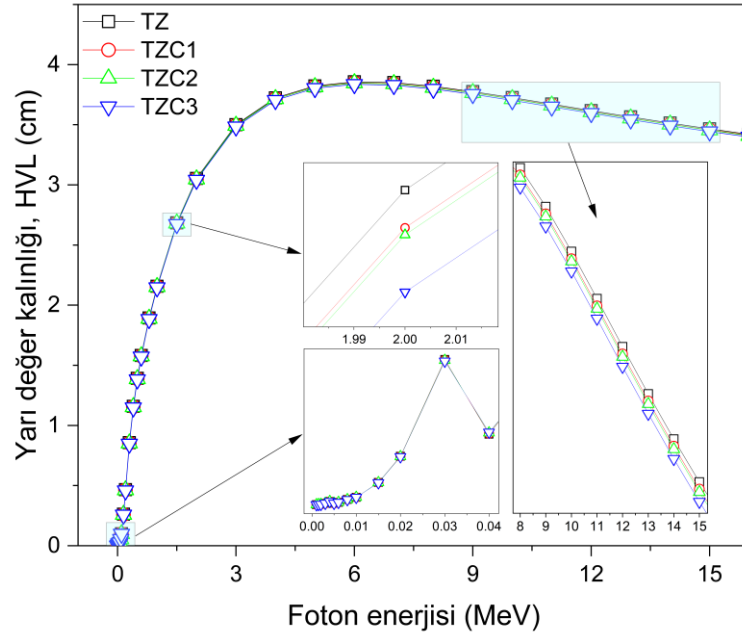
Çizelge 4.3. Her bir numune için foton enerjisine karşılık MAC ve LAC değerleri

Enerji (MeV)	MAC (cm ² /g)				LAC (cm ⁻¹)			
	TZ	TZC1	TZC2	TZC3	TZ	TZC1	TZC2	TZC3
0,001	6669,439	6695,920	6722,178	6748,215	36655,23	36851,73	36999,53	37225,85
0,0015	3354,469	3365,751	3376,939	3388,033	18436,16	18523,78	18587,01	18689,74
0,002	1673,152	1679,422	1685,639	1691,804	9195,642	9242,883	9277,926	9332,669
0,003	604,520	607,068	609,595	612,100	3322,441	3341,065	3355,269	3376,589
0,004	288,396	289,671	290,935	292,188	1585,024	1594,234	1601,333	1611,825
0,005	622,751	616,946	611,189	605,481	3422,641	3395,429	3364,047	3340,075
0,006	393,773	393,292	392,815	392,342	2164,176	2164,526	2162,094	2164,317
0,008	185,372	186,572	187,761	188,941	1018,804	1026,818	1033,458	1042,275
0,01	131,305	131,575	131,844	132,109	721,653	724,140	725,680	728,769
0,015	44,704	44,800	44,895	44,990	245,692	246,562	247,109	248,183
0,02	20,581	20,628	20,674	20,720	113,115	113,529	113,794	114,301
0,03	6,880	6,897	6,914	6,931	37,814	37,961	38,057	38,235
0,04	14,150	14,003	13,857	13,712	77,767	77,066	76,271	75,644
0,05	7,849	7,891	7,934	7,976	43,135	43,431	43,669	43,999
0,06	4,836	4,863	4,891	4,918	26,578	26,766	26,919	27,128
0,08	2,256	2,269	2,282	2,295	12,398	12,487	12,560	12,659
0,1	1,266	1,273	1,281	1,288	6,959	7,009	7,049	7,104
0,15	0,481	0,484	0,486	0,489	2,645	2,662	2,676	2,695
0,2	0,270	0,272	0,273	0,274	1,486	1,495	1,501	1,510
0,3	0,147	0,148	0,148	0,148	0,809	0,812	0,814	0,818
0,4	0,109	0,109	0,109	0,109	0,598	0,600	0,601	0,603
0,5	0,091	0,091	0,091	0,091	0,498	0,499	0,500	0,502
0,6	0,080	0,080	0,080	0,080	0,438	0,439	0,440	0,441
0,8	0,067	0,067	0,067	0,067	0,366	0,367	0,367	0,368
1	0,058	0,058	0,059	0,059	0,321	0,322	0,322	0,323
1,5	0,047	0,047	0,047	0,047	0,258	0,259	0,259	0,259
2	0,041	0,041	0,041	0,041	0,227	0,227	0,227	0,228
3	0,036	0,036	0,036	0,036	0,198	0,198	0,198	0,199
4	0,034	0,034	0,034	0,034	0,186	0,187	0,187	0,187
5	0,033	0,033	0,033	0,033	0,181	0,182	0,182	0,182
6	0,033	0,033	0,033	0,033	0,180	0,180	0,180	0,181
7	0,033	0,033	0,033	0,033	0,180	0,180	0,181	0,181
8	0,033	0,033	0,033	0,033	0,181	0,182	0,182	0,183
9	0,033	0,033	0,033	0,033	0,184	0,184	0,184	0,185
10	0,034	0,034	0,034	0,034	0,186	0,186	0,187	0,187
11	0,034	0,034	0,034	0,034	0,189	0,189	0,189	0,190
12	0,035	0,035	0,035	0,035	0,192	0,192	0,192	0,193
13	0,035	0,035	0,035	0,035	0,194	0,195	0,195	0,196
14	0,036	0,036	0,036	0,036	0,197	0,198	0,198	0,199
15	0,036	0,036	0,036	0,036	0,200	0,200	0,201	0,201
16	0,037	0,037	0,037	0,037	0,203	0,203	0,203	0,204

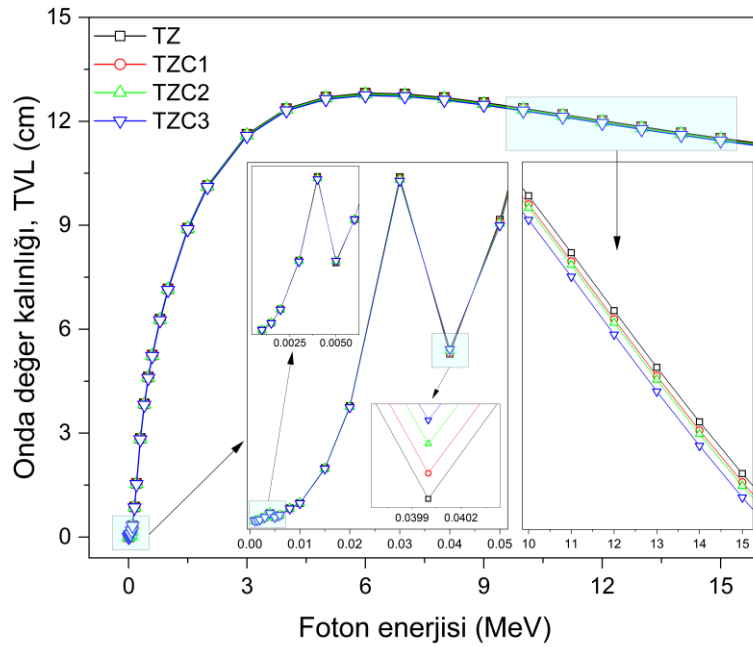
Gelen foton şiddetinin yarı değerine ve onda bir değerine inmesini sağlayan kalınlık olarak tanımlanan ve bir malzemenin radyasyonu zırlama kabiliyeti bakımından değerlendirebildiğimiz diğer iki önemli parametre de yarı-değer (HVL) ve onda-değer (TVL) kalınlık parametreleridir. İncelenen malzemelerin yarı-değer ve onda-değer parametrelerine ait grafiklerde (Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.), 0,001 MeV ile 0,1 MeV arasındaki düşük enerji seviyelerinde iki pik gözlemlenirken, 15 MeV’de her iki parametrede de en düşük değerler TZC3 malzemesinde elde edilmiştir. Bu, TZC3’ün yüksek enerjili fotonları daha az kalınlıkla etkili bir şekilde zayıflattığını ve bu malzemenin zırlama kapasitesinin yüksek enerjili fotonlar karşısında daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

HVL yoğunluğa ve bileşime bağlıdır. 0,001 MeV’de TZ için $1,89099 \cdot 10^{-5}$ cm, TZC3 için $1,862 \cdot 10^{-5}$ cm’dir (Çizelge 4.4.). HVL çok düşük değerde olduğundan CeF_3 katkılama bile numuneler arasındaki farklar Şekil 4.9.’da görüldüğü gibi ayırt edilemeyecek düzeydedir. Farklar az da olsa CeF_3 , fotoelektrik etkileşimi güçlendirerek HVL’yi azaltır, çünkü bu bölgede fotonlar tamamen ve çok kısa mesafelerde soğurulur. 0,015 MeV’de TZ için 0,00282 cm, TZC3 için 0,00279 cm olan HVL tüm numuneler için artar, CeF_3 etkisi ise belirgindir. Compton saçılması baskın olduğundan, CeF_3 camın elektron yoğunluğunu artırarak saçılma olasılığını yükseltir ve katkılanma oranına göre HVL’yi düşürür. 0,2 MeV-1 MeV aralığında HVL tüm numuneler için yine artış eğilimindedir. Ancak bu artış yaklaşık 6 MeV’den sonra azalma eğilimine döner. 15 MeV’de TZ için HVL 3,46571 cm, TZC3 için HVL 3,44351 cm değerindedir. TZC3’ün HVL değeri tüm numunelere göre daha düşüktür, bu da CeF_3 sayesinde oluşan yoğunluk artışının yüksek enerjilerde bile bir miktar iyileşme sağladığını gösterir. Şekil 4.9. 1,99-2,01 MeV aralığında cam ağında CeF_3 konsantrasyonunun artışı ile ters orantılı olarak HVL’nin azaldığı görülmektedir. Ağa CeF_3 katkısı her enerjide HVL değerini düşürmektedir. Yapısal olarak, CeF_3 camın ağ yapısını yoğunlaştırır, seryum ve flor iyonları amorf yapıda yerel düzenlemeler oluşturabilir ve tüm enerji aralıklarında HVL’yi düşürür. TZC3, en düşük HVL değeri ile en iyi performansı sergiler; düşük ve orta enerjilerde radyasyon kalkanı olarak umut vericidir. Aynı özellikler TVL içinde gözlenmiş ve Şekil 4.10.’da ekli grafiklerle daha rahat görülmesi için verilmiştir.

İncelenen malzemeler arasında TZC3’ün düşük yarı-değer ve onda-değer kalınlıkları, bu malzemenin daha ince kalınlıklarla daha yüksek zırlama sağlayabilen bir malzeme olma potansiyeline işaret etmektedir.



Şekil 4.9. TZCx numunelerine ait yarı değer kalınlığı – foton enerjisi değişimi grafiği



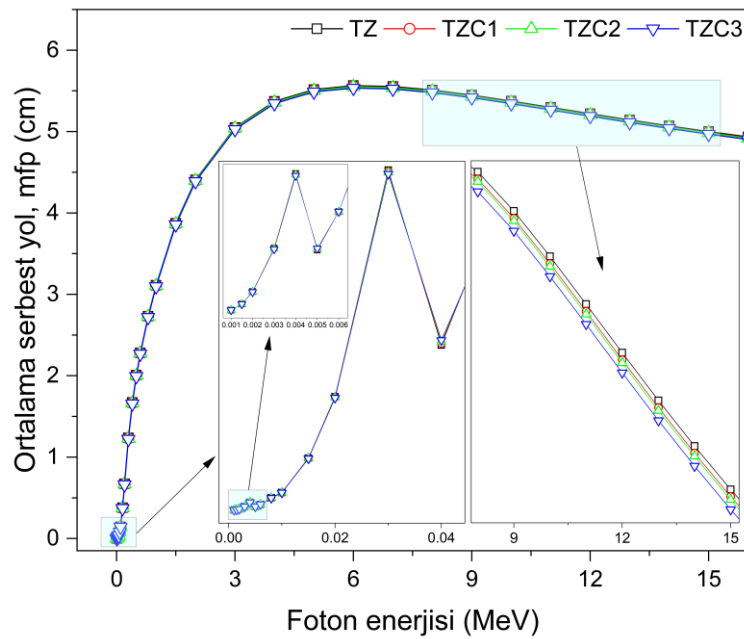
Şekil 4.10. TZCx numunelerine ait onda değer kalınlığı – foton enerjisi değişimi grafiği

Çizelge 4.4. Her bir numune için foton enerjisine karşılık HVL ve TVL değerleri

Enerji (MeV)	HVL (cm)				TVL (cm)			
	TZ	TZC1	TZC2	TZC3	TZ	TZC1	TZC2	TZC3
0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
0,008	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003
0,015	0,003	0,003	0,003	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009
0,02	0,006	0,006	0,006	0,006	0,020	0,020	0,020	0,020
0,03	0,018	0,018	0,018	0,018	0,061	0,061	0,061	0,060
0,04	0,009	0,009	0,009	0,009	0,030	0,030	0,030	0,030
0,05	0,016	0,016	0,016	0,016	0,053	0,053	0,053	0,052
0,06	0,026	0,026	0,026	0,026	0,087	0,086	0,086	0,085
0,08	0,056	0,056	0,055	0,055	0,186	0,184	0,183	0,182
0,1	0,100	0,099	0,098	0,098	0,331	0,329	0,327	0,324
0,15	0,262	0,260	0,259	0,257	0,871	0,865	0,860	0,854
0,2	0,466	0,464	0,462	0,459	1,549	1,541	1,534	1,524
0,3	0,857	0,854	0,851	0,847	2,847	2,836	2,828	2,814
0,4	1,159	1,155	1,153	1,149	3,849	3,838	3,831	3,816
0,5	1,391	1,388	1,386	1,382	4,622	4,611	4,605	4,590
0,6	1,582	1,578	1,577	1,572	5,254	5,242	5,238	5,222
0,8	1,893	1,890	1,889	1,884	6,289	6,278	6,274	6,257
1	2,157	2,153	2,152	2,147	7,164	7,152	7,149	7,131
1,5	2,685	2,681	2,680	2,673	8,919	8,905	8,902	8,880
2	3,054	3,049	3,048	3,040	10,144	10,127	10,124	10,100
3	3,500	3,494	3,493	3,484	11,628	11,608	11,603	11,573
4	3,723	3,716	3,714	3,704	12,367	12,345	12,338	12,306
5	3,823	3,816	3,814	3,803	12,700	12,676	12,669	12,634
6	3,857	3,850	3,847	3,836	12,813	12,788	12,779	12,744
7	3,850	3,842	3,839	3,828	12,790	12,764	12,754	12,718
8	3,820	3,812	3,809	3,798	12,688	12,662	12,652	12,615
9	3,776	3,768	3,765	3,754	12,543	12,517	12,506	12,470
10	3,725	3,717	3,714	3,703	12,376	12,349	12,338	12,301
11	3,672	3,664	3,661	3,650	12,199	12,172	12,161	12,125
12	3,618	3,610	3,607	3,596	12,019	11,992	11,981	11,945
13	3,565	3,557	3,554	3,543	11,843	11,816	11,805	11,768
14	3,514	3,506	3,503	3,492	11,674	11,647	11,636	11,600
15	3,466	3,458	3,454	3,444	11,513	11,486	11,475	11,439
16	3,420	3,412	3,409	3,398	11,362	11,336	11,324	11,288

Gelen foton ile malzeme etkileşime girdiği sırada, malzeme içerisindeki atomik yapı ile hiçbir çarpışma yapmadan fotonun serbest olarak ilerleyebildiği mesafe ortalama serbest yol (MFP) olarak tanımlanır ve malzemeleri radyasyon zırhlama alanında kullanıp kullanamayacağımızı gösteren bir diğer önemli parametredir.

