

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANA BİLİM DALI

KURŞUN İÇEREN LEHİM ALAŞIMLARININ ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Vildan BEYAZ

HAZİRAN 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

KURŞUN İÇEREN LEHİM ALAŞIMLARININ ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Vildan BEYAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (FİZİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 /05/ 2025

Tezin Savunma Tarihi : 11/06/ 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Engin TIRAŞOĞLU

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Kurşun İçeren Lehim Alaşımlarının Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi’ adlı çalışma, lehimlerin üretilmesi Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği Laboratuvarında; XRD, SEM, malzemelerin radyasyon ölçümleri Recep Tayip Erdoğan Üniversitesi Nükleer Fizik ve Merkezi Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

Lisansüstü eğitim sürecim boyunca tecrübelerini benden esirgemeyen, her türlü bilgi ve paylaşıma ulaşmama yardımcı olan öneri ve yönlendirmelerinden faydalandığım başta saygıdeğer hocam tez danışmanım sayın Prof. Dr. Engin TIRAŞOĞLU hocama teşekkür eder saygılarımı sunarım. Tezimin her aşamasında sabırla her türlü imkânı sağlayan, deneysel ve teorik olmak üzere bilgi ve tecrübeleriyle bana yön veren Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Canan AKSOY hocama teşekkür eder ve saygılarımı sunarım. Deneysel çalışmalarında gerekli yardımı ve ilgiliyi gösteren, bilgi ve tecrübelerini paylaşan Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Öğretim Üyesi saygıdeğer hocam Doç. Dr. Serdar DİZMAN ve Merkezi Araştırma Laboratuvarı Öğretim Üyesi Dr. Öğretim Görevlisi Tuğba BAYAZIT hocama emeklerinden ve katkılarından dolayı teşekkür eder saygılarımı sunarım. Yüksek lisans aşamasında gerekli yardımı ve ilgiyi esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Gökhan APAYDIN hocama ve üzerimde emeği olan tüm değerli hocalarıma teşekkür eder saygılarımı sunarım. Ayrıca, yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmanın gerçekleşmesine katkı sağlayan yardımlarını esirgemeyen kardeşlerim Hüseyin BEYAZ ve Fatih BEYAZ’a, ablam Ayşe YILMAZ’a, yüksek lisans çalışmamda çeşitli konulardaki yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Ali İNAN’ a, maddi ve manevi bana her zaman destek olan sevgili aileme en içten dileklerimle saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Vildan BEYAZ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Kurşun İçeren Lehim Alaşımlarının Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Engin TIRAŞOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

11/06/2025

Vildan BEYAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. X-ışınları	3
1.1.1. Karakteristik X-Işınlarının Oluşumu	4
1.1.2. X-Işınlarının Temel Özellikleri	5
1.1.3. X-Işını Kırınımı ve Bragg Kırınım Yasası	6
1.2. Gama Işınları.....	7
1.3. Gama ve X-ışınlarının Madde ile Etkileşmesi	7
1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Soğrulması.....	8
1.4.1. Fotoelektrik Olayı.....	9
1.4.2. Çift Oluşumu	10
1.5. Elektromanyetik Radyasyonun Saçılması	11
1.5.1. Koherent Saçılma.....	11
1.5.2. İnkoherent Saçılma	11
1.6. Compton Saçılması	12
1.7. Radyoizotop Kaynaklar	13
1.7.1. ²⁴¹ Am Radyoizotop Kaynağı	14
1.7.2. ⁶⁰ Co Radyoizotop Kaynağı	15
1.7.3. ¹³⁷ Cs Radyoizotop Kaynağı	16
1.8. Radyasyon ve Türleri.....	17
1.9. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi.....	18
1.10. Gama Radyasyonu veya Gama Işını	18
1.11. Radyasyondan Korunma Yöntemleri.....	20
1.11.1. Mesafe (Uzaklık)	21