İncelenen dört malzeme için elde edilen ortalama serbest yol grafiğinde (Şekil 4.11.), 0,001 MeV ile 0,1 MeV arasındaki iki pik fotoelektrik etkileşimin düşük enerjilerde daha baskın olmasının göstergesi olup, yüksek enerjili bölgede 15 MeV’de en düşük ortalama serbest yol değeri TZC3 malzemesinde gözlemlenmektedir (Çizelge 4.5.). Düşük ortalama serbest yol değeri, fotonların malzeme içinde daha kısa mesafeler kat ederek daha fazla zayıfladığını gösterir. Bu da TZC3’ün yüksek enerjili fotonlar için daha etkili bir zırhlama sağlayabileceğini ve fotonların malzeme içinde daha kısa mesafelerde enerjilerini kaybettiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. TZCx numunelerine ait ortalama serbest yol – foton enerjisi değişimi grafiği

Çizelge 4.5. Her bir numune için foton enerjisine karşılık MFP değerleri

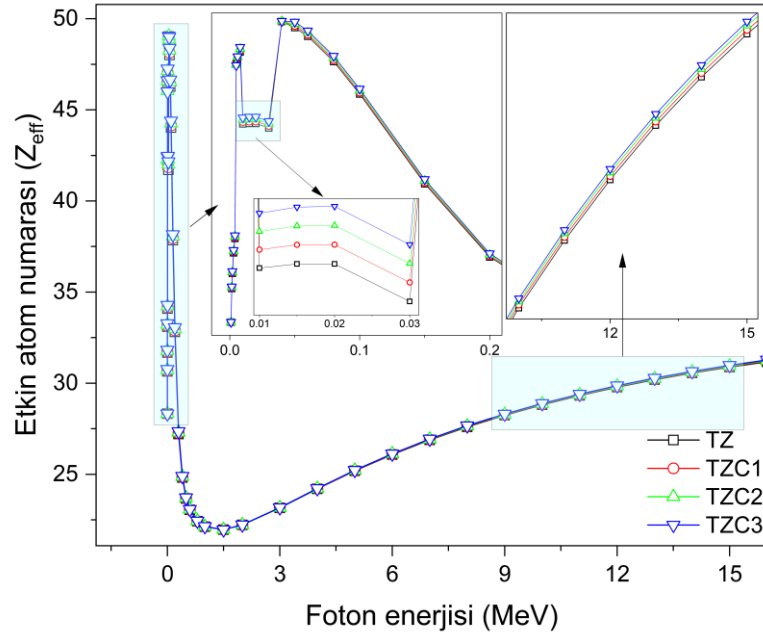
Enerji (MeV)	MFP (cm)			
	TZ	TZC1	TZC2	TZC3
0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0015	0,000	0,000	0,000	0,000
0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
0,004	0,001	0,001	0,001	0,001
0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
0,008	0,001	0,001	0,001	0,001
0,01	0,001	0,001	0,001	0,001
0,015	0,004	0,004	0,004	0,004
0,02	0,009	0,009	0,009	0,009
0,03	0,026	0,026	0,026	0,026
0,04	0,013	0,013	0,013	0,013
0,05	0,023	0,023	0,023	0,023
0,06	0,038	0,037	0,037	0,037
0,08	0,081	0,080	0,080	0,079
0,1	0,144	0,143	0,142	0,141
0,15	0,378	0,376	0,374	0,371
0,2	0,673	0,669	0,666	0,662
0,3	1,236	1,231	1,228	1,222
0,4	1,672	1,667	1,664	1,657
0,5	2,007	2,002	2,000	1,993
0,6	2,282	2,277	2,275	2,268
0,8	2,731	2,726	2,725	2,717
1	3,111	3,106	3,105	3,097
1,5	3,873	3,867	3,866	3,857
2	4,405	4,398	4,397	4,386
3	5,050	5,041	5,039	5,026
4	5,371	5,361	5,358	5,344
5	5,516	5,505	5,502	5,487
6	5,565	5,554	5,550	5,534
7	5,554	5,543	5,539	5,523
8	5,510	5,499	5,495	5,479
9	5,448	5,436	5,431	5,415
10	5,375	5,363	5,358	5,342
11	5,298	5,286	5,282	5,266
12	5,220	5,208	5,203	5,188
13	5,143	5,132	5,127	5,111
14	5,070	5,058	5,053	5,038
15	5,000	4,988	4,984	4,968
16	4,934	4,923	4,918	4,903

Bir malzemenin radyasyonla etkileşimdeki atomik numarasını ifade eden etkin atom numarası (Z_{eff}), malzemenin fotonlarla etkileşim kapasitesini belirler.

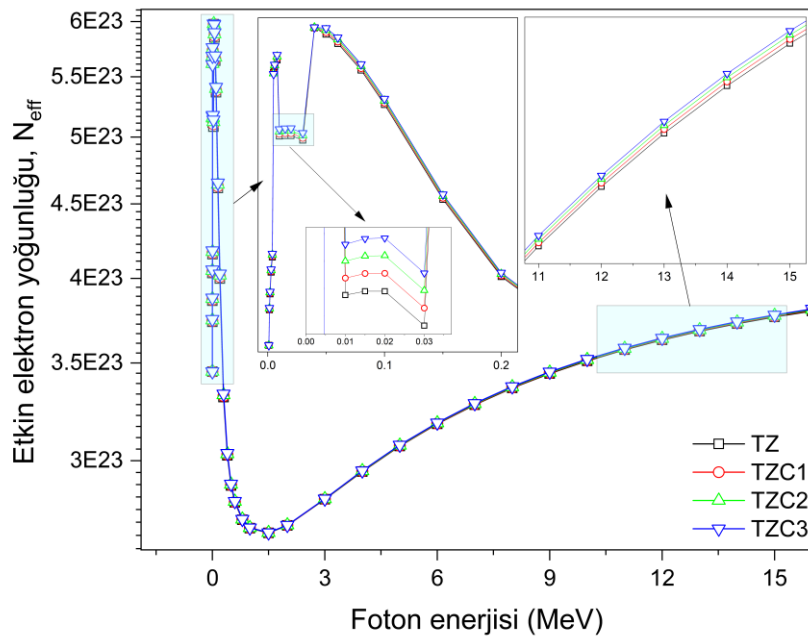
İncelenen dört malzemeye ait etkin atom numarası grafiğinde, 0,001 MeV ile 0,1 MeV arasındaki düşük enerji aralığında iki belirgin pik gözlenmiştir (Şekil 4.12.) ve 0,1 MeV ile 1 MeV arasında bir düşüş ile birlikte 10 MeV'e kadar bir artışın gözlemlendiği bir trend görülmektedir.

0,001 MeV'de TZ için Z_{eff} 28,32531; TZC3 için 28,32941 değerlerine sahiptir. Çok az da olsa CeF_3 belirtilen enerji değerinde Z_{eff} 'in artmasına katkıda bulunmuştur. 0,015 MeV'de Z_{eff} TZ için yaklaşık 42,00542; TZC3 için 42,45779 değerlerine ulaşmıştır. Burada şekilden de görüleceği gibi yine CeF_3 etkisi kendisini göstermiştir. 0,04 MeV'de tüm numuneler için Z_{eff} değeri maksimuma (yaklaşık 49) ulaşır. 1,5 MeV'de ise Z_{eff} değerleri yaklaşık 21,96 ile minimuma ulaşır. Bir elektron pozitron çifti oluşumu için gerekli olan minimum enerji değeri olan 1,022 MeV enerji değerinden sonra artık çift oluşum baskın olmaya başlar ve Şekil 4.12. 'de görüldüğü gibi 15 MeV e kadar Z_{eff} değerlerinde düzenli bir artış söz konusudur.

Benzer şekilde etkin atom numarası ile paralel bir eğilim gösteren etkin elektron yoğunluğu parametresi, malzemenin fotonla etkileşimini gösteren bir diğer önemli parametredir. Etkin elektron yoğunluğu grafiği (Şekil 4.13.), etkin atom numarası için elde edilen grafik ile aynı trendi izlemektedir ve özellikle 15 MeV'de en yüksek değeri TZC3 malzemesinde görülmektedir (Çizelge 4.6.). Bu, TZC3'ün fotonlarla etkileşimde hem atom numarası hem de elektron yoğunluğu açısından daha güçlü bir etkileşim sağladığını ve bu durumun zırhlama kapasitesini artırdığına işaret etmektedir.



Şekil 4.12. TZCx numunelerine ait Z_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği

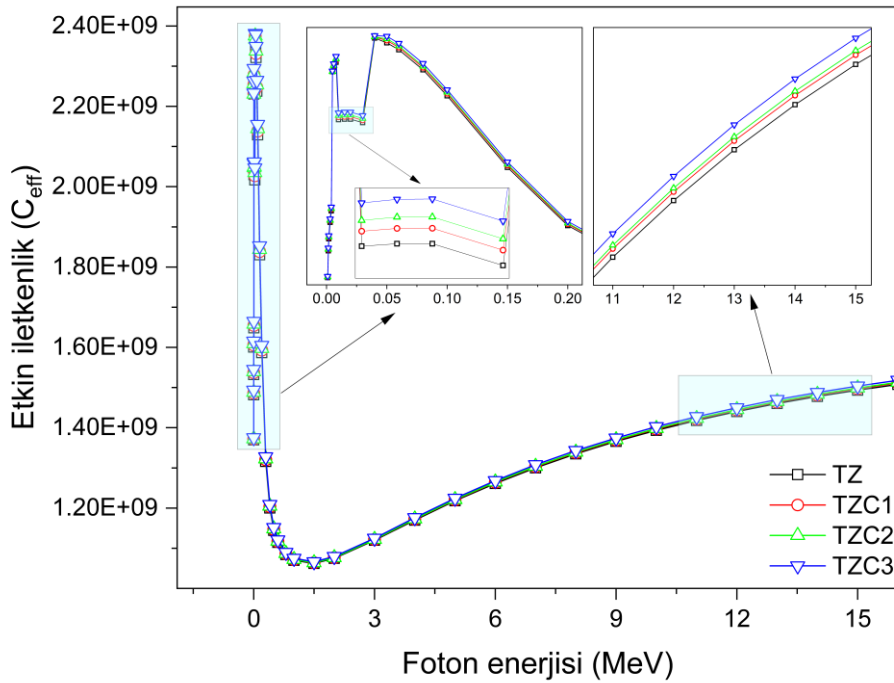


Şekil 4.13. TZCx numunelerine ait N_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği

Çizelge 4.6. Her bir numune için foton enerjisine karşılık Z_{eff} ve N_{eff} değerleri

Enerji (MeV)	Z_{eff}				N_{eff}			
	TZ	TZC1	TZC2	TZC3	TZ	TZC1	TZC2	TZC3
0,001	28,33	28,33	28,33	28,33	$3,45.10^{23}$	$3,45.10^{23}$	$3,45.10^{23}$	$3,45.10^{23}$
0,0015	30,64	30,68	30,72	30,76	$3,74.10^{23}$	$3,74.10^{23}$	$3,75.10^{23}$	$3,75.10^{23}$
0,002	31,68	31,73	31,78	31,83	$3,86.10^{23}$	$3,87.10^{23}$	$3,87.10^{23}$	$3,88.10^{23}$
0,003	33,10	33,16	33,22	33,27	$4,03.10^{23}$	$4,04.10^{23}$	$4,05.10^{23}$	$4,06.10^{23}$
0,004	34,09	34,16	34,22	34,29	$4,16.10^{23}$	$4,16.10^{23}$	$4,17.10^{23}$	$4,18.10^{23}$
0,005	46,12	46,08	46,04	46,00	$5,62.10^{23}$	$5,62.10^{23}$	$5,61.10^{23}$	$5,61.10^{23}$
0,006	46,50	46,54	46,58	46,62	$5,67.10^{23}$	$5,67.10^{23}$	$5,68.10^{23}$	$5,68.10^{23}$
0,008	46,93	47,04	47,15	47,25	$5,72.10^{23}$	$5,73.10^{23}$	$5,75.10^{23}$	$5,76.10^{23}$
0,01	41,97	42,12	42,26	42,41	$5,12.10^{23}$	$5,13.10^{23}$	$5,15.10^{23}$	$5,17.10^{23}$
0,015	42,01	42,16	42,31	42,46	$5,12.10^{23}$	$5,14.10^{23}$	$5,16.10^{23}$	$5,18.10^{23}$
0,02	42,01	42,16	42,31	42,46	$5,12.10^{23}$	$5,14.10^{23}$	$5,16.10^{23}$	$5,18.10^{23}$
0,03	41,71	41,86	42,01	42,16	$5,08.10^{23}$	$5,10.10^{23}$	$5,12.10^{23}$	$5,14.10^{23}$
0,04	49,02	49,03	49,04	49,05	$5,98.10^{23}$	$5,98.10^{23}$	$5,98.10^{23}$	$5,98.10^{23}$
0,05	48,61	48,74	48,87	48,99	$5,93.10^{23}$	$5,94.10^{23}$	$5,96.10^{23}$	$5,97.10^{23}$
0,06	48,01	48,13	48,26	48,39	$5,85.10^{23}$	$5,87.10^{23}$	$5,88.10^{23}$	$5,90.10^{23}$
0,08	46,27	46,40	46,52	46,65	$5,64.10^{23}$	$5,66.10^{23}$	$5,67.10^{23}$	$5,69.10^{23}$
0,1	44,03	44,15	44,27	44,39	$5,37.10^{23}$	$5,38.10^{23}$	$5,40.10^{23}$	$5,41.10^{23}$
0,15	37,85	37,96	38,06	38,16	$4,61.10^{23}$	$4,63.10^{23}$	$4,64.10^{23}$	$4,65.10^{23}$
0,2	32,81	32,89	32,98	33,06	$4,00.10^{23}$	$4,01.10^{23}$	$4,02.10^{23}$	$4,03.10^{23}$
0,3	27,21	27,26	27,30	27,35	$3,32.10^{23}$	$3,32.10^{23}$	$3,33.10^{23}$	$3,33.10^{23}$
0,4	24,82	24,85	24,87	24,90	$3,03.10^{23}$	$3,03.10^{23}$	$3,03.10^{23}$	$3,04.10^{23}$
0,5	23,67	23,69	23,70	23,72	$2,88.10^{23}$	$2,89.10^{23}$	$2,89.10^{23}$	$2,89.10^{23}$
0,6	23,05	23,06	23,07	23,08	$2,81.10^{23}$	$2,81.10^{23}$	$2,81.10^{23}$	$2,81.10^{23}$
0,8	22,42	22,43	22,44	22,44	$2,73.10^{23}$	$2,73.10^{23}$	$2,74.10^{23}$	$2,74.10^{23}$
1	22,13	22,13	22,13	22,14	$2,70.10^{23}$	$2,70.10^{23}$	$2,70.10^{23}$	$2,70.10^{23}$
1,5	21,96	21,96	21,96	21,97	$2,68.10^{23}$	$2,68.10^{23}$	$2,68.10^{23}$	$2,68.10^{23}$
2	22,22	22,23	22,23	22,23	$2,71.10^{23}$	$2,71.10^{23}$	$2,71.10^{23}$	$2,71.10^{23}$
3	23,16	23,16	23,17	23,17	$2,82.10^{23}$	$2,82.10^{23}$	$2,82.10^{23}$	$2,83.10^{23}$
4	24,20	24,20	24,21	24,22	$2,95.10^{23}$	$2,95.10^{23}$	$2,95.10^{23}$	$2,95.10^{23}$
5	25,19	25,20	25,21	25,23	$3,07.10^{23}$	$3,07.10^{23}$	$3,07.10^{23}$	$3,08.10^{23}$
6	26,08	26,10	26,11	26,13	$3,18.10^{23}$	$3,18.10^{23}$	$3,18.10^{23}$	$3,19.10^{23}$
7	26,89	26,90	26,92	26,94	$3,28.10^{23}$	$3,28.10^{23}$	$3,28.10^{23}$	$3,28.10^{23}$
8	27,61	27,63	27,65	27,67	$3,37.10^{23}$	$3,37.10^{23}$	$3,37.10^{23}$	$3,37.10^{23}$
9	28,24	28,27	28,29	28,31	$3,44.10^{23}$	$3,45.10^{23}$	$3,45.10^{23}$	$3,45.10^{23}$
10	28,82	28,84	28,86	28,89	$3,51.10^{23}$	$3,52.10^{23}$	$3,52.10^{23}$	$3,52.10^{23}$
11	29,33	29,35	29,38	29,40	$3,57.10^{23}$	$3,58.10^{23}$	$3,58.10^{23}$	$3,58.10^{23}$
12	29,78	29,81	29,84	29,87	$3,63.10^{23}$	$3,63.10^{23}$	$3,64.10^{23}$	$3,64.10^{23}$
13	30,19	30,22	30,25	30,28	$3,68.10^{23}$	$3,68.10^{23}$	$3,69.10^{23}$	$3,69.10^{23}$
14	30,56	30,59	30,62	30,65	$3,72.10^{23}$	$3,73.10^{23}$	$3,73.10^{23}$	$3,74.10^{23}$
15	30,88	30,92	30,95	30,98	$3,76.10^{23}$	$3,77.10^{23}$	$3,77.10^{23}$	$3,78.10^{23}$
16	31,17	31,21	31,24	31,27	$3,80.10^{23}$	$3,80.10^{23}$	$3,81.10^{23}$	$3,81.10^{23}$

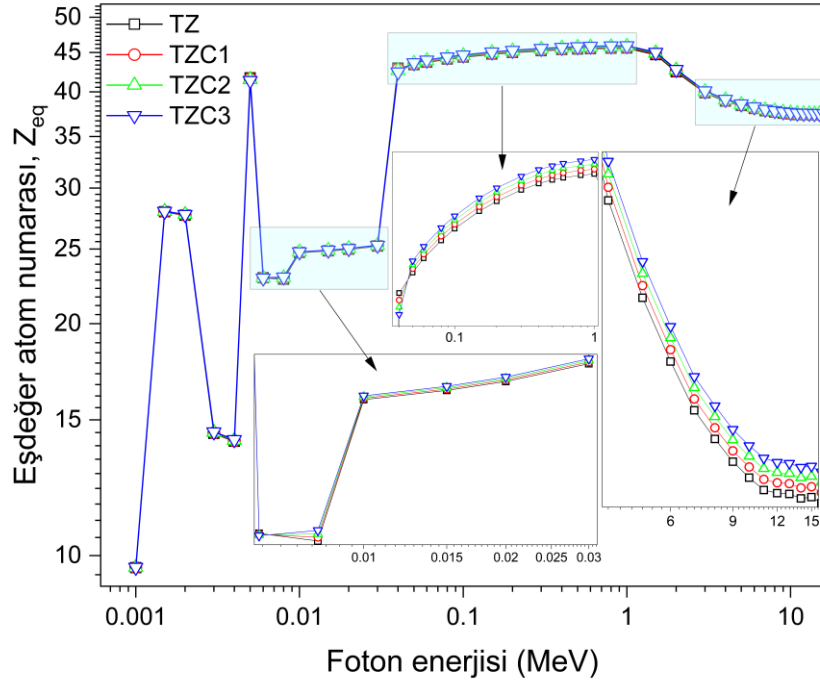
İncelenen malzemeler için elde edilen etkin iletkenlik faktörü C_{eff} grafiğinde (Şekil 4.14.), 0,001 MeV ile 0,1 MeV arasındaki düşük enerji aralığında iki belirgin pik gösterildikten sonra, 0,1 MeV ile 1 MeV arasında bir düşüş ve 10 MeV'e kadar bir artış gözlemlenmektedir. 15 MeV'de en yüksek C_{eff} değeri TZC3 malzemesinde elde edilmiştir (Çizelge 4.7.). Bu, TZC3'ün yüksek enerjili fotonlarla etkileşimde elektriksel iletkenliğinin de bu etkileşimlerle bağlantılı olarak yüksek olduğunu gösterir. C_{eff} parametresinin yüksek olması, TZC3'ün yalnızca fotonlarla etkileşimde değil, aynı zamanda enerji iletimi üzerinde de etkili olduğunu gösteren önemli bir bulgudur.