1.11.2. Zaman (Süre)	21
1.11.3. Zırhlama (Koruyucu Engel).....	22
1.11.4. Beer-Lambert Yasası ve Lineer Soğurma Katsayısı (LAC)	23
1.11.5. Kütle Soğurma Katsayısı (MAC)	24
1.11.6. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)	25
1.11.7. Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL)	25
1.11.8. Ortalama Serbest Yol (MFP)	26
1.11.9. Etkin Atom Numarası (Z_{eff}).....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Malzeme Üretimi	28
2.2. XRD (X-Işını Kırınımı)	30
2.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu).....	31
2.4. Deney Tasarımı ve Geometrisi	32
2.5. Phy-X/PSD ile Teorik Hesaplama	33
3. BULGULAR.....	34
3.1. Lineer Soğurma Katsayıları (LAC)	34
3.2. Kütle Soğurma Katsayıları (MAC).....	36
3.3. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)	38
3.4. Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL)	40
3.5. Ortalama Serbest Yol (MFP)	42
3.6. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})	44
3.7. XRD ve SEM/EDX Sonuçları	46
4. SONUÇLAR.....	51
5. ÖNERİLER	54
6. KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KURŞUN İÇEREN LEHİM ALAŞIMLARININ ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Vildan BEYAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞOĞLU
2025, 58 Sayfa

Gelişen teknoloji ile birlikte radyasyon yayan cihazların kullanılması, radyasyon maruziyetinin artmasına ve insanların bu tür cihazların yaymış olduğu radyasyona bağlı hastalıklara maruz kalmasına neden olmaktadır. Son zamanlarda bu tür cihazlardan yayılan radyasyonu en aza indirebilecek zırhlama malzemeleri üzerinde durulmaktadır. Bu tez çalışmasında kurşun (Pb) elementi; Bizmut (Bi), İndiyum (In), Kalay (Sn) elementleriyle birleştirilerek yedi farklı alaşım elde edilmiştir. Üretilen $Pb_{0.5}Bi_{0.4}In_{0.1}$; $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$; $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$; $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$; $Pb_{40}Sn_{60}$; $Pb_{60}Sn_{40}$ kurşun içeren alaşım numuneleri 59.5 keV, 1172 keV, 662 keV foton enerjisi aralığında ^{241}Am , ^{60}Co ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarından yayımlanan enerjilerde Ge dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zırh kalitesi için elde edilen lineer soğurma katsayısı (LAC), kütle soğurma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) deneysel değerleri ile teorik (Phy-X/PSD) sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon, Gama ve X-Işınları, Zırhlama parametreleri, Phy-X/PSD

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF SHIELDING PROPERTIES OF SOLDER ALLOYS CONTAINING LEAD

Vildan BEYAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Engin TIRAŞOĞLU
2025, 58 Pages

With the advancement of technology, the use of radiation-emitting devices has led to an increase in radiation exposure and caused people to be exposed to diseases related to the radiation emitted by such devices. Recently, there has been a focus on shielding materials that can minimize the radiation emitted by such devices. In this thesis study, seven different alloys were obtained by combining lead (Pb) element with Bismuth (Bi), Indium (In), Tin (Sn) elements. The produced $Pb_{0.5}Bi_{0.45}In_{0.1}$; $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$; $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$; $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$; $Pb_{40}Sn_{60}$; $Pb_{60}Sn_{40}$ lead containing alloy samples were carried out using a Ge detector in the photon energy range of 59.5 keV, 1172 keV, 662 keV at energies emitted from ^{241}Am , ^{60}Co and ^{137}Cs radioactive sources. The linear absorption coefficient (LAC), mass absorption coefficient (MAC), half value layer (HVL), tenth value layer (TVL), mean free path (MFP) and effective atomic number (Z_{eff}) obtained for the armor quality were compared with the experimental values and theoretical (Phy-X/PSD) results.

Key Words: Radiation, Gamma and X-Rays, Shielding parameters, Phy-X/PSD

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Elektromanyetik spektrum	1
Şekil 2.	Karakteristik X-ışınlarının oluşumu.....	5
Şekil 3.	X-ışını kırınımı.....	6
Şekil 4.	Gama ışını etkileşiminin üç farklı olayın baskın olduğu aralıklar	8
Şekil 5.	Fotoelektrik olayının şematik gösterimi	9
Şekil 6.	Çift oluşum olayının şematik gösterimi	10
Şekil 7.	Compton saçılması olayının şematik gösterimi	12
Şekil 8.	²⁴¹ Am elementinin bozunma şeması	15
Şekil 9.	⁶⁰ Co elementinin bozunum şeması.....	16
Şekil 10.	¹³⁷ Cs elementinin bozunum şeması.....	16
Şekil 11.	Radyasyon giriciliği	18
Şekil 12.	Radyasyondan korunmanın üç temel ilkesi	20
Şekil 13.	Kalınlığı dx olan bir malzemede elektromanyetik radyasyonun soğrulması	23
Şekil 14.	Kurşun ve kurşun içerikli lehim alaşım numunelerinin görünüşü	28
Şekil 15.	Germanyum dedektör (HPGe) sisteminin görünüşü	30
Şekil 16.	XRD Rigabu SmartLab cihazı	31
Şekil 17.	SEM/EDX JOEL 6610 taramalı elektron mikroskobu	32
Şekil 18.	Gama ışını soğurma sisteminin deneysel kurulum şeması.....	32
Şekil 19.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik LAC karşılaştırılmalı gösterimi	35
Şekil 20.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik MAC karşılaştırılmalı gösterimi	37
Şekil 21.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik HVL karşılaştırılmalı gösterimi	39
Şekil 22.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik TVL karşılaştırılmalı gösterimi.....	41
Şekil 23.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik MFP karşılaştırılmalı gösterimi	43
Şekil 24.	Numunelerin sırasıyla ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, ²⁴¹ Am radyoaktif kaynağına karşı deneysel ve teorik Z _{eff} karşılaştırılmalı gösterimi	45
Şekil 25.	Saf Pb numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu.....	46
Şekil 26.	Pb _{0.5} Bi _{0.45} In _{0.1} numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu.....	47

Şekil 27. $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu.....	47
Şekil 28. $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu	48
Şekil 29. $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu	48
Şekil 30. $Pb_{60}Sn_{40}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu	49
Şekil 31. $Pb_{40}Sn_{60}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu	49
Şekil 32. Tüm lehim numune alaşımları için XRD grafiği	50



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Radyasyon tipleri ve özellikleri.....	17
Tablo 2. Müsaade edilen maksimum doz miktarları.....	20
Tablo 3. RoHS tarafından belirlenen maddelerin maksimum konsantrasyon değerleri	23
Tablo 4. Kurşun içeren lehim alaşım numuneleri ve özellikleri.....	29
Tablo 5. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik LAC değeri 34	
Tablo 6. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik MAC değeri 36	
Tablo 7. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik HVL değeri 38	
Tablo 8. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik TVL değeri 40	
Tablo 9. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik MFP değeri 42	
Tablo 10. Pb ve Pb içelikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik Z_{eff} değeri.....	44

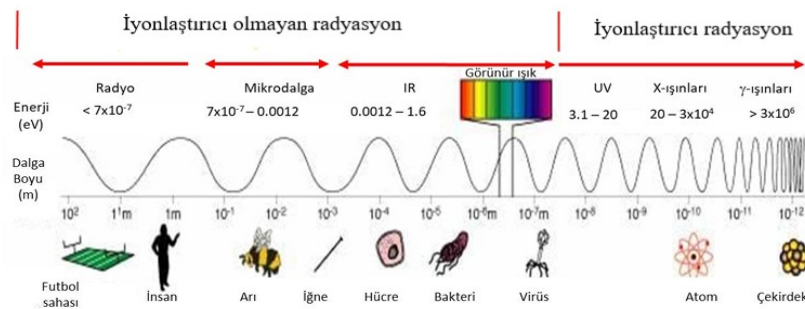
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Alfa ışını
β	: Beta ışını
γ	: Gama ışını
$\text{\AA}$	: Angstrom
Pb	: Kurşun elementi
Hg	: Cıva elementi
Ra	: Radyum elementi
Cd	: Kadminyum elementi
Cr	: Krom elementi
Fe	: Demir elementi
Ca	: Kalsiyum elementi
H	: Hidrojen elementi
O	: Oksijen elementi
Re	: Renyum elementi
Pu	: Plütonyum elementi
Np	: Neptünyum elementi
Ni	: Nikel elementi
Ba	: Baryum elementi
He	: Helyum elementi
^{241}Am	: Amercium radyoizotop kaynak
^{60}Co	: Kobalt radyoizotop kaynak
^{137}Cs	: Sezyum radyoizotop kaynak
μ	: Lineer soğurma katsayısı
I_0	: Gelen fotonun yoğunluğu
I	: Emici malzeme içinden geçen foton yoğunluğu
Z_{eff}	: Etkin atom yoğunluğu
A_i	: Alaşımı oluşturan i. elementin atomik kütlesi
n_i	: i. elementin ağırlıkça yüzdesi
λ	: Dalga boyu
n	: Kırınımın maksimum derecesi