Şekil 4.14. TZCx numunelerine ait C_{eff} – foton enerjisi değişimi grafiği

İncelenen malzemeler için elde edilen Z_{eq} grafiğinde (Şekil 4.15.), bir malzemenin fotonlarla etkileşim kapasitesini belirlemek için kullanılan önemli bir parametredir. Z_{eq} , malzemenin karmaşık yapısını tek bir eşdeğer atom numarası ile ifade ederek, özellikle karmaşık malzemelerin radyasyon etkileşim özelliklerini anlamada etkili bir yaklaşım sunar. Özellikle yüksek enerjili bölgede 15 MeV'de TZC3 malzemesinin en yüksek Z_{eq} değerine ulaştığı görülmektedir (Çizelge 4.7.). Bu durum, TZC3'ün fotonlarla etkileşim açısından

diğer incelenen dört malzeme arasında en iyi performans sergilediğini ve zırhlama uygulamaları için daha etkili bir malzeme olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.15. TZCx numunelerine ait Z_{eq} – foton enerjisi değişimi grafiği

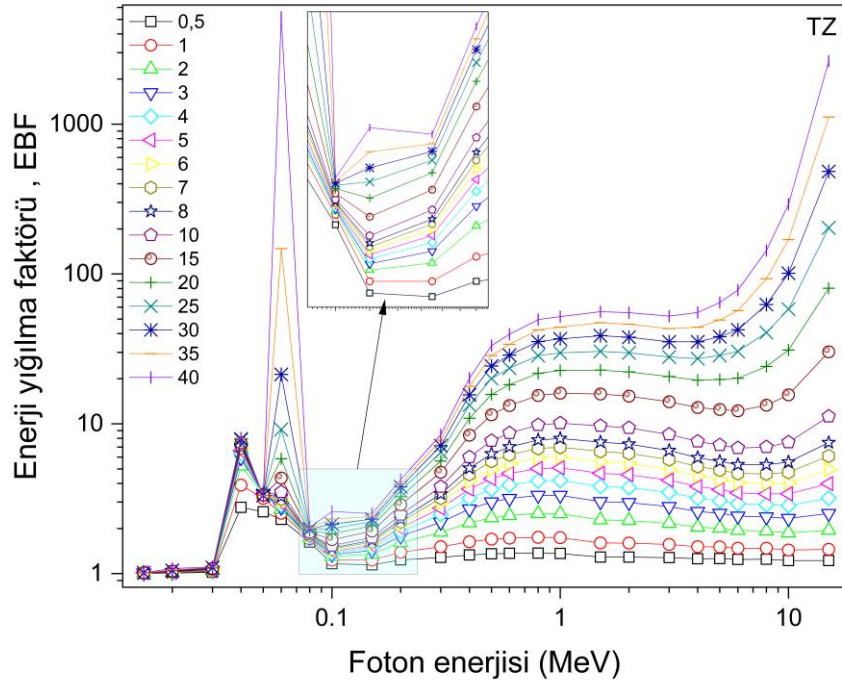
Çizelge 4.7. Her bir numune için foton enerjisine karşılık C_{eff} ve Z_{eq} değerleri

Enerji (MeV)	C_{eff}				Z_{eq}			
	TZ	TZC1	TZC2	TZC3	TZ	TZC1	TZC2	TZC3
0,001	1,37.10 ⁹	1,37.10 ⁹	1,37.10 ⁹	1,38.10 ⁹	9,64	9,65	9,65	9,66
0,0015	1,48.10 ⁹	1,49.10 ⁹	1,49.10 ⁹	1,49.10 ⁹	27,94	27,96	27,97	27,99
0,002	1,53.10 ⁹	1,54.10 ⁹	1,54.10 ⁹	1,55.10 ⁹	27,66	27,68	27,71	27,73
0,003	1,60.10 ⁹	1,61.10 ⁹	1,61.10 ⁹	1,62.10 ⁹	14,41	14,43	14,45	14,47
0,004	1,65.10 ⁹	1,65.10 ⁹	1,66.10 ⁹	1,66.10 ⁹	14,07	14,09	14,12	14,14
0,005	2,23.10 ⁹	2,23.10 ⁹	2,23.10 ⁹	2,23.10 ⁹	41,71	41,60	41,49	41,39
0,006	2,25.10 ⁹	2,25.10 ⁹	2,26.10 ⁹	2,26.10 ⁹	22,95	22,94	22,93	22,92
0,008	2,27.10 ⁹	2,28.10 ⁹	2,28.10 ⁹	2,29.10 ⁹	22,85	22,90	22,94	22,99
0,01	2,03.10 ⁹	2,04.10 ⁹	2,05.10 ⁹	2,06.10 ⁹	24,74	24,76	24,78	24,79
0,015	2,03.10 ⁹	2,04.10 ⁹	2,05.10 ⁹	2,06.10 ⁹	24,86	24,88	24,90	24,92
0,02	2,03.10 ⁹	2,04.10 ⁹	2,05.10 ⁹	2,06.10 ⁹	24,98	25,00	25,02	25,04
0,03	2,02.10 ⁹	2,03.10 ⁹	2,03.10 ⁹	2,05.10 ⁹	25,22	25,24	25,27	25,29
0,04	2,37.10 ⁹	2,37.10 ⁹	2,38.10 ⁹	2,38.10 ⁹	42,93	42,77	42,61	42,45
0,05	2,35.10 ⁹	2,36.10 ⁹	2,37.10 ⁹	2,38.10 ⁹	43,39	43,47	43,56	43,65
0,06	2,32.10 ⁹	2,33.10 ⁹	2,34.10 ⁹	2,35.10 ⁹	43,71	43,80	43,89	43,97
0,08	2,24.10 ⁹	2,25.10 ⁹	2,25.10 ⁹	2,26.10 ⁹	44,11	44,20	44,30	44,39
0,1	2,13.10 ⁹	2,14.10 ⁹	2,14.10 ⁹	2,16.10 ⁹	44,37	44,47	44,56	44,65
0,15	1,83.10 ⁹	1,84.10 ⁹	1,84.10 ⁹	1,85.10 ⁹	44,76	44,86	44,96	45,06
0,2	1,59.10 ⁹	1,59.10 ⁹	1,60.10 ⁹	1,60.10 ⁹	44,98	45,08	45,18	45,28
0,3	1,32.10 ⁹	1,32.10 ⁹	1,32.10 ⁹	1,33.10 ⁹	45,24	45,34	45,44	45,54
0,4	1,20.10 ⁹	1,20.10 ⁹	1,20.10 ⁹	1,21.10 ⁹	45,38	45,49	45,59	45,69
0,5	1,14.10 ⁹	1,15.10 ⁹	1,15.10 ⁹	1,15.10 ⁹	45,46	45,57	45,67	45,78
0,6	1,11.10 ⁹	1,12.10 ⁹	1,12.10 ⁹	1,12.10 ⁹	45,51	45,62	45,72	45,83
0,8	1,08.10 ⁹	1,09.10 ⁹	1,09.10 ⁹	1,09.10 ⁹	45,57	45,67	45,78	45,89
1	1,07.10 ⁹	1,07.10 ⁹	1,07.10 ⁹	1,07.10 ⁹	45,60	45,70	45,81	45,92
1,5	1,06.10 ⁹	1,06.10 ⁹	1,06.10 ⁹	1,07.10 ⁹	44,70	44,81	44,92	45,02
2	1,07.10 ⁹	1,08.10 ⁹	1,08.10 ⁹	1,08.10 ⁹	42,47	42,57	42,67	42,77
3	1,12.10 ⁹	1,12.10 ⁹	1,12.10 ⁹	1,13.10 ⁹	39,88	39,96	40,04	40,12
4	1,17.10 ⁹	1,17.10 ⁹	1,17.10 ⁹	1,18.10 ⁹	38,90	38,97	39,04	39,11
5	1,22.10 ⁹	1,22.10 ⁹	1,22.10 ⁹	1,22.10 ⁹	38,39	38,45	38,51	38,58
6	1,26.10 ⁹	1,26.10 ⁹	1,26.10 ⁹	1,27.10 ⁹	38,05	38,11	38,17	38,23
7	1,30.10 ⁹	1,30.10 ⁹	1,30.10 ⁹	1,31.10 ⁹	37,79	37,85	37,91	37,97
8	1,34.10 ⁹	1,34.10 ⁹	1,34.10 ⁹	1,34.10 ⁹	37,64	37,70	37,75	37,81
9	1,37.10 ⁹	1,37.10 ⁹	1,37.10 ⁹	1,37.10 ⁹	37,52	37,57	37,63	37,69
10	1,39.10 ⁹	1,40.10 ⁹	1,40.10 ⁹	1,40.10 ⁹	37,43	37,49	37,54	37,60
11	1,42.10 ⁹	1,42.10 ⁹	1,42.10 ⁹	1,43.10 ⁹	37,37	37,42	37,48	37,54
12	1,44.10 ⁹	1,44.10 ⁹	1,45.10 ⁹	1,45.10 ⁹	37,35	37,40	37,46	37,51
13	1,46.10 ⁹	1,46.10 ⁹	1,47.10 ⁹	1,47.10 ⁹	37,35	37,40	37,45	37,51
14	1,48.10 ⁹	1,48.10 ⁹	1,48.10 ⁹	1,49.10 ⁹	37,32	37,38	37,43	37,49
15	1,49.10 ⁹	1,50.10 ⁹	1,50.10 ⁹	1,50.10 ⁹	37,33	37,38	37,44	37,49
16	1,51.10 ⁹	1,51.10 ⁹	1,51.10 ⁹	1,52.10 ⁹	37,30	37,35	37,41	37,46

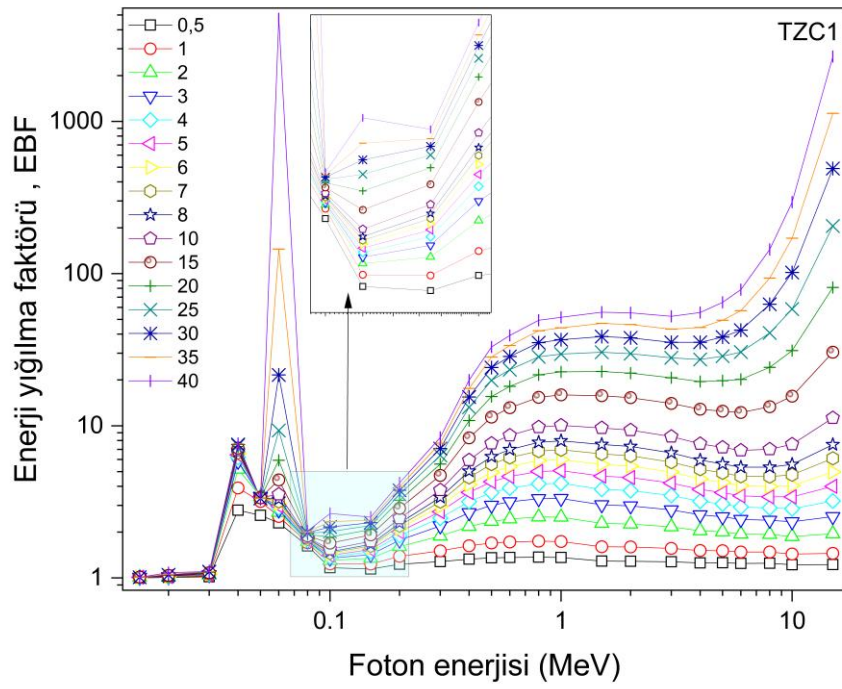
Enerji yığılma faktörü (EBF) ve enerji soğurma yığılma faktörü (EABF), malzemenin enerji birikimi ile ilgili diğer iki önemli parametredir ve zırhlama malzemelerinin etkili radyasyon zırhlama performanslarını anlamada kritik rol oynar. Her iki parametre de, fotonların malzeme içindeki enerji birikimi sürecini ve bu enerjinin ne kadarının malzeme tarafından emildiğini ifade eder. EBF, genellikle bir malzemenin, belirli bir foton enerjisi aralığındaki enerji birikimini gösterirken, EABF ise bu birikimin, malzeme tarafından emilen enerjiye olan oranını yansıtır. Bu parametrelerin analizi, zırhlama malzemelerinin yüksek enerjili fotonlar karşısındaki performansını daha derinlemesine anlayabilmemizi sağlar.

İncelenen dört malzeme için elde edilen EBF ve EABF grafiklerinin (Şekil 4.16.- Şekil 4.23.) her iki parametre için benzer bir eğilim sergilediği gözlemlenmiştir. Hem EBF hem de EABF, düşük enerjili fotonlar (0,1 MeV'e kadar) için iki belirgin pik göstermektedir. Bu, düşük enerji fotonlarının malzeme ile daha etkili bir şekilde etkileşime girdiği ve bu etkileşim sırasında enerji birikiminin arttığı anlamına gelir (Çizelge 4.8.- Çizelge 4.23.). EBF ve EABF grafikleri, malzemenin foton enerjisi ile olan etkileşim kapasitesine göre değişiklik gösterdiğinden, TZC3'ün zırhlama özelliklerine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

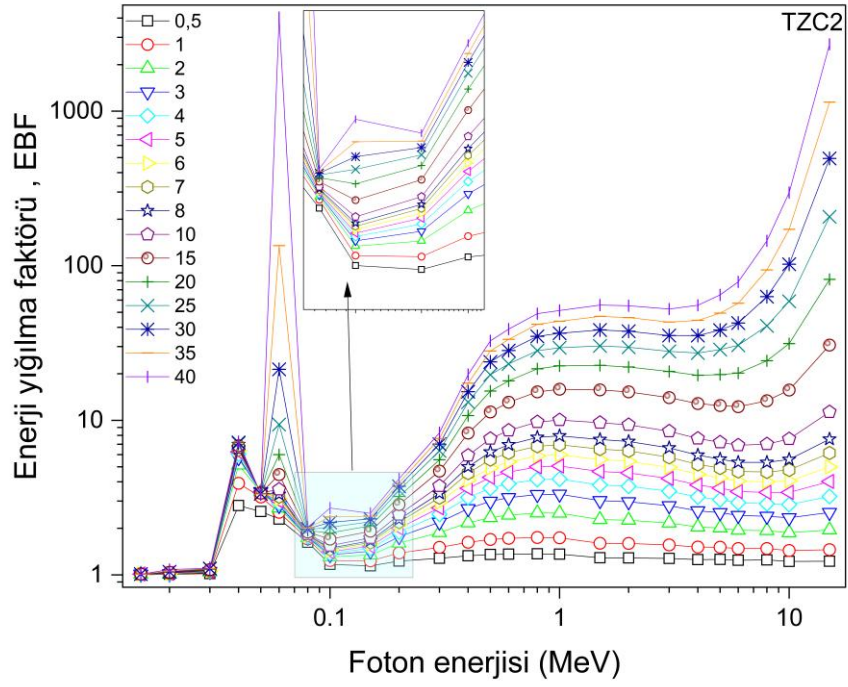
0,1 MeV'e kadar gözlemlenen iki pik, düşük enerjili fotonların malzeme ile güçlü etkileşimlerde bulunduğunu ve bu enerjilerde enerjinin büyük bir kısmının malzeme tarafından emildiğini göstermektedir. Bu pikin ardından, 40 MFP'ye doğru bir artış trendi izlenmiştir, ancak TZC3 numunesinin bu parametrelerde en düşük değerlere sahip olduğu grafiklerde görülmektedir. TZC3 numunesinin EBF ve EABF parametrelerinde en düşük trendin elde edilmesi, bu malzemenin düşük enerjili fotonlarla olan etkileşimde diğer malzemelere göre daha az enerji birikimi sağladığını veya daha verimli bir şekilde bu enerjiyi absorbe ettiğini göstermektedir.



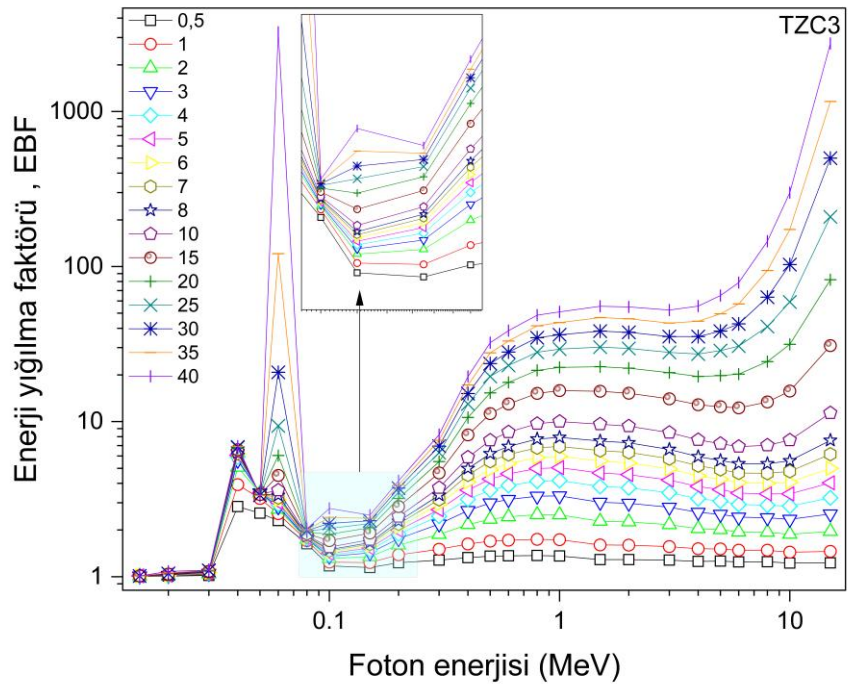
Şekil 4.16. TZ için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.