d	: düzlemler arası mesafe
μ/ρ	: Kütle soğurma katsayısı
ALARA	: As-Low-As-Reasonably Achievable
BBP	: Bis (2-etilheksil) fitalat, butil benzil fitalat
DBP	: Dibutil fitalat
DIBP	: Diizobutil fitalat
HVL	: Yarı değer kalınlığı
LAC	: Lineer soğurma katsayısı (Linear absorption coefficient)
MAC	: Kütle soğurma katsayısı (Mass absorption coefficient)
MFP	: Ortalama serbest yol
PBB	: Polibromlu bifeniller
PBDE	: Polibromlu difenileterler
RoHS	: Elektrikli ve elektronik ekipmanlarda belirli tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanmasına ilişkin direktifi
TVL	: Onda bir değer kalınlığı
WEEE	: Elektrikli ve elektronik ekipman atıkları
Z_{eff}	: Etkin atom numarası

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte radyasyon yayan cihazların hayatımıza nüfuz etmesi bizleri radyasyon tehlikesi ile karşı karşıya getirmektedir. Günlük yaşamda kullanılan telefon, bilgisayar, televizyon; sağlık sektöründe de teşhis ve tedavi amaçlı kullanılan Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI), BT (Bilgisayarlı Tomografi), Röntgen gibi cihazların kullanılmasıyla birlikte insanlar, sağlığı tehdit eden durumlara maruz kalmaktadır. Bu durum son zamanlarda araştırmacıları insanları radyasyondan korumak ve insanların sağlığını etkilemeyecek veya daha az etkileyecek malzemeler üretme üzerine çalışmalar yürütmeye sevk etmiştir. Bu üretilen malzemeler fiziksel, elektrik ve manyetik özelliklere sahip olup bunların radyasyon içeren sistemlerde kullanılması durumunda malzemelerin zayıflatma özelliklerinin tespit edilmesi radyasyonun insan sağlığını tehdit eden durumları önlemek açısından önem taşımaktadır (Aksoy, Dizman, Çakır, Koparan, & Tıraşoğlu, 2021). Temelde doğal ve yapay olarak ikiye ayrılan radyasyon; elektromanyetik dalgalar ya da parçacıklar biçimindeki enerji aktarımı olarak ifade edilmektedir. Doğal radyasyon; insan katkısı olmadan doğada kendiliğinden oluşan güneşten ve uzaydan gelen kozmik ışınlardan, yer kürede bulunan radyoizotoplardan gelen radyasyondur. Yapay kaynaklı radyasyon ise insan faaliyetleri sonucu oluşan endüstride, tarım ve hayvancılıkta, bazı araştırma alanlarında kullanılan radyasyondur. Radyasyon taşınan enerjinin atomda elektron koparıp koparmaması sonucuna göre kendi içinde iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon şeklinde iki grupta incelenmektedir. Şekil 1’de atomaltı değerlerden başlayarak dalga boyları, frekanslarına göre binlerce kilometre uzunlukta olabilecek radyo dalgalarına kadar birçok farklı ışınım türlerinin dalga ve frekans değerleri gösterilmektedir.