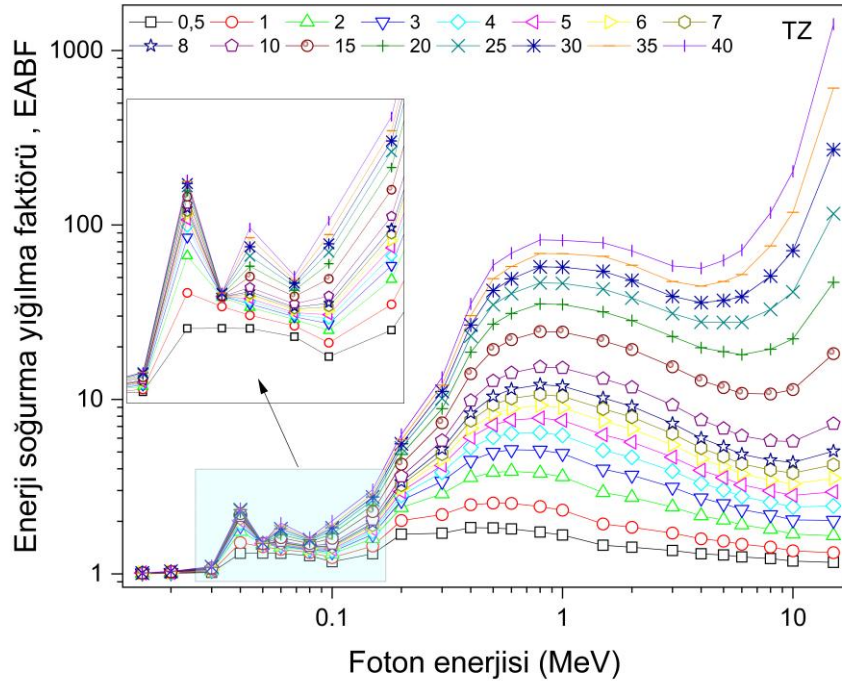
Şekil 4.17. TZC1 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.



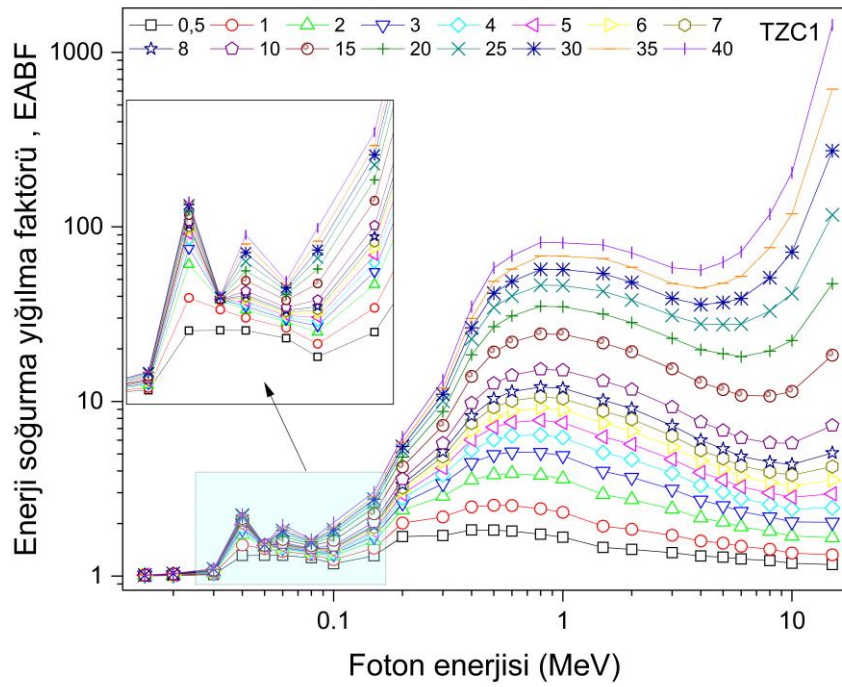
Şekil 4.18. TZC2 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.



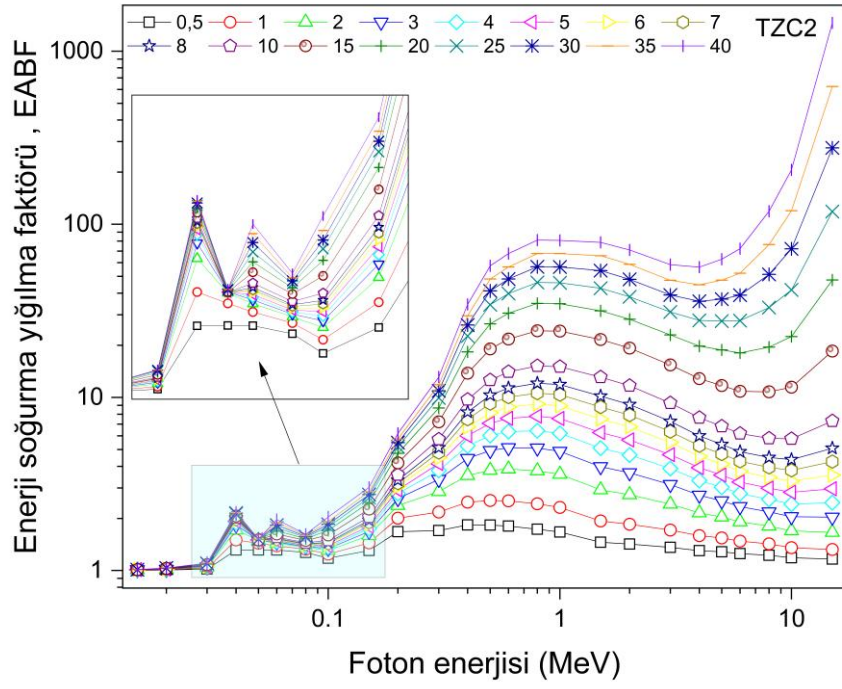
Şekil 4.19. TZC3 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EBF dağılımları.



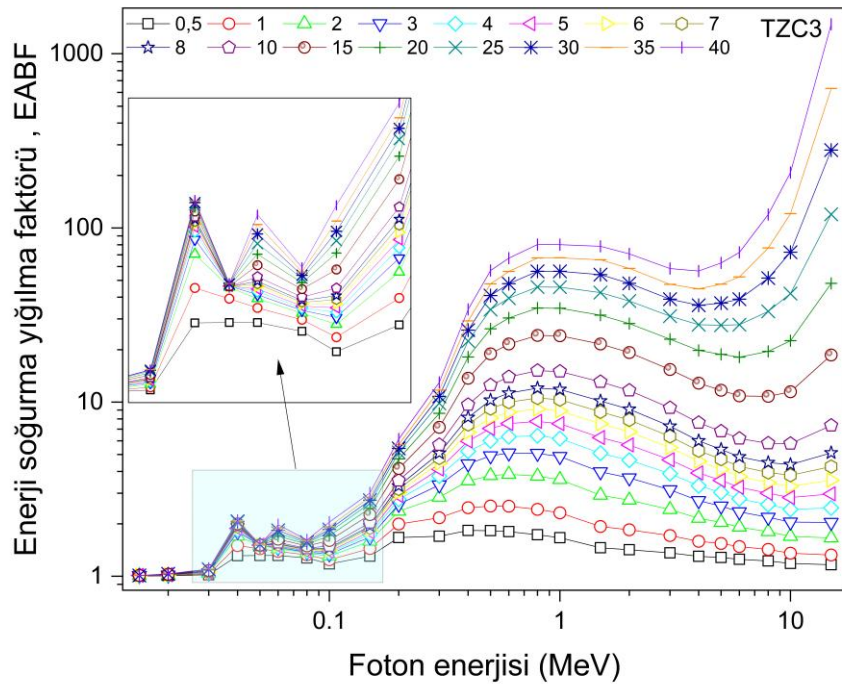
Şekil 4.20. TZ için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.



Şekil 4.21. TZC1 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.



Şekil 4.22. TzC2 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.



Şekil 4.23. TzC3 için enerji ve ortalama serbest yol dağılımlarına bağlı EABF dağılımları.

Çizelge 4.8. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZ)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰
0,04	2,77.10 ⁰	3,89.10 ⁰	5,23.10 ⁰	5,95.10 ⁰	6,36.10 ⁰	6,62.10 ⁰	6,80.10 ⁰	6,93.10 ⁰
0,05	2,58.10 ⁰	3,18.10 ⁰	3,41.10 ⁰	3,41.10 ⁰	3,40.10 ⁰	3,39.10 ⁰	3,38.10 ⁰	3,37.10 ⁰
0,06	2,30.10 ⁰	2,53.10 ⁰	2,69.10 ⁰	2,78.10 ⁰	2,87.10 ⁰	2,96.10 ⁰	3,05.10 ⁰	3,15.10 ⁰
0,08	1,62.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,76.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,80.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,23.10 ⁰	1,30.10 ⁰	1,34.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,40.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,46.10 ⁰
0,15	1,14.10 ⁰	1,23.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,63.10 ⁰
0,2	1,23.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,61.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,02.10 ⁰	2,12.10 ⁰	2,22.10 ⁰
0,3	1,28.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,89.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,48.10 ⁰	2,74.10 ⁰	2,97.10 ⁰	3,19.10 ⁰
0,4	1,33.10 ⁰	1,63.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,70.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,66.10 ⁰	4,13.10 ⁰	4,60.10 ⁰
0,5	1,36.10 ⁰	1,70.10 ⁰	2,36.10 ⁰	3,01.10 ⁰	3,66.10 ⁰	4,31.10 ⁰	4,96.10 ⁰	5,62.10 ⁰
0,6	1,37.10 ⁰	1,73.10 ⁰	2,45.10 ⁰	3,17.10 ⁰	3,91.10 ⁰	4,66.10 ⁰	5,43.10 ⁰	6,21.10 ⁰
0,8	1,37.10 ⁰	1,75.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,33.10 ⁰	4,16.10 ⁰	5,03.10 ⁰	5,92.10 ⁰	6,85.10 ⁰
1	1,36.10 ⁰	1,74.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,34.10 ⁰	4,19.10 ⁰	5,08.10 ⁰	6,01.10 ⁰	6,98.10 ⁰
1,5	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,29.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,83.10 ⁰	4,68.10 ⁰	5,59.10 ⁰	6,54.10 ⁰
2	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,98.10 ⁰	3,75.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,44.10 ⁰	6,36.10 ⁰
3	1,28.10 ⁰	1,57.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,81.10 ⁰	3,48.10 ⁰	4,20.10 ⁰	4,97.10 ⁰	5,78.10 ⁰
4	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,60.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,82.10 ⁰	4,48.10 ⁰	5,19.10 ⁰
5	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,07.10 ⁰	3,64.10 ⁰	4,25.10 ⁰	4,91.10 ⁰
6	1,24.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,94.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,92.10 ⁰	3,46.10 ⁰	4,04.10 ⁰	4,66.10 ⁰
8	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,39.10 ⁰	2,88.10 ⁰	3,41.10 ⁰	3,99.10 ⁰	4,63.10 ⁰
10	1,22.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,87.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,84.10 ⁰	3,41.10 ⁰	4,04.10 ⁰	4,75.10 ⁰
15	1,22.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,95.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,99.10 ⁰	4,95.10 ⁰	6,09.10 ⁰

Çizelge 4.9. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZ)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,09.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	7,03.10 ⁰	7,19.10 ⁰	7,46.10 ⁰	7,65.10 ⁰	7,80.10 ⁰	7,91.10 ⁰	8,00.10 ⁰	8,05.10 ⁰
0,05	3,37.10 ⁰	3,36.10 ⁰	3,34.10 ⁰	3,33.10 ⁰	3,33.10 ⁰	3,32.10 ⁰	3,32.10 ⁰	3,31.10 ⁰
0,06	3,26.10 ⁰	3,51.10 ⁰	4,35.10 ⁰	5,84.10 ⁰	9,16.10 ⁰	2,14.10 ¹	1,48.10 ²	5,16.10 ³
0,08	1,81.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,93.10 ⁰	1,97.10 ⁰	1,99.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,04.10 ⁰
0,1	1,48.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,69.10 ⁰	1,85.10 ⁰	2,00.10 ⁰	2,14.10 ⁰	2,31.10 ⁰	2,60.10 ⁰
0,15	1,67.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,92.10 ⁰	2,09.10 ⁰	2,22.10 ⁰	2,32.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,52.10 ⁰
0,2	2,31.10 ⁰	2,48.10 ⁰	2,88.10 ⁰	3,26.10 ⁰	3,57.10 ⁰	3,80.10 ⁰	4,00.10 ⁰	4,25.10 ⁰
0,3	3,40.10 ⁰	3,80.10 ⁰	4,75.10 ⁰	5,64.10 ⁰	6,45.10 ⁰	7,13.10 ⁰	7,76.10 ⁰	8,47.10 ⁰
0,4	5,06.10 ⁰	5,99.10 ⁰	8,39.10 ⁰	1,09.10 ¹	1,34.10 ¹	1,56.10 ¹	1,77.10 ¹	2,02.10 ¹
0,5	6,30.10 ⁰	7,69.10 ⁰	1,15.10 ¹	1,57.10 ¹	2,01.10 ¹	2,43.10 ¹	2,86.10 ¹	3,33.10 ¹
0,6	7,01.10 ⁰	8,68.10 ⁰	1,32.10 ¹	1,83.10 ¹	2,35.10 ¹	2,88.10 ¹	3,40.10 ¹	3,96.10 ¹
0,8	7,81.10 ⁰	9,82.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,18.10 ¹	2,85.10 ¹	3,54.10 ¹	4,23.10 ¹	4,97.10 ¹
1	7,98.10 ⁰	1,01.10 ¹	1,60.10 ¹	2,27.10 ¹	2,98.10 ¹	3,69.10 ¹	4,42.10 ¹	5,19.10 ¹
1,5	7,55.10 ⁰	9,69.10 ⁰	1,58.10 ¹	2,28.10 ¹	3,05.10 ¹	3,87.10 ¹	4,73.10 ¹	5,60.10 ¹
2	7,32.10 ⁰	9,38.10 ⁰	1,53.10 ¹	2,22.10 ¹	2,98.10 ¹	3,78.10 ¹	4,63.10 ¹	5,52.10 ¹
3	6,63.10 ⁰	8,49.10 ⁰	1,40.10 ¹	2,07.10 ¹	2,79.10 ¹	3,53.10 ¹	4,32.10 ¹	5,24.10 ¹
4	5,95.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,95.10 ¹	2,72.10 ¹	3,53.10 ¹	4,42.10 ¹	5,54.10 ¹
5	5,62.10 ⁰	7,21.10 ⁰	1,24.10 ¹	1,97.10 ¹	2,86.10 ¹	3,82.10 ¹	4,92.10 ¹	6,45.10 ¹
6	5,34.10 ⁰	6,89.10 ⁰	1,22.10 ¹	2,02.10 ¹	3,05.10 ¹	4,24.10 ¹	5,69.10 ¹	7,81.10 ¹
8	5,33.10 ⁰	7,00.10 ⁰	1,33.10 ¹	2,42.10 ¹	4,06.10 ¹	6,26.10 ¹	9,30.10 ¹	1,43.10 ²
10	5,56.10 ⁰	7,53.10 ⁰	1,56.10 ¹	3,11.10 ¹	5,82.10 ¹	1,01.10 ²	1,69.10 ²	2,92.10 ²
15	7,48.10 ⁰	1,12.10 ¹	3,03.10 ¹	8,03.10 ¹	2,03.10 ²	4,84.10 ²	1,12.10 ³	2,63.10 ³

Çizelge 4.10. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC1)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰
0,04	2,79.10 ⁰	3,90.10 ⁰	5,19.10 ⁰	5,84.10 ⁰	6,21.10 ⁰	6,43.10 ⁰	6,58.10 ⁰	6,69.10 ⁰
0,05	2,58.10 ⁰	3,18.10 ⁰	3,43.10 ⁰	3,43.10 ⁰	3,42.10 ⁰	3,41.10 ⁰	3,40.10 ⁰	3,39.10 ⁰
0,06	2,30.10 ⁰	2,54.10 ⁰	2,70.10 ⁰	2,80.10 ⁰	2,89.10 ⁰	2,98.10 ⁰	3,08.10 ⁰	3,18.10 ⁰
0,08	1,62.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,80.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,31.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,46.10 ⁰
0,15	1,14.10 ⁰	1,23.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,58.10 ⁰	1,63.10 ⁰
0,2	1,23.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,61.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,90.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,11.10 ⁰	2,21.10 ⁰
0,3	1,28.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,20.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,72.10 ⁰	2,96.10 ⁰	3,17.10 ⁰
0,4	1,33.10 ⁰	1,63.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,69.10 ⁰	3,18.10 ⁰	3,65.10 ⁰	4,11.10 ⁰	4,57.10 ⁰
0,5	1,36.10 ⁰	1,70.10 ⁰	2,36.10 ⁰	3,00.10 ⁰	3,64.10 ⁰	4,29.10 ⁰	4,94.10 ⁰	5,60.10 ⁰
0,6	1,36.10 ⁰	1,72.10 ⁰	2,44.10 ⁰	3,17.10 ⁰	3,90.10 ⁰	4,64.10 ⁰	5,40.10 ⁰	6,18.10 ⁰
0,8	1,37.10 ⁰	1,75.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,32.10 ⁰	4,15.10 ⁰	5,01.10 ⁰	5,90.10 ⁰	6,83.10 ⁰
1	1,36.10 ⁰	1,74.10 ⁰	2,51.10 ⁰	3,33.10 ⁰	4,18.10 ⁰	5,07.10 ⁰	6,00.10 ⁰	6,96.10 ⁰
1,5	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,28.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,82.10 ⁰	4,68.10 ⁰	5,58.10 ⁰	6,53.10 ⁰
2	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,98.10 ⁰	3,75.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,43.10 ⁰	6,35.10 ⁰
3	1,28.10 ⁰	1,57.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,80.10 ⁰	3,48.10 ⁰	4,20.10 ⁰	4,97.10 ⁰	5,77.10 ⁰
4	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,60.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,82.10 ⁰	4,48.10 ⁰	5,19.10 ⁰
5	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,07.10 ⁰	3,64.10 ⁰	4,25.10 ⁰	4,91.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,94.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,46.10 ⁰	4,04.10 ⁰	4,66.10 ⁰
8	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,89.10 ⁰	3,42.10 ⁰	3,99.10 ⁰	4,63.10 ⁰
10	1,22.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,87.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,85.10 ⁰	3,41.10 ⁰	4,05.10 ⁰	4,76.10 ⁰
15	1,22.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,95.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,20.10 ⁰	4,01.10 ⁰	4,97.10 ⁰	6,12.10 ⁰

Çizelge 4.11. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC1)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,08.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	6,78.10 ⁰	6,91.10 ⁰	7,14.10 ⁰	7,30.10 ⁰	7,43.10 ⁰	7,53.10 ⁰	7,60.10 ⁰	7,64.10 ⁰
0,05	3,38.10 ⁰	3,38.10 ⁰	3,36.10 ⁰	3,35.10 ⁰	3,34.10 ⁰	3,33.10 ⁰	3,33.10 ⁰	3,32.10 ⁰
0,06	3,29.10 ⁰	3,54.10 ⁰	4,41.10 ⁰	5,93.10 ⁰	9,31.10 ⁰	2,16.10 ⁰	1,45.10 ²	4,73.10 ³
0,08	1,81.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,94.10 ⁰	1,97.10 ⁰	1,99.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,04.10 ⁰
0,1	1,49.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,69.10 ⁰	1,86.10 ⁰	2,02.10 ⁰	2,16.10 ⁰	2,35.10 ⁰	2,65.10 ⁰
0,15	1,67.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,92.10 ⁰	2,08.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,31.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,51.10 ⁰
0,2	2,30.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,86.10 ⁰	3,24.10 ⁰	3,54.10 ⁰	3,77.10 ⁰	3,97.10 ⁰	4,22.10 ⁰
0,3	3,38.10 ⁰	3,78.10 ⁰	4,72.10 ⁰	5,60.10 ⁰	6,40.10 ⁰	7,07.10 ⁰	7,69.10 ⁰	8,39.10 ⁰
0,4	5,03.10 ⁰	5,95.10 ⁰	8,33.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,32.10 ¹	1,55.10 ¹	1,76.10 ¹	2,00.10 ¹
0,5	6,27.10 ⁰	7,65.10 ⁰	1,14.10 ¹	1,56.10 ¹	1,99.10 ¹	2,41.10 ¹	2,83.10 ¹	3,30.10 ¹
0,6	6,98.10 ⁰	8,63.10 ⁰	1,32.10 ¹	1,81.10 ¹	2,34.10 ¹	2,85.10 ¹	3,37.10 ¹	3,93.10 ¹
0,8	7,78.10 ⁰	9,78.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,17.10 ¹	2,84.10 ¹	3,52.10 ¹	4,20.10 ¹	4,93.10 ¹
1	7,96.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,60.10 ¹	2,26.10 ¹	2,96.10 ¹	3,67.10 ¹	4,40.10 ¹	5,16.10 ¹
1,5	7,53.10 ⁰	9,67.10 ⁰	1,58.10 ¹	2,27.10 ¹	3,04.10 ¹	3,86.10 ¹	4,71.10 ¹	5,58.10 ¹
2	7,31.10 ⁰	9,37.10 ⁰	1,53.10 ¹	2,22.10 ¹	2,97.10 ¹	3,78.10 ¹	4,62.10 ¹	5,51.10 ¹
3	6,63.10 ⁰	8,49.10 ⁰	1,40.10 ¹	2,07.10 ¹	2,79.10 ¹	3,53.10 ¹	4,32.10 ¹	5,24.10 ¹
4	5,95.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,95.10 ¹	2,72.10 ¹	3,53.10 ¹	4,42.10 ¹	5,55.10 ¹
5	5,62.10 ⁰	7,21.10 ⁰	1,25.10 ¹	1,98.10 ¹	2,86.10 ¹	3,83.10 ¹	4,93.10 ¹	6,47.10 ¹
6	5,34.10 ⁰	6,90.10 ⁰	1,22.10 ¹	2,02.10 ¹	3,05.10 ¹	4,25.10 ¹	5,71.10 ¹	7,84.10 ¹
8	5,34.10 ⁰	7,01.10 ⁰	1,33.10 ¹	2,42.10 ¹	4,08.10 ¹	6,29.10 ¹	9,34.10 ¹	1,44.10 ²
10	5,57.10 ⁰	7,55.10 ⁰	1,56.10 ¹	3,12.10 ¹	5,85.10 ¹	1,02.10 ²	1,71.10 ²	2,95.10 ²
15	7,51.10 ⁰	1,13.10 ⁰	3,05.10 ¹	8,10.10 ¹	2,05.10 ²	4,90.10 ²	1,13.10 ³	2,67.10 ³

Çizelge 4.12. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC2)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰
0,04	2,81.10 ⁰	3,91.10 ⁰	5,14.10 ⁰	5,74.10 ⁰	6,06.10 ⁰	6,25.10 ⁰	6,38.10 ⁰	6,47.10 ⁰
0,05	2,57.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,44.10 ⁰	3,45.10 ⁰	3,44.10 ⁰	3,42.10 ⁰	3,42.10 ⁰	3,41.10 ⁰
0,06	2,30.10 ⁰	2,54.10 ⁰	2,71.10 ⁰	2,81.10 ⁰	2,91.10 ⁰	3,00.10 ⁰	3,10.10 ⁰	3,21.10 ⁰
0,08	1,63.10 ⁰	1,71.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,80.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,31.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,47.10 ⁰
0,15	1,14.10 ⁰	1,23.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,42.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,58.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,2	1,23.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,60.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,89.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,11.10 ⁰	2,20.10 ⁰
0,3	1,28.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,19.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,71.10 ⁰	2,94.10 ⁰	3,16.10 ⁰
0,4	1,33.10 ⁰	1,63.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,68.10 ⁰	3,17.10 ⁰	3,63.10 ⁰	4,10.10 ⁰	4,55.10 ⁰
0,5	1,36.10 ⁰	1,69.10 ⁰	2,35.10 ⁰	2,99.10 ⁰	3,63.10 ⁰	4,27.10 ⁰	4,92.10 ⁰	5,57.10 ⁰
0,6	1,36.10 ⁰	1,72.10 ⁰	2,44.10 ⁰	3,16.10 ⁰	3,89.10 ⁰	4,63.10 ⁰	5,38.10 ⁰	6,16.10 ⁰
0,8	1,37.10 ⁰	1,74.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,31.10 ⁰	4,14.10 ⁰	5,00.10 ⁰	5,89.10 ⁰	6,80.10 ⁰
1	1,36.10 ⁰	1,73.10 ⁰	2,51.10 ⁰	3,32.10 ⁰	4,17.10 ⁰	5,06.10 ⁰	5,98.10 ⁰	6,94.10 ⁰
1,5	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,28.10 ⁰	3,02.10 ⁰	3,82.10 ⁰	4,67.10 ⁰	5,57.10 ⁰	6,52.10 ⁰
2	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,98.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,56.10 ⁰	5,43.10 ⁰	6,34.10 ⁰
3	1,28.10 ⁰	1,56.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,80.10 ⁰	3,48.10 ⁰	4,20.10 ⁰	4,96.10 ⁰	5,77.10 ⁰
4	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,60.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,81.10 ⁰	4,48.10 ⁰	5,19.10 ⁰
5	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,07.10 ⁰	3,64.10 ⁰	4,25.10 ⁰	4,91.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,94.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,46.10 ⁰	4,04.10 ⁰	4,67.10 ⁰
8	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,89.10 ⁰	3,42.10 ⁰	4,00.10 ⁰	4,64.10 ⁰
10	1,22.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,85.10 ⁰	3,42.10 ⁰	4,05.10 ⁰	4,77.10 ⁰
15	1,22.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,96.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,21.10 ⁰	4,02.10 ⁰	4,98.10 ⁰	6,14.10 ⁰

Çizelge 4.13. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC2)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,08.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	6,54.10 ⁰	6,65.10 ⁰	6,85.10 ⁰	6,99.10 ⁰	7,10.10 ⁰	7,18.10 ⁰	7,24.10 ⁰	7,28.10 ⁰
0,05	3,40.10 ⁰	3,39.10 ⁰	3,37.10 ⁰	3,36.10 ⁰	3,35.10 ⁰	3,34.10 ⁰	3,33.10 ⁰	3,33.10 ⁰
0,06	3,32.10 ⁰	3,58.10 ⁰	4,46.10 ⁰	6,00.10 ⁰	9,39.10 ⁰	2,14.10 ¹	1,35.10 ²	4,03.10 ³
0,08	1,82.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,94.10 ⁰	1,97.10 ⁰	1,99.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,04.10 ⁰
0,1	1,49.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,87.10 ⁰	2,03.10 ⁰	2,19.10 ⁰	2,38.10 ⁰	2,71.10 ⁰
0,15	1,66.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,08.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,30.10 ⁰	2,39.10 ⁰	2,50.10 ⁰
0,2	2,29.10 ⁰	2,45.10 ⁰	2,85.10 ⁰	3,22.10 ⁰	3,52.10 ⁰	3,75.10 ⁰	3,94.10 ⁰	4,19.10 ⁰
0,3	3,37.10 ⁰	3,76.10 ⁰	4,69.10 ⁰	5,56.10 ⁰	6,35.10 ⁰	7,02.10 ⁰	7,63.10 ⁰	8,32.10 ⁰
0,4	5,01.10 ⁰	5,92.10 ⁰	8,27.10 ⁰	1,07.10 ¹	1,31.10 ¹	1,53.10 ¹	1,74.10 ¹	1,97.10 ¹
0,5	6,24.10 ⁰	7,61.10 ⁰	1,13.10 ¹	1,54.10 ¹	1,97.10 ¹	2,39.10 ¹	2,80.10 ¹	3,27.10 ¹
0,6	6,95.10 ⁰	8,59.10 ⁰	1,31.10 ¹	1,80.10 ¹	2,32.10 ¹	2,83.10 ¹	3,34.10 ¹	3,89.10 ¹
0,8	7,75.10 ⁰	9,75.10 ⁰	1,53.10 ¹	2,15.10 ¹	2,82.10 ¹	3,49.10 ¹	4,18.10 ¹	4,90.10 ¹
1	7,94.10 ⁰	1,00.10 ¹	1,59.10 ¹	2,25.10 ¹	2,95.10 ¹	3,66.10 ¹	4,37.10 ¹	5,13.10 ¹
1,5	7,52.10 ⁰	9,65.10 ⁰	1,57.10 ¹	2,27.10 ¹	3,03.10 ¹	3,85.10 ¹	4,70.10 ¹	5,56.10 ¹
2	7,30.10 ⁰	9,36.10 ⁰	1,53.10 ¹	2,21.10 ¹	2,97.10 ¹	3,77.10 ¹	4,62.10 ¹	5,51.10 ¹
3	6,63.10 ⁰	8,49.10 ⁰	1,40.10 ¹	2,07.10 ¹	2,79.10 ¹	3,53.10 ¹	4,32.10 ¹	5,24.10 ¹
4	5,95.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,96.10 ¹	2,73.10 ¹	3,54.10 ¹	4,43.10 ¹	5,55.10 ¹
5	5,62.10 ⁰	7,21.10 ⁰	1,25.10 ¹	1,98.10 ¹	2,87.10 ¹	3,83.10 ¹	4,94.10 ¹	6,48.10 ¹
6	5,35.10 ⁰	6,90.10 ⁰	1,23.10 ¹	2,02.10 ¹	3,06.10 ¹	4,26.10 ¹	5,72.10 ¹	7,87.10 ¹
8	5,35.10 ⁰	7,02.10 ⁰	1,34.10 ¹	2,43.10 ¹	4,09.10 ¹	6,31.10 ¹	9,39.10 ¹	1,45.10 ²
10	5,58.10 ⁰	7,57.10 ⁰	1,57.10 ¹	3,14.10 ¹	5,88.10 ¹	1,02.10 ²	1,72.10 ²	2,97.10 ²
15	7,55.10 ⁰	1,13.10 ¹	3,07.10 ¹	8,17.10 ¹	2,07.10 ²	4,95.10 ²	1,14.10 ³	2,71.10 ³

Çizelge 4.14. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC3)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰
0,04	2,83.10 ⁰	3,92.10 ⁰	5,09.10 ⁰	5,63.10 ⁰	5,92.10 ⁰	6,08.10 ⁰	6,19.10 ⁰	6,26.10 ⁰
0,05	2,57.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,46.10 ⁰	3,47.10 ⁰	3,45.10 ⁰	3,44.10 ⁰	3,43.10 ⁰	3,42.10 ⁰
0,06	2,30.10 ⁰	2,55.10 ⁰	2,72.10 ⁰	2,83.10 ⁰	2,92.10 ⁰	3,02.10 ⁰	3,12.10 ⁰	3,23.10 ⁰
0,08	1,63.10 ⁰	1,71.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,76.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,81.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,31.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,47.10 ⁰
0,15	1,14.10 ⁰	1,23.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,42.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,53.10 ⁰	1,58.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,2	1,23.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,60.10 ⁰	1,76.10 ⁰	1,89.10 ⁰	2,00.10 ⁰	2,10.10 ⁰	2,19.10 ⁰
0,3	1,28.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,19.10 ⁰	2,46.10 ⁰	2,70.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,14.10 ⁰
0,4	1,33.10 ⁰	1,62.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,67.10 ⁰	3,15.10 ⁰	3,62.10 ⁰	4,08.10 ⁰	4,53.10 ⁰
0,5	1,35.10 ⁰	1,69.10 ⁰	2,35.10 ⁰	2,99.10 ⁰	3,62.10 ⁰	4,26.10 ⁰	4,90.10 ⁰	5,55.10 ⁰
0,6	1,36.10 ⁰	1,72.10 ⁰	2,43.10 ⁰	3,15.10 ⁰	3,87.10 ⁰	4,61.10 ⁰	5,36.10 ⁰	6,13.10 ⁰
0,8	1,37.10 ⁰	1,74.10 ⁰	2,51.10 ⁰	3,31.10 ⁰	4,13.10 ⁰	4,98.10 ⁰	5,87.10 ⁰	6,78.10 ⁰
1	1,36.10 ⁰	1,73.10 ⁰	2,51.10 ⁰	3,32.10 ⁰	4,17.10 ⁰	5,05.10 ⁰	5,97.10 ⁰	6,92.10 ⁰
1,5	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,28.10 ⁰	3,02.10 ⁰	3,81.10 ⁰	4,66.10 ⁰	5,56.10 ⁰	6,51.10 ⁰
2	1,29.10 ⁰	1,60.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,97.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,56.10 ⁰	5,42.10 ⁰	6,33.10 ⁰
3	1,28.10 ⁰	1,56.10 ⁰	2,16.10 ⁰	2,80.10 ⁰	3,48.10 ⁰	4,20.10 ⁰	4,96.10 ⁰	5,77.10 ⁰
4	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,60.10 ⁰	3,19.10 ⁰	3,81.10 ⁰	4,48.10 ⁰	5,19.10 ⁰
5	1,26.10 ⁰	1,51.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,07.10 ⁰	3,64.10 ⁰	4,25.10 ⁰	4,91.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,95.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,46.10 ⁰	4,04.10 ⁰	4,67.10 ⁰
8	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,89.10 ⁰	3,42.10 ⁰	4,00.10 ⁰	4,64.10 ⁰
10	1,22.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,86.10 ⁰	3,42.10 ⁰	4,06.10 ⁰	4,78.10 ⁰
15	1,23.10 ⁰	1,46.10 ⁰	1,96.10 ⁰	2,54.10 ⁰	3,22.10 ⁰	4,03.10 ⁰	5,00.10 ⁰	6,17.10 ⁰