Şekil 1. Elektromanyetik spektrum

Burada yalnızca gama (γ) ışınları ve X-ışınları iyonlaşmaya yetecek kadar enerjiye sahiptir. X-ışınları nükleer elektronlardan oluşurken, gama ışınları bir atomun çekirdek enerji seviyelerinde oluşur. İyonlaştırıcı radyasyonun sahip oldukları enerji hücre ve dokular tarafından soğrularak canlının mutasyona uğramasına veya ölmesine sebep olurlar. Radyasyonun canlı organizmalar üzerinde oluşturduğu hasarın büyüklüğünü vücuda alınan radyasyon doz miktarı ve maruz kalınan süre ile karakterize edilebilir. Ancak her zaman radyasyon kaynağından olan uzaklık ve radyasyonla geçirilen zaman yeterli olmayabilir. Bu yüzden günümüzde de birçok alanda kullanılan radyasyonunun şiddetini azaltmak için radyasyonla uğraşan kişi ve kaynak arasına radyasyonun zararlı etkilerini önlemek için zırhlama malzemeleri kullanılır. Zırh kalkını olarak toprak, beton, çelik, kurşun gibi zırhlama özellikleri yüksek olan malzemeler kullanılmaktadır (Uzun, 2021). Bu tez çalışmasında da iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerini önlemek için kurşun (Pb) elementi; kalay (Sn), indiyum (In), bizmut (Bi) elementleri ile birleştirilerek yedi farklı lehim alaşım zırhlama malzemesi üretilmiştir. Yüksek atom numarası ve düşük maliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılan zırhlama malzemelerinden biri olan kurşun atomunda çok sayıda proton ve elektron bulunduğundan dolayı bununla oluşturulan zırh malzemesi üzerinden geçen fotonları engelleyebilir. Kurşunun yüksek yoğunluğa ve çok sayıda elektrona sahip olması, γ -ışınlarının zırhlaması için tercih edilmektedir (Chen & Yan, 2023).

Kurşun (Pb), atom numarası 82, atomik kütlesi 207,2; erime noktası 327°C, kaynama noktası 1535°C olan gri renkli metalik parlaklığa, yumuşak, zehirli, düşük erime noktası ve kolayca şekillendirilebilen, farklı alaşımlar olarak kullanılabilen bir elementtir. Kurşun bazlı alaşımlar, yüksek atom numarası ve yoğunluğu nedeniyle radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılma potansiyeline sahiptirler. Erimiş kurşuna bizmut eklendiğinde kurşunun donma noktasını düşürür. Bu olay iki metalin ne bir bileşik ne de katı bir çözelti oluşturmadığı durumda ortaya çıkar. Bu olayın meydana geldiği nokta ötektik nokta olarak adlandırılır ve bu noktada eriyen bileşime ötektik bileşim denir (Kaur, Sharmab, & Singh, 2019). Bizmut (Bi); atom numarası 83, atomik kütlesi 208,98; erime noktası 271°C olan parlak, gümüş beyazı, en diyamanyetik bir metaldir. Isıl iletkenliği ve elektriksel iletkenliği katı haldeki diğer metallere göre düşüktür (Ojebuoboh, 1992). İndiyum (In); atom numarası 49, atom ağırlığı 114,82 olan gümüş renkli, alaşımların mukavemetini, sertliğini ve korozyon direncini artıran, düşük erime noktasına, yüksek kaynama noktasına sahip 3.37K'de süperiletken hale gelen bir elementtir (Alfantazi & Moskalyk, 2003). Kalay (Sn);

atom numarası 50, atom ağırlığı 118,71, gümüş renkli, yumuşak, düşük sıcaklıklı, toksik olmayan bir elementtir. Kurşunlu alaşımlarda %5 ile %70 oranlarında lehim olarak kullanılmaktadır. Süperiletkenlik lehimler 8.4 K civarında kritik sıcaklığa, 4.2 K sıcaklıkta 1.77 T kritik manyetik alana, 2×10^8 A/m² kritik akım yoğunluğuna sahip olduklarından NMR cihazları gibi bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Kurşunlu kalay alaşımı erime sıcaklığı 183°C olan ötektik bir karışım oluşturur. Oluşturulan kurşunlu alaşımların radyasyon zırhlama özellikleri, yüksek atom numarası ve yoğunluğu sebebiyle iki veya daha fazla elementin kurşun ile kombinasyonu ile sertlik, korozyon direnci, çekme mukavemeti gibi bazı özellikler ana elementten daha kaliteli olması sağlanır. Kurşun bazlı alaşımlar daha kolay temin edilebildiği ve maliyetleri düşük olduğu için zırhlama parametrelerinin keşfedilerek bu alanda kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür (Sathisha, ve diğerleri, 2021). Alaşımlar; sertlik, korozyon direnci, çekme mukavemeti gibi özellikleri nedeniyle ulaşım, havacılık, modern teknolojiler, biyomedikal ve ilaç endüstrileri gibi farklı alanlarda alternatif malzemeler olarak ilgi görmüştür (Majeed, Najam, Hamood, & Mahmoud, 2025).