Çizelge 4.15. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EBF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EBF (TZC3)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,08.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	6,32.10 ⁰	6,42.10 ⁰	6,59.10 ⁰	6,71.10 ⁰	6,80.10 ⁰	6,87.10 ⁰	6,92.10 ⁰	6,96.10 ⁰
0,05	3,42.10 ⁰	3,41.10 ⁰	3,39.10 ⁰	3,37.10 ⁰	3,36.10 ⁰	3,35.10 ⁰	3,34.10 ⁰	3,34.10 ⁰
0,06	3,35.10 ⁰	3,61.10 ⁰	4,50.10 ⁰	6,05.10 ⁰	9,39.10 ⁰	2,08.10 ¹	1,21.10 ²	3,24.10 ³
0,08	1,82.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,94.10 ⁰	1,97.10 ⁰	1,99.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,04.10 ⁰
0,1	1,50.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,71.10 ⁰	1,88.10 ⁰	2,05.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,41.10 ⁰	2,76.10 ⁰
0,15	1,66.10 ⁰	1,73.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,07.10 ⁰	2,20.10 ⁰	2,29.10 ⁰	2,38.10 ⁰	2,49.10 ⁰
0,2	2,28.10 ⁰	2,44.10 ⁰	2,83.10 ⁰	3,20.10 ⁰	3,50.10 ⁰	3,72.10 ⁰	3,92.10 ⁰	4,16.10 ⁰
0,3	3,35.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,66.10 ⁰	5,53.10 ⁰	6,30.10 ⁰	6,96.10 ⁰	7,56.10 ⁰	8,25.10 ⁰
0,4	4,98.10 ⁰	5,88.10 ⁰	8,22.10 ⁰	1,06.10 ¹	1,30.10 ¹	1,52.10 ¹	1,72.10 ¹	1,95.10 ¹
0,5	6,21.10 ⁰	7,57.10 ⁰	1,13.10 ¹	1,53.10 ¹	1,96.10 ¹	2,37.10 ¹	2,78.10 ¹	3,23.10 ¹
0,6	6,92.10 ⁰	8,55.10 ⁰	1,30.10 ¹	1,79.10 ¹	2,30.10 ¹	2,81.10 ¹	3,31.10 ¹	3,86.10 ¹
0,8	7,72.10 ⁰	9,71.10 ⁰	1,52.10 ¹	2,14.10 ¹	2,80.10 ¹	3,47.10 ¹	4,15.10 ¹	4,86.10 ¹
1	7,91.10 ⁰	1,00.10 ¹	1,58.10 ¹	2,24.10 ¹	2,94.10 ¹	3,64.10 ¹	4,35.10 ¹	5,10.10 ¹
1,5	7,51.10 ⁰	9,63.10 ⁰	1,57.10 ¹	2,2.10 ¹	3,02.10 ¹	3,83.10 ¹	4,68.10 ¹	5,55.10 ¹
2	7,29.10 ⁰	9,35.10 ⁰	1,53.10 ¹	2,21.10 ¹	2,97.10 ¹	3,77.10 ¹	4,61.10 ¹	5,50.10 ¹
3	6,63.10 ⁰	8,49.10 ⁰	1,40.10 ¹	2,07.10 ¹	2,80.10 ¹	3,53.10 ¹	4,32.10 ¹	5,25.10 ¹
4	5,95.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,96.10 ¹	2,73.10 ¹	3,54.10 ¹	4,43.10 ¹	5,56.10 ¹
5	5,62.10 ⁰	7,21.10 ⁰	1,25.10 ¹	1,98.10 ¹	2,87.10 ¹	3,84.10 ¹	4,95.10 ¹	6,50.10 ¹
6	5,35.10 ⁰	6,90.10 ⁰	1,23.10 ¹	2,03.10 ¹	3,07.10 ¹	4,27.10 ¹	5,74.10 ¹	7,90.10 ¹
8	5,35.10 ⁰	7,03.10 ⁰	1,34.10 ¹	2,44.10 ¹	4,11.10 ¹	6,34.10 ¹	9,44.10 ¹	1,46.10 ²
10	5,59.10 ⁰	7,59.10 ⁰	1,58.10 ¹	3,15.10 ¹	5,92.10 ¹	1,03.10 ²	1,73.10 ²	3,00.10 ²
15	7,58.10 ⁰	1,14.10 ¹	3,09.10 ¹	8,23.10 ¹	2,09.10 ²	5,01.10 ²	1,16.10 ³	2,75.10 ³

Çizelge 4.16. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZ)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰
0,04	1,31.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,88.10 ⁰	1,97.10 ⁰	2,02.10 ⁰	2,06.10 ⁰	2,09.10 ⁰
0,05	1,31.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰
0,06	1,31.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,46.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,50.10 ⁰
0,08	1,27.10 ⁰	1,33.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,37.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,40.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,42.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,30.10 ⁰	1,34.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,43.10 ⁰
0,15	1,30.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,68.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,81.10 ⁰	1,86.10 ⁰	1,91.10 ⁰
0,2	1,69.10 ⁰	2,02.10 ⁰	2,40.10 ⁰	2,63.10 ⁰	2,81.10 ⁰	2,96.10 ⁰	3,10.10 ⁰	3,24.10 ⁰
0,3	1,71.10 ⁰	2,19.10 ⁰	2,88.10 ⁰	3,39.10 ⁰	3,82.10 ⁰	4,20.10 ⁰	4,54.10 ⁰	4,87.10 ⁰
0,4	1,84.10 ⁰	2,49.10 ⁰	3,57.10 ⁰	4,47.10 ⁰	5,30.10 ⁰	6,07.10 ⁰	6,83.10 ⁰	7,57.10 ⁰
0,5	1,83.10 ⁰	2,55.10 ⁰	3,81.10 ⁰	4,82.10 ⁰	6,07.10 ⁰	7,15.10 ⁰	8,2.10 ⁰	9,32.10 ⁰
0,6	1,81.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,88.10 ⁰	5,15.10 ⁰	6,39.10 ⁰	7,62.10 ⁰	8,87.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,8	1,74.10 ⁰	2,43.10 ⁰	3,78.10 ⁰	5,11.10 ⁰	6,46.10 ⁰	7,82.10 ⁰	9,22.10 ⁰	1,07.10 ⁰
1	1,67.10 ⁰	2,32.10 ⁰	3,60.10 ⁰	4,90.10 ⁰	6,22.10 ⁰	7,58.10 ⁰	8,97.10 ⁰	1,04.10 ⁰
1,5	1,46.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,98.10 ⁰	5,10.10 ⁰	6,28.10 ⁰	7,52.10 ⁰	8,83.10 ⁰
2	1,42.10 ⁰	1,85.10 ⁰	2,74.10 ⁰	3,67.10 ⁰	4,66.10 ⁰	5,69.10 ⁰	6,78.10 ⁰	7,92.10 ⁰
3	1,36.10 ⁰	1,71.10 ⁰	2,42.10 ⁰	3,14.10 ⁰	3,89.10 ⁰	4,67.10 ⁰	5,49.10 ⁰	6,35.10 ⁰
4	1,30.10 ⁰	1,59.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,72.10 ⁰	3,31.10 ⁰	3,92.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,26.10 ⁰
5	1,28.10 ⁰	1,54.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,56.10 ⁰	4,11.10 ⁰	4,71.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,78.10 ⁰	3,24.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,27.10 ⁰
8	1,22.10 ⁰	1,42.10 ⁰	1,80.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,57.10 ⁰	2,99.10 ⁰	3,44.10 ⁰	3,94.10 ⁰
10	1,18.10 ⁰	1,35.10 ⁰	1,69.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,41.10 ⁰	2,82.10 ⁰	3,28.10 ⁰	3,78.10 ⁰
15	1,16.10 ⁰	1,32.10 ⁰	1,66.10 ⁰	2,03.10 ⁰	2,45.10 ⁰	2,95.10 ⁰	3,53.10 ⁰	4,23.10 ⁰

Çizelge 4.17. TZ numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZ)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	2,11.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,30.10 ⁰	2,33.10 ⁰	2,35.10 ⁰	2,37.10 ⁰
0,05	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰
0,06	1,52.10 ⁰	1,54.10 ⁰	1,61.10 ⁰	1,68.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,81.10 ⁰	1,88.10 ⁰	1,96.10 ⁰
0,08	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,53.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,57.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,1	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,60.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,90.10 ⁰	2,01.10 ⁰
0,15	1,95.10 ⁰	2,05.10 ⁰	2,28.10 ⁰	2,48.10 ⁰	2,65.10 ⁰	2,76.10 ⁰	2,87.10 ⁰	3,04.10 ⁰
0,2	3,36.10 ⁰	3,62.10 ⁰	4,25.10 ⁰	4,83.10 ⁰	5,28.10 ⁰	5,57.10 ⁰	5,86.10 ⁰	6,31.10 ⁰
0,3	5,19.10 ⁰	5,80.10 ⁰	7,34.10 ⁰	8,84.10 ⁰	1,01.10 ¹	1,11.10 ¹	1,21.10 ¹	1,34.10 ¹
0,4	8,32.10 ⁰	9,84.10 ⁰	1,40.10 ¹	1,87.10 ¹	2,31.10 ¹	2,67.10 ¹	3,03.10 ¹	3,53.10 ¹
0,5	1,04.10 ¹	1,27.10 ¹	1,93.10 ¹	2,70.10 ¹	3,49.10 ¹	4,21.10 ¹	4,92.10 ¹	5,88.10 ¹
0,6	1,14.10 ¹	1,42.10 ¹	2,20.10 ¹	3,11.10 ¹	4,05.10 ¹	4,91.10 ¹	5,78.10 ¹	6,89.10 ¹
0,8	1,22.10 ¹	1,53.10 ¹	2,45.10 ¹	3,53.10 ¹	4,66.10 ¹	5,75.10 ¹	6,86.10 ¹	8,22.10 ¹
1	1,19.10 ¹	1,51.10 ¹	2,43.10 ¹	3,50.10 ¹	4,63.10 ¹	5,73.10 ¹	6,84.10 ¹	8,16.10 ¹
1,5	1,02.10 ¹	1,31.10 ¹	2,17.10 ¹	3,18.10 ¹	4,29.10 ¹	5,43.10 ¹	6,61.10 ¹	7,90.10 ¹
2	9,12.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,93.10 ¹	2,83.10 ¹	3,82.10 ¹	4,82.10 ¹	5,88.10 ¹	7,11.10 ¹
3	7,27.10 ⁰	9,27.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,30.10 ¹	3,11.10 ¹	3,90.10 ¹	4,74.10 ¹	5,83.10 ¹
4	6,00.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,98.10 ¹	2,78.10 ¹	3,59.10 ¹	4,46.10 ¹	5,64.10 ¹
5	5,35.10 ⁰	6,80.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,88.10 ¹	2,76.10 ¹	3,69.10 ¹	4,74.10 ¹	6,27.10 ¹
6	4,85.10 ⁰	6,18.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,80.10 ¹	2,77.10 ¹	3,88.10 ¹	5,20.10 ¹	7,19.10 ¹
8	4,49.10 ⁰	5,79.10 ⁰	1,07.10 ¹	1,94.10 ¹	3,29.10 ¹	5,09.10 ¹	7,58.10 ¹	1,18.10 ²
10	4,35.10 ⁰	5,74.10 ⁰	1,14.10 ¹	2,23.10 ¹	4,13.10 ¹	7,12.10 ¹	1,18.10 ¹	2,03.10 ²
15	5,05.10 ⁰	7,25.10 ⁰	1,83.10 ¹	4,69.10 ¹	1,16.10 ¹	2,70.10 ²	6,08.10 ²	1,41.10 ³

Çizelge 4.18. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC1)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02E.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰
0,04	1,31.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,73.10 ⁰	1,86.10 ⁰	1,93.10 ⁰	1,97.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,03.10 ⁰
0,05	1,31.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰
0,06	1,31.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,47.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,51.10 ⁰
0,08	1,27.10 ⁰	1,33.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,40.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,42.10 ⁰
0,1	1,17.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,30.10 ⁰	1,34.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,43.10 ⁰
0,15	1,30.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,68.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,80.10 ⁰	1,86.10 ⁰	1,90.10 ⁰
0,2	1,68.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,39.10 ⁰	2,62.10 ⁰	2,80.10 ⁰	2,95.10 ⁰	3,08.10 ⁰	3,22.10 ⁰
0,3	1,71.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,87.10 ⁰	3,38.10 ⁰	3,80.10 ⁰	4,17.10 ⁰	4,52.10 ⁰	4,84.10 ⁰
0,4	1,84.10 ⁰	2,49.10 ⁰	3,55.10 ⁰	4,46.10 ⁰	5,27.10 ⁰	6,04.10 ⁰	6,79.10 ⁰	7,53.10 ⁰
0,5	1,83.10 ⁰	2,54.10 ⁰	3,80.10 ⁰	4,95.10 ⁰	6,05.10 ⁰	7,12.10 ⁰	8,19.10 ⁰	9,27.10 ⁰
0,6	1,81.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,87.10 ⁰	5,13.10 ⁰	6,37.10 ⁰	7,60.10 ⁰	8,83.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,8	1,73.10 ⁰	2,43.10 ⁰	3,77.10 ⁰	5,10.10 ⁰	6,44.10 ⁰	7,80.10 ⁰	9,19.10 ⁰	1,06.10 ⁰
1	1,67.10 ⁰	2,32.10 ⁰	3,60.10 ⁰	4,89.10 ⁰	6,21.10 ⁰	7,56.10 ⁰	8,95.10 ⁰	1,04.10 ⁰
1,5	1,46.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,98.10 ⁰	5,10.10 ⁰	6,27.10 ⁰	7,51.10 ⁰	8,82.10 ⁰
2	1,42.10 ⁰	1,85.10 ⁰	2,74.10 ⁰	3,67.10 ⁰	4,65.10 ⁰	5,69.10 ⁰	6,77.10 ⁰	7,91.10 ⁰
3	1,36.10 ⁰	1,71.10 ⁰	2,42.10 ⁰	3,14.10 ⁰	3,89.10 ⁰	4,67.10 ⁰	5,49.10 ⁰	6,35.10 ⁰
4	1,30.10 ⁰	1,59.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,72.10 ⁰	3,31.10 ⁰	3,92.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,26.10 ⁰
5	1,28.10 ⁰	1,54.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,56.10 ⁰	4,11.10 ⁰	4,71.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,78.10 ⁰	3,24.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,27.10 ⁰
8	1,22.10 ⁰	1,42.10 ⁰	1,80.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,57.10 ⁰	2,99.10 ⁰	3,45.10 ⁰	3,94.10 ⁰
10	1,18.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,69.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,83.10 ⁰	3,28.10 ⁰	3,79.10 ⁰
15	1,16.10 ⁰	1,32.10 ⁰	1,66.10 ⁰	2,03.10 ⁰	2,46.10 ⁰	2,96.10 ⁰	3,54.10 ⁰	4,24.10 ⁰

Çizelge 4.19. TZC1 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC1)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰
0,03	1,07.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	2,05.10 ⁰	2,08.10 ⁰	2,14.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,21.10 ⁰	2,23.10 ⁰	2,25.10 ⁰	2,26.10 ⁰
0,05	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰
0,06	1,52.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,62.10 ⁰	1,69.10 ⁰	1,76.10 ⁰	1,82.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,97.10 ⁰
0,08	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,53.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,57.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,1	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,60.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,78.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,02.10 ⁰
0,15	1,95.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,27.10 ⁰	2,48.10 ⁰	2,64.10 ⁰	2,75.10 ⁰	2,87.10 ⁰	3,03.10 ⁰
0,2	3,34.10 ⁰	3,59.10 ⁰	4,22.10 ⁰	4,79.10 ⁰	5,23.10 ⁰	5,52.10 ⁰	5,81.10 ⁰	6,25.10 ⁰
0,3	5,15.10 ⁰	5,76.10 ⁰	7,28.10 ⁰	8,76.10 ⁰	1,00.10 ¹	1,10.10 ¹	1,19.10 ⁰	1,32.10 ¹
0,4	8,27.10 ⁰	9,78.10 ⁰	1,39.10 ¹	1,85.10 ¹	2,29.10 ¹	2,64.10 ¹	2,99.10 ⁰	3,49.10 ¹
0,5	1,04.10 ⁰	1,27.10 ¹	1,92.10 ¹	2,68.10 ¹	3,46.10 ¹	4,17.10 ¹	4,87.10 ⁰	5,82.10 ¹
0,6	1,14.10 ¹	1,41.10 ¹	2,19.10 ¹	3,09.10 ¹	4,02.10 ¹	4,87.10 ¹	5,72.10 ¹	6,83.10 ¹
0,8	1,21.10 ¹	1,53.10 ¹	2,44.10 ¹	3,51.10 ¹	4,64.10 ¹	5,71.10 ¹	6,81.10 ¹	8,16.10 ¹
1	1,19.10 ¹	1,51.10 ¹	2,42.10 ¹	3,49.10 ¹	4,61.10 ¹	5,70.10 ¹	6,80.10 ¹	8,11.10 ¹
1,5	1,02.10 ¹	1,31.10 ¹	2,17.10 ¹	3,17.10 ¹	4,28.10 ¹	5,41.10 ¹	6,59.10 ¹	7,88.10 ¹
2	9,11.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,93.10 ¹	2,83.10 ¹	3,81.10 ¹	4,82.10 ¹	5,87.10 ¹	7,10.10 ¹
3	7,27.10 ⁰	9,27.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,30.10 ¹	3,11.10 ¹	3,90.10 ¹	4,74.10 ¹	5,84.10 ¹
4	6,00.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,98.10 ¹	2,78.10 ¹	3,59.10 ¹	4,47.10 ¹	5,65.10 ¹
5	5,35.10 ⁰	6,80.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,88.10 ¹	2,76.10 ¹	3,69.10 ¹	4,75.10 ¹	6,28.10 ¹
6	4,85.10 ⁰	6,18.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,81.10 ¹	2,78.10 ¹	3,89.10 ¹	5,21.10 ¹	7,21E.10 ¹
8	4,49.10 ⁰	5,79.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,95.10 ¹	3,30.10 ¹	5,11.10 ¹	7,61.10 ¹	1,18.10 ²
10	4,36.10 ⁰	5,75.10 ⁰	1,14.10 ¹	2,23.10 ¹	4,15.10 ¹	7,16.10 ¹	1,19.10 ²	2,05.10 ²
15	5,07.10 ⁰	7,28.10 ⁰	1,84.10 ¹	4,73.10 ¹	1,17.10 ²	2,73.10 ²	6,16.10 ²	1,44.10 ³

Çizelge 4.20. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC2)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰
0,04	1,31.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,72.10 ⁰	1,83.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,93.10 ⁰	1,96.10 ⁰	1,98.10 ⁰
0,05	1,31.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰
0,06	1,31.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,46.10 ⁰	1,47.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,52.10 ⁰
0,08	1,27.10 ⁰	1,33.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,40.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,42.10 ⁰
0,1	1,18.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,30.10 ⁰	1,34.10 ⁰	1,37.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,43.10 ⁰
0,15	1,30.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,68.10 ⁰	1,75.10 ⁰	1,80.10 ⁰	1,85.10 ⁰	1,90.10 ⁰
0,2	1,68.10 ⁰	2,01.10 ⁰	2,38.10 ⁰	2,61.10 ⁰	2,78.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,07.10 ⁰	3,20.10 ⁰
0,3	1,70.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,85.10 ⁰	3,36.10 ⁰	3,78.10 ⁰	4,15.10 ⁰	4,49.10 ⁰	4,81.10 ⁰
0,4	1,83.10 ⁰	2,48.10 ⁰	3,54.10 ⁰	4,44.10 ⁰	5,25.10 ⁰	6,01.10 ⁰	6,75.10 ⁰	7,48.10 ⁰
0,5	1,83.10 ⁰	2,54.10 ⁰	3,79.10 ⁰	4,94.10 ⁰	6,03.10 ⁰	7,09.10 ⁰	8,15.10 ⁰	9,22.10 ⁰
0,6	1,81.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,86.10 ⁰	5,12.10 ⁰	6,35.10 ⁰	7,57.10 ⁰	8,80.10 ⁰	1,01.10 ¹
0,8	1,73.10 ⁰	2,43.10 ⁰	3,77.10 ⁰	5,09.10 ⁰	6,42.10 ⁰	7,78.10 ⁰	9,16.10 ⁰	1,06.10 ¹
1	1,67.10 ⁰	2,31.10 ⁰	3,60.10 ⁰	4,88.10 ⁰	6,20.10 ⁰	7,54.10 ⁰	8,93.10 ⁰	1,04.10 ¹
1,5	1,46.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,93.10 ⁰	3,98.10 ⁰	5,09.10 ⁰	6,27.10 ⁰	7,50.10 ⁰	8,80.10 ⁰
2	1,42.10 ⁰	1,85.10 ⁰	2,74.10 ⁰	3,67.10 ⁰	4,65.10 ⁰	5,68.10 ⁰	6,77.10 ⁰	7,91.10 ⁰
3	1,36.10 ⁰	1,71.10 ⁰	2,42.10 ⁰	3,14.10 ⁰	3,89.10 ⁰	4,67.10 ⁰	5,49.10 ⁰	6,35.10 ⁰
4	1,30.10 ⁰	1,59.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,72.10 ⁰	3,31.10 ⁰	3,92.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,26.10 ⁰
5	1,28.10 ⁰	1,54.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,56.10 ⁰	4,11.10 ⁰	4,71.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,78.10 ⁰	3,25.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,27.10 ⁰
8	1,23.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,80.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,58.10 ⁰	2,99.10 ⁰	3,45.10 ⁰	3,95.10 ⁰
10	1,19.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,69.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,83.10 ⁰	3,28.10 ⁰	3,79.10 ⁰
15	1,16.10 ⁰	1,32.10 ⁰	1,66.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,46.10 ⁰	2,96.10 ⁰	3,55.10 ⁰	4,25.10 ⁰

Çizelge 4.21. TZC2 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC2)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰
0,03	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	1,99.10 ⁰	2,02.10 ⁰	2,06.10 ⁰	2,10.10 ⁰	2,13.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,16.10 ⁰	2,17.10 ⁰
0,05	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,52.10 ⁰	1,52.10 ⁰	1,52.10 ⁰
0,06	1,53.10 ⁰	1,56.10 ⁰	1,63.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,76.10 ⁰	1,83.10 ⁰	1,90.10 ⁰	1,97.10 ⁰
0,08	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,53.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,57.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,1	1,45.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,60.10 ⁰	1,71.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,85.10 ⁰	1,92.10 ⁰	2,04.10 ⁰
0,15	1,95.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,27.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,63.10 ⁰	2,75.10 ⁰	2,86.10 ⁰	3,02.10 ⁰
0,2	3,32.10 ⁰	3,57.10 ⁰	4,19.10 ⁰	4,76.10 ⁰	5,19.10 ⁰	5,48.10 ⁰	5,76.10 ⁰	6,19.10 ⁰
0,3	5,12.10 ⁰	5,72.10 ⁰	7,22.10 ⁰	8,69.10 ⁰	9,94.10 ⁰	1,09.10 ¹	1,18.10 ¹	1,31.10 ¹
0,4	8,22.10 ⁰	9,71.10 ⁰	1,38.10 ¹	1,83.10 ¹	2,26.10 ¹	2,62.10 ¹	2,96.10 ¹	3,45.10 ¹
0,5	1,03.10 ¹	1,26.10 ¹	1,91.10 ¹	2,66.10 ¹	3,43.10 ¹	4,13.10 ¹	4,83.10 ¹	5,76.10 ¹
0,6	1,13.10 ¹	1,40.10 ¹	2,17.10 ¹	3,07.10 ¹	3,98.10 ¹	4,83.10 ¹	5,67.10 ¹	6,77.10 ¹
0,8	1,21.10 ¹	1,52.10 ¹	2,43.10 ¹	3,49.10 ¹	4,61.10 ¹	5,68.10 ¹	6,77.10 ¹	8,10.10 ¹
1	1,19.10 ¹	1,50.10 ¹	2,41.10 ¹	3,47.10 ¹	4,59.10 ¹	5,67.10 ¹	6,77.10 ¹	8,07.10 ¹
1,5	1,02.10 ¹	1,31.10 ¹	2,16.10 ¹	3,17.10 ¹	4,27.10 ¹	5,40.10 ¹	6,58.10 ¹	7,86.10 ¹
2	9,11.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,93.10 ¹	2,83.10 ¹	3,81.10 ¹	4,81.10 ¹	5,87.10 ¹	7,10.10 ¹
3	7,27.10 ⁰	9,27.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,30.10 ¹	3,11.10 ¹	3,90.10 ¹	4,74.10 ¹	5,84.10 ¹
4	6,00.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,98.10 ¹	2,78.10 ¹	3,59.10 ¹	4,47.10 ¹	5,65.10 ¹
5	5,35.10 ⁰	6,80.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,88.10 ¹	2,76.10 ¹	3,70.10 ¹	4,75.10 ¹	6,29.10 ¹
6	4,85.10 ⁰	6,18.10 ⁰	1,09.10 ¹	1,81.10 ¹	2,78.10 ¹	3,89.10 ¹	5,22.10 ¹	7,23.10 ¹
8	4,50.10 ⁰	5,80.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,95.10 ¹	3,31.10 ¹	5,13.10 ¹	7,64.10 ¹	1,19.10 ²
10	4,37.10 ⁰	5,77.10 ⁰	1,14.10 ¹	2,24.10 ¹	4,18.10 ¹	7,21.10 ¹	1,20.10 ²	2,06.10 ²
15	5,09.10 ⁰	7,31.10 ⁰	1,85.10 ¹	4,76.10 ¹	1,18.10 ²	2,77.10 ²	6,24.10 ²	1,46.10 ³

Çizelge 4.22. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=0,5-7)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC3)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0,015	1,00.10 ⁰	1,00.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰
0,03	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,04.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,05.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰	1,06.10 ⁰
0,04	1,31.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,80.10 ⁰	1,85.10 ⁰	1,89.10 ⁰	1,91.10 ⁰	1,93.10 ⁰
0,05	1,32.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰
0,06	1,32.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,46.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,52.10 ⁰
0,08	1,27.10 ⁰	1,33.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,38.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,40.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,42.10 ⁰
0,1	1,18.10 ⁰	1,24.10 ⁰	1,31.10 ⁰	1,34.10 ⁰	1,37.10 ⁰	1,39.10 ⁰	1,41.10 ⁰	1,43.10 ⁰
0,15	1,30.10 ⁰	1,44.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,68.10 ⁰	1,74.10 ⁰	1,80.10 ⁰	1,85.10 ⁰	1,90.10 ⁰
0,2	1,67.10 ⁰	2,00.10 ⁰	2,37.10 ⁰	2,59.10 ⁰	2,76.10 ⁰	2,91.10 ⁰	3,05.10 ⁰	3,18.10 ⁰
0,3	1,70.10 ⁰	2,17.10 ⁰	2,84.10 ⁰	3,35.10 ⁰	3,76.10 ⁰	4,13.10 ⁰	4,46.10 ⁰	4,78.10 ⁰
0,4	1,83.10 ⁰	2,48.10 ⁰	3,53.10 ⁰	4,42.10 ⁰	5,23.10 ⁰	5,98.10 ⁰	6,72.10 ⁰	7,44.10 ⁰
0,5	1,83.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,78.10 ⁰	4,92.10 ⁰	6,00.10 ⁰	7,06.10 ⁰	8,11.10 ⁰	9,18.10 ⁰
0,6	1,81.10 ⁰	2,52.10 ⁰	3,85.10 ⁰	5,10.10 ⁰	6,33.10 ⁰	7,54.10 ⁰	8,76.10 ⁰	1,00.10 ⁰
0,8	1,73.10 ⁰	2,42.10 ⁰	3,76.10 ⁰	5,08.10 ⁰	6,41.10 ⁰	7,76.10 ⁰	9,14.10 ⁰	1,06.10 ⁰
1	1,67.10 ⁰	2,31.10 ⁰	3,59.10 ⁰	4,88.10 ⁰	6,18.10 ⁰	7,52.10 ⁰	8,91.10 ⁰	1,03.10 ⁰
1,5	1,46.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,92.10 ⁰	3,98.10 ⁰	5,09.10 ⁰	6,26.10 ⁰	7,49.10 ⁰	8,79.10 ⁰
2	1,42.10 ⁰	1,85.10 ⁰	2,74.10 ⁰	3,67.10 ⁰	4,65.10 ⁰	5,68.10 ⁰	6,76.10 ⁰	7,90.10 ⁰
3	1,36.10 ⁰	1,71.10 ⁰	2,42.10 ⁰	3,14.10 ⁰	3,89.10 ⁰	4,67.10 ⁰	5,49.10 ⁰	6,35.10 ⁰
4	1,30.10 ⁰	1,59.10 ⁰	2,15.10 ⁰	2,72.10 ⁰	3,31.10 ⁰	3,92.10 ⁰	4,57.10 ⁰	5,26.10 ⁰
5	1,28.10 ⁰	1,54.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,53.10 ⁰	3,03.10 ⁰	3,56.10 ⁰	4,11.10 ⁰	4,71.10 ⁰
6	1,25.10 ⁰	1,48.10 ⁰	1,91.10 ⁰	2,34.10 ⁰	2,78.10 ⁰	3,25.10 ⁰	3,74.10 ⁰	4,27.10 ⁰
8	1,23.10 ⁰	1,43.10 ⁰	1,81.10 ⁰	2,18.10 ⁰	2,58.10 ⁰	3,00.10 ⁰	3,45.10 ⁰	3,95.10 ⁰
10	1,19.10 ⁰	1,36.10 ⁰	1,70.10 ⁰	2,05.10 ⁰	2,42.10 ⁰	2,83.10 ⁰	3,29.10 ⁰	3,80.10 ⁰
15	1,16.10 ⁰	1,33.10 ⁰	1,66.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,97.10 ⁰	3,56.10 ⁰	4,27.10 ⁰

Çizelge 4.23. TZC3 numunesi için MFP'in bir fonksiyonu olarak foton enerjisine karşılık EABF değerleri (MFP=8-40)

Enerji (MeV)	MFP'nin bir fonksiyonu olarak EABF (TZC3)							
	8	10	15	20	25	30	35	40
0,015	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰	1,01.10 ⁰
0,02	1,02.10 ⁰	1,02.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰	1,03.10 ⁰
0,03	1,06.10 ⁰	1,07.10 ⁰	1,08.10 ⁰	1,09.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰	1,10.10 ⁰
0,04	1,94.10 ⁰	1,96.10 ⁰	2,00.10 ⁰	2,03.10 ⁰	2,05.10 ⁰	2,07.10 ⁰	2,08.10 ⁰	2,09.10 ⁰
0,05	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,51.10 ⁰	1,52.10 ⁰	1,52.10 ⁰	1,52.10 ⁰	1,52.10 ⁰
0,06	1,54.10 ⁰	1,56.10 ⁰	1,63.10 ⁰	1,70.10 ⁰	1,77.10 ⁰	1,84.10 ⁰	1,90.10 ⁰	1,98.10 ⁰
0,08	1,43.10 ⁰	1,45.10 ⁰	1,49.10 ⁰	1,53.10 ⁰	1,55.10 ⁰	1,57.10 ⁰	1,59.10 ⁰	1,62.10 ⁰
0,1	1,46.10 ⁰	1,50.10 ⁰	1,61.10 ⁰	1,71.10 ⁰	1,79.10 ⁰	1,86.10 ⁰	1,93.10 ⁰	2,05.10 ⁰
0,15	1,94.10 ⁰	2,04.10 ⁰	2,26.10 ⁰	2,47.10 ⁰	2,63.10 ⁰	2,74.10 ⁰	2,85.10 ⁰	3,02.10 ⁰
0,2	3,30.10 ⁰	3,55.10 ⁰	4,15.10 ⁰	4,72.10 ⁰	5,15.10 ⁰	5,43.10 ⁰	5,70.10 ⁰	6,13.10 ⁰
0,3	5,09.10 ⁰	5,68.10 ⁰	7,17.10 ⁰	8,62.10 ⁰	9,85.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,17.10 ¹	1,30.10 ¹
0,4	8,17.10 ⁰	9,65.10 ⁰	1,37.10 ¹	1,82.10 ¹	2,24.10 ¹	2,59.10 ¹	2,93.10 ¹	3,41.10 ¹
0,5	1,03.10 ¹	1,25.10 ¹	1,89.10 ¹	2,64.10 ¹	3,40.10 ¹	4,09.10 ¹	4,78.10 ¹	5,70.10 ¹
0,6	1,13.10 ¹	1,40.10 ¹	2,16.10 ¹	3,04.10 ¹	3,95.10 ¹	4,79.10 ¹	5,62.10 ¹	6,70.10 ¹
0,8	1,20.10 ¹	1,52.10 ¹	2,41.10 ¹	3,47.10 ¹	4,58.10 ¹	5,64.10 ¹	6,72.10 ¹	8,04.10 ¹
1	1,18.10 ¹	1,50.10 ¹	2,40.10 ¹	3,46.10 ¹	4,57.10 ¹	5,64.10 ¹	6,73.10 ¹	8,02.10 ¹
1,5	1,02.10 ¹	1,31.10 ¹	2,16.10 ¹	3,16.10 ¹	4,26.10 ¹	5,39.10 ¹	6,56.10 ¹	7,84.10 ¹
2	9,10.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,93.10 ¹	2,83.10 ¹	3,81.10 ¹	4,81.10 ¹	5,87.10 ¹	7,09.10 ¹
3	7,27.10 ⁰	9,27.10 ⁰	1,54.10 ¹	2,30.10 ¹	3,11.10 ¹	3,90.10 ¹	4,75.10 ¹	5,85.10 ¹
4	6,00.10 ⁰	7,62.10 ⁰	1,28.10 ¹	1,98.10 ¹	2,78.10 ¹	3,60.10 ¹	4,47.10 ¹	5,66.10 ¹
5	5,35.10 ⁰	6,80.10 ⁰	1,17.10 ¹	1,88.10 ¹	2,76.10 ¹	3,70.10 ¹	4,76.10 ¹	6,30.10 ¹
6	4,85.10 ⁰	6,18.10 ⁰	1,09.10 ¹	1,81.10 ¹	2,78.10 ¹	3,90.10 ¹	5,23.10 ¹	7,24.10 ¹
8	4,50.10 ⁰	5,81.10 ⁰	1,08.10 ¹	1,95.10 ¹	3,32.10 ¹	5,15.10 ¹	7,68.10 ¹	1,20.10 ²
10	4,38.10 ⁰	5,78.10 ⁰	1,15.10 ¹	2,25.10 ¹	4,20.10 ¹	7,25.10 ¹	1,21.10 ²	2,08.10 ²
15	5,11.10 ⁰	7,34.10 ⁰	1,86.10 ¹	4,80.10 ¹	1,20.10 ²	2,80.10 ²	6,32.10 ²	1,48.10 ³

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İyonlaştırıcı radyasyon, özellikle X-ışını ve gama radyasyonu, insan sağlığı üzerinde DNA hasarı ve kanser riski gibi ciddi tehditler oluştururken, teknolojik sistemlerde malzeme deformasyonuna yol açarak güvenli zırhlama malzemelerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Geleneksel zırhlama materyalleri olan kurşun, beton ve çelik, yüksek zırhlama kapasitelerine rağmen toksisite, ağırlık ve işlenme zorlukları gibi dezavantajlar taşır. Camlar, şeffaflıkları, modifiye edilebilirlikleri ve yapısal esneklikleriyle çevre dostu alternatifler sunar; özellikle tellür oksit tabanlı camlar, yüksek yoğunluk, kimyasal kararlılık ve görünür bölgede optik şeffaflıklarıyla X-ışını ve gama zırhlamasında öne çıkar. TeO_2 camlar, düşük fonon enerjisi ve geniş şeffaflık aralığıyla nükleer enerji, medikal radyoloji ve fotonik uygulamalarda etkili zırhlama sağlar. Bu çalışma, TeO_2 - ZnO - ZnF_2 esaslı oksiflorür camlara % 0-3 mol oranlarında CeF_3 katkısı yapılarak hazırlanan TZC_x (x = 0, 1, 2, 3) cam numunelerinin fiziksel, yapısal, optik ve X-ışını ile gama radyasyonu zırhlama özelliklerini incelemeyi amaçlamıştır. CeF_3 katkısının camların zırhlama performansını, görünür bölgedeki optik şeffaflığını ve yapısal düzenini nasıl etkilediği detaylı bir şekilde araştırılmış, bu camların şeffaf, çevre dostu zırhlama malzemesi olarak potansiyeli değerlendirilmiştir.