Bu çalışmada Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının zırhlama özelliklerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Yapılan deneylerin yapısal analizi XRD ile, yüzey yapılarının görüntüleri de SEM ile incelendi. Ayrıca ²⁴¹Am, ⁶⁰Co ve ¹³⁷Cs radyoaktif halka kaynakları kullanılarak Pb içerikli yedi farklı alaşım numuneleri uyarılmıştır. Pb elementi ile Bi, In, Sn elementlerinin birleştirilerek oluşturulan alaşımların lineer soğurma katsayıları (LAC), kütle soğurma katsayıları (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) değerlerinin deneysel değerleri hesaplanmıştır. Deneysel veriler Phy-X/PSD yazılımında teorik hesaplamaları yapılarak iki değer arasında karşılaştırılması yapılmıştır.

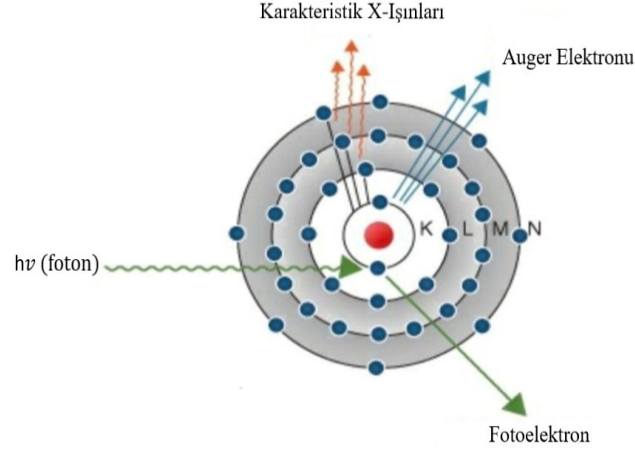
1.1. X-ışınları

Alman Fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen 8 Kasım 1895 yılında X-ışınlarını keşfetti. Siyah bir kağıtla karartılmış, hava dolu bir Hittorf-Crooks tüpü kullanarak katot ışınlarını gözlemliyordu. Tüpe yüksek gerilime sahip elektrik akımı geçirdiğinde, tüp duvarına elektronların ışık yayarak çarptığını, karanlık olan odada tüpün yakınında bulunan kısımda floresan bir ekrandan yayılan zayıf bir ışıltı olduğunu fark etti. İlk deneylerinden birinde, eşinin sol el röntgen fotoğrafını çekerek parmak kemiklerinin

gölgelerini gözlemledi. Bu şekilde defalarca tekrarlanan deneyler sonucunda Röntgen, baryum- platinocyanide kaplı ekranı aydınlatan tüpten kaynaklanan bilinmeyen bu yeni ışını 'X-ışını' olarak adlandırdı (Sternbach, MD, Varon, & MD, 1993). Bu keşif, hayatta olan bir insan vücudunun yapısını ve malzemelerin içeriğini belirlemek için atılan ilk adımdı. Bu buluştan yararlanarak, Henri Antoine Becquerel, Marie ve Pierre Curie X-ışınları üzerinde çalışarak radyoaktifliği keşfettiler. X-ışınlarının atomik yapı ve doğası inceleyen Barkla, X-ışınlarını ayırmak için bir alüminyum filtre yöntemi ve X-ışını tespiti için bir iyonlaşma odası kullandı. Bir hedef numuneden yayılan ikincil X-ışınlarını gözlemleyerek sürekli ve karakteristik X-ışınları arasındaki ayrımı keşfetti. Barkla'nın çalışması ardından von Laue X-ışınlarının dalga özellikleri, düzenli olarak tekrarlanan bir desene sahip üç boyutlu bir yapıdan oluşan tek bir kristalden X-ışınları kırınımı sergileyen davranışını araştırdı. Bu deneyler sonucunda X-ışınlarının dalga özelliğine sahip olduğu belirlendi. W. H. Bragg, X-ışınları kristal yapı analizinin başlangıcı olan X-ışını yoğunluğunda farklılıklar gösteren izometrik bir sistemin düzenli desenleri olduğunu gözlemledi. Ardından Moseley W. L. Ve