CeF_3 katkısı, camların yoğunluğunu artırmış; TZ numunesinde $5,496 \text{ g/cm}^3$ olan yoğunluk, %3 mol CeF_3 içeren TZC3'te $5,5164 \text{ g/cm}^3$ 'e yükselmiştir. Molar hacim, CeF_3 katkısıyla $25,1696 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 'den $25,3962 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 'e artmıştır. Flor iyonlarının (F^-) oksijen iyonları (O^{2-}) ile yer değiştirmesi, cam ağı yapısını gevşeterek molar hacimde genişlemeye neden olmuştur. XRD analizleri, tüm numunelerin amorf yapısını doğrulamış ve CeF_3 katkısının kristalleşme eğilimini tetiklemediği gözlenmiştir. Bu durum CeF_3 'ün homojen dağılımını ve amorf yapıyı koruduğunu gösterir.

Optik özellikler açısından, UV-Vis spektroskopisi yardımıyla hesaplanan optik bant aralığı (E_g), CeF_3 katkısıyla azalmıştır; TZ için $3,046 \text{ eV}$ iken TZC3'te $2,004 \text{ eV}$ 'e düşmüştür. Bu, Ce^{+4} iyonlarının Te-O-Ce bağları oluşturarak yeni enerji seviyeleri oluşturması ve flor iyonlarının bağ yapmayan oksijen (NBO) sayısını artırmasıyla açıklanabilir. Urbach enerjisi (E_u), yapısal düzensizliklerin göstergesi olarak TZ'de $0,2154 \text{ eV}$ iken düzensiz bir şekilde TZC3'te $0,1680 \text{ eV}$ 'e azalmış, CeF_3 'ün yapısal düzeni

iyileştirdiğini göstermiştir. Görünür bölgede geçirgenlik %80'in üzerinde kalmış, ancak TZC3'te UV bölgesinde (200–400 nm) artan absorpsiyon ve hafif sarımsı renklenme gözlenmiştir. Bu durum Ce^{+4} iyonlarının 4f-5d geçişlerinden kaynaklanmaktadır. Flor iyonları, düşük fonon enerjisiyle optik şeffaflığı desteklemiş, ancak yüksek CeF_3 oranlarında renklenme artmış ve farklılaşmıştır.

Radyasyon zırhlama özelliklerinde, CeF_3 katkısı belirgin iyileşmeler sağlamıştır. Lineer zayıflatma katsayısı (LAC), 0,015 MeV'de TZ için $245,692 \text{ cm}^{-1}$ iken TZC3'te $248,183 \text{ cm}^{-1}$ 'e yükselmiştir. Bu yükselme eğilimi seryumun yüksek atom numarası sayesinde fotoelektrik olay ve Compton saçılmasının artmasından kaynaklanır. Kütle zayıflatma katsayısı (MAC), 0,015 MeV'de TZ için $44,704 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken TZC3'te $44,990 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ye ulaşmıştır. Yarı değer kalınlığı (HVL), TZC3'te 0,015 MeV'de 0,003 cm ile düşük bir seviyeye inmiş, daha ince malzeme ile yüksek zırhlama sağlanabildiğini göstermiştir. Enerji yığılma faktörü (EBF) ve enerji soğurma yığılma faktörü (EABF), 0,015–15 MeV aralığında ve 0,5–40 MFP için analiz edilmiş; TZC3, düşük enerjilerde (0,015–0,1 MeV) en düşük yığılma faktörlerini göstermiştir. CeF_3 , foton saçılmasını azaltarak X-ışını ve gama zırhlama etkinliğini artırmıştır. Bu çalışmada nötron zırhlama ölçümleri yapılmamıştır. Ancak flor iyonlarının varlığı, nötron zırhlama potansiyelini artırabileceği yönünde bir fikir yaratmıştır.

CeF_3 , cam ağına Ce^{+4} ve F^- iyonları olarak katılarak fiziksel ve zırhlama özelliklerini güçlendirir. Özellikle Ce^{+4} iyonları, Te-O-Ce bağlarıyla ağı sıkılaştırır ve yoğunluğu artırır; F^- iyonları, ağı gevşetir ve optik özellikleri iyileştirir. Optik açıdan, Ce^{+4} iyonlarının 4f-5d geçişleri UV absorpsiyonunu artırır ve E_g 'yi azaltır; flor, düşük fonon enerjisiyle görünür bölgede şeffaflığı korur. Zırhlama açısından, CeF_3 , fotoelektrik olay ve Compton saçılmasını artırarak LAC ve MAC'yi yükseltir; düşük HVL ve mfp, TZC3'ün yüksek etkinlik sunduğunu gösterir. TZC3, tüm enerji aralıklarında katkısız ve diğer düşük katkılı numuneler içinde üstün zırhlama parametreleriyle öne çıkar ve görünür bölgedeki şeffaflığı, modifiye edilebilirliği ile nükleer enerji, X-ışını görüntüleme odaları gibi medikal radyoloji ve fotonik uygulamalar için uygundur.

Bu çalışma, CeF_3 katkısının TeO_2 -ZnO-ZnF₂ camlarının fiziksel, optik ve X-ışını ile gama zırhlama özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini başarılı bir şekilde göstermiş ve

beklentileri karşılamıştır. TZC3, özellikle düşük enerjili gama zırhlamada (0,015–0,1 MeV) üstün performans sergileyerek şeffaf zırhlama malzemesi olarak yüksek potansiyel sunmuştur. Ancak, %3 mol CeF_3 konsantrasyonunda gözlenen hafif renklenme, optik uygulamalarda sınırlayıcı olabilir ve bu konuda ek düzenlemeler gereklidir. Bu malzemeler, yüksek yoğunlukları ve düşük HVL değerleri sayesinde nükleer tesislerde reaktör odası pencereleri gibi X-ışını ve gama zırhlaması gereken alanlarda kullanılabilir. Şeffaflıkları, görüntülemeyi mümkün kılar. Medikal radyolojide, örneğin X-ışını görüntüleme odalarında veya radyoterapi ünitelerinde, kurşun camlara çevre dostu alternatif olarak uygulanabilir. Hafiflikleri ve işlenebilirlikleri avantaj sağlar. Fotonik uygulamalarda, düşük fonon enerjisi ve yüksek geçirgenlik, optik dalga kılavuzları veya lazer sistemlerinde kullanım potansiyeli sunar. Gelecekte, CeF_3 'ün bor veya fosfat içerikli diğer tellür bazlı oksiflorür cam kompozisyonlarına katkısının X-ışını ve gama zırhlama ile optik özellikler üzerindeki etkileri araştırılabilir. %3 molden daha yüksek CeF_3 konsantrasyonlarının renklenme ve kristalleşme riskleri değerlendirilmeli, sertlik ve kırılgenlik gibi mekanik özellikler pratik uygulamalar için belirlenmelidir. GdF_3 veya LaF_3 gibi diğer nadir toprak katkılarıyla karşılaştırmalı çalışmalar, CeF_3 'ün avantajlarını daha iyi ortaya koyabilir. Bu çalışmalar, şeffaf ve çevre dostu zırhlama malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abouhaswa, A. S., Tekin, H. O., Kavaz, E., & Perisanoglu, U. (2021). *Optical and nuclear radiation protection characteristics of lithium bismo-borate glasses: Role of ZrO_2 substitution*. Radiation Physics and Chemistry, 183, 109428. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109428>
- Agar, O., Sayyed, M. I., Akman, F., Tekin, H. O., & Kaçal, M. R. (2019). *An extensive investigation on gamma ray shielding features of Pd/Ag-based alloys*. Nuclear Engineering and Technology, 51(1), 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.12.014>
- Alharshan, G. A., Alrowaili, Z. A., Mahmoud, Z. M. M., Olarinoye, I. O., & Al-Buriahi, M. S. (2022). *Effect of Nb_2O_5 inclusion on the radiation shielding efficiency of TeO_2 – ZnO – LiF – NaF glass system*. Radiation Physics and Chemistry, 196, 110127. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110127>
- Analytikjena. (2025). *Products*. Erişim: <https://www.analytik-jena.com/> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Aydın, H. (2019). *Biyoaktif özellikli farklı amorf yapıların gama ve nötron zayıflatma özelliklerinin monte carlo methodu ile incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=Q2vanndivMvDZVLPpVpp1A&no=wc75AJolbmIDpGBqRN3W4w>
- Bassam, S. A., Naseer, K. A., Mahmoud, K. A., Suchand Sangeeth, C. S., Sayyed, M. I., Alqahtani, M. S., & El Shiekh, E. (2024). *Examination of the ionizing radiation shielding behavior of the zinc boro-tellurite glasses doped with dysprosium oxide*. Radiation Physics and Chemistry, 215, 111359. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111359>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bulus, I. vd., (2019). *Influence of Eu^{3+} dopant on physical and optical properties of lithium-borosulfophosphate glasses*, Nigerian Journal of Technological Development, 15(4) 121-127.
- Beutel, J. (2000). *Handbook of Medical Imaging*. Amerika Birleşik Devletleri: SPIE Press.
- Bruker. (2025). *Products & Solutions*. Erişim: <https://www.bruker.com/en.html> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Çelikkbilek Ersundu, M., Ersundu, A. E., Gedikoğlu, N., Şakar, E., Büyükyıldız, M., & Kurudirek, M. (2019). *Physical, mechanical and gamma-ray shielding properties of highly transparent $ZnO-MoO_3-TeO_2$ glasses*. Journal of Non-Crystalline Solids, 524, 119648. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119648>
- Çelikkbilek, M. (2013). *Tellürit sistemlerin camlaşma davranışlarının, cam özelliklerinin ve termokromik davranışlarının incelenmesi* [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=LM4cQ01Fc4EJuBw4Rpy3yw&no=rABcdsMYhtC1ai3goZdncg>
- Çetin, S. (2012). *Deli Halil (Osmaniye) bazaltik pomzalarının cam seramik yapımında kullanım olanakları ve karakterizasyonu* [Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=SAAgI6CZWfVaNQripFzyig&no=snf280Z26m-t4iSnpgXY5Q>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Çiçek, Ö. F. (2020). *Bazı yapı malzemelerinin radyasyon geçirgenliği açısından monte carlo yöntemi kullanılarak incelenmesi üretimi* [Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=vDcg9PEwrE478-zec00P2Q&no=4z5TRwZcX_V4rl8f2NkVaQ
- Du, Y., Han, S., Zou, Y., Yuan, J., Shao, C., Jiang, X., & Chen, D. (2019). *Luminescence properties of Ce³⁺-doped oxyfluoride aluminosilicate glass and glass ceramics*. Optical Materials, 89, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.018>
- Hubbell, J. H. (1982). *Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients*. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90248-4](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90248-4)
- Irmak, T. (2012). *TeO₂ – ZnO sisteminin termal ve mikroyapısal incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=RMDojXmEGxFVeNU5kGJBlg&no=SlhIlukNmHyN6R3utZqQ4A>
- Ilik, E., Kiliç, G., Issever, U. G., Issa, S. A. M., Zakaly, H. M. H., & Tekin, H. O. (2022). *Cerium (IV) oxide reinforced lithium-borotellurite glasses: A characterization study through physical, optical, structural and radiation shielding properties*. Ceramics International, 48(1), 1152–1165. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.200>
- Issa, S. A. M. (2016). *Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO–B₂O₃ glass system*. Radiation Physics and Chemistry, 120, 33–37. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.11.025>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Issa, S.A.M., vd., (2019). *The effective contribution of PbO on nuclear shielding properties of $x\text{PbO}-(100-x)\text{P}_2\text{O}_5$ glass system: a broad range investigation*. Applied Physics A, 125(9) 1-16.
- Kaky, K. M., Sayyed, M. I., Mhareb, M. H. A., Abbas, H. H., & Baki, S. O. (2023). *Physical, structural, mechanical, and various radiation shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-GeO}_2\text{-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-M}$ ($M = \text{WO}_3, \text{MoO}_3, \text{PbO}$, and CuO) glasses*. Optical Materials, 145, 114370. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114370>
- Kaewkhao, J., Pokaipisit, A., & Limsuwan, P. (2010). *Study on borate glass system containing with Bi_2O_3 and BaO for gamma-rays shielding materials: Comparison with PbO* . Journal of Nuclear Materials, 399, 38–40. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.11.010>
- Kharita, M.H., vd., (2012). *Shielding properties of lead and barium phosphate glasses*. Radiat Phys Chem., 81(10) 1568-1571.
- Kern & Sohn. (2025). *Products*. Erişim: <https://www.kern-sohn.com/shop/en/> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Kılıç, G. (2006). *Değişik bileşimli camların hazırlanması, fiziksel ve optik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=pimiPOMHaK7G9tIlgBaozRw&no=roKaGsfPlXlVWhn6EaN4Q>
- Kilic, G., Ilik, E., Mahmoud, K. A., El-Mallawany, R., El-Agawany, F. I., & Rammah, Y. S. (2020). *Novel zinc vanadyl boro-phosphate glasses: $\text{ZnO-V}_2\text{O}_5\text{-P}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3$: Physical, thermal, and nuclear radiation shielding properties*. Ceramics International, 46(11), 19318–19327. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.272>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Kılıç, G., & İşsever, U. G. (2020). *Optoelektronik uygulamalar için Nb₅ katkılı çinko borat camların sentezi ve optik, termal ve yapısal özelliklerinin belirlenmesi*. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1), 66–80. <https://doi.org/10.28979/comufbed.630002>
- Kılıç, G., İşsever, U. G., & İlik, E. (2019). *The synthesis and characterization of zinc-tellurite semiconducting oxide glasses containing Ta₂O₅*. Materials Research Express, 6(6), 065907. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0b1e>
- Kilic, G., Issever, U. G., & Ilik, E. (2019). *Characterization of Er³⁺ doped ZnTeTa semiconducting oxide glass*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 30, 8920–8930. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01220-4>
- Lakshminarayana, G., Weis, E. M., Lira, A. C., Caldiño, U., Williams, D. J., & Hehlen, M. P. (2013). *Cross relaxation in rare-earth-doped oxyfluoride glasses*. Journal of Luminescence, 139, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.02.039>
- Metkon. (2025). *Products*. Erişim: <https://www.metkon.com/> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Nabertherm. (2025). *Products*. Erişim: <https://nabertherm.com/en> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Oto, B., vd., (2019). *Nuclear radiation shielding and mechanical properties of colemanite mineral doped concretes*. Radiation Effects and Defects in Solids, 174(9-10) 899-914.
- Rammah, Y.S., vd., (2020). *Novel vanadyl lead-phosphate glasses: P₂O₅–PbO–ZnONa₂O–V₂O₅: Synthesis, optical, physical and gamma photon attenuation properties*. Journal of Non-Crystalline Solids, 534 119944.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Rammah, Y. S., Kavaz, E., Perişanoğlu, U., Kilic, G., El-Agawany, F. I., & Tekin, H. O. (2020). *Charged particles and gamma-ray shielding features of oxyfluoride semiconducting glasses: $TeO_2-Ta_2O_5-ZnO/ZnF_2$* . *Ceramics International*, 46(16, Part A), 25035–25042. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.289>
- Sayyed, M. I., Askin, A., Zaid, M. H. M., Olukotun, S. F., Khandaker, M. U., Tishkevich, D. I., & Bradley, D. A. (2021). *Radiation shielding and mechanical properties of $Bi_2O_3-Na_2O-TiO_2-ZnO-TeO_2$ glass system*. *Radiation Physics and Chemistry*, 186, 109556. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109556>
- Sayyed, M.I., vd., (2020). *Lead borate glasses doped by lanthanum: Synthesis, physical, optical, and gamma photon shielding properties*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 527 119731.
- Singh, J., Singh, H., Sharma, J., Singh, T., & Singh, P. S. (2018). *Fusible alloys: A potential candidate for gamma rays shield design*. *Progress in Nuclear Energy*, 106, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.04.002>
- Singh, V.P., vd., (2013). *Monte Carlo simulation of gamma ray shielding parameters of concretes*. *Nuclear Engineering and Design*, 265 1071-1077.
- Singh, V.P. ve Badiger, N.M., (2014). *Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials*. *Annals of Nuclear Energy*, 64 301-310.
- Singh, T., vd., (2018). *Gamma rays' shielding parameters for some Pb-Cu binary alloys*. *Engineering science and technology, an international journal*, 21(5), 1078-1085.
- Seven Uzun, A. (2021). *Radyasyonun ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Kurşunun İnsan Sağlığına Etkileri Üzerine Bir Araştırma*. *Dünya Sağlık Ve Tabiat Bilimleri Dergisi*, 4(2), 65-74.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sodhi, K. S., Krishna, S., Saxena, A. K., Sinha, A., Khandelwal, N., & Lee, E. Y. (2015). *Clinical application of “Justification” and “Optimization” principle of ALARA in pediatric CT imaging: ‘How many children can be protected from unnecessary radiation?’*. European Journal of Radiology. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.05.030>
- Süt, A. (2023). *Katkılı ince filmlerin gama radyasyon zayıflatma davranışlarının belirlenmesi üretimi* [Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=G_oJ1rKE4SgJUkomyAKpR4pmuvoNNKtMFWiFKx2REoBm4GEj3eXnO_5zsQSMV4_a
- Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., & Kurudirek, M. (2020). *Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry*. Radiation Physics and Chemistry, 166, 108496. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
- T.C. İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2025). *Kimyasal Biyolojik Radyolojik Nükleer Tehditler*. Erişim: <https://www.afad.gov.tr/kbrn> . Erişim Tarihi: Nisan/2025
- Tatar, D. (2006). *Sodyum borsilikat camlarından yüksek silikalı camların üretimi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=2uqbHcrMmvSjdyqNi3MTSg&no=DI7W1Oe1133bDQUij5jhhQ>

KAYNAKLAR DİZİNİ

Tekin, H.O. ve Kilicoglu, O., (2020). *The influence of gallium (Ga) additive on nuclear radiation shielding effectiveness of Pd/Mn binary alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 815 152484.

Wang, Z., & Cheng, L. (2017). *Gamma ray irradiation-induced variations in structure and optical properties of cerium/titanium-doped oxyfluoride transparent glass-ceramics*. Materials Research Bulletin, 92, 104–112.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.04.010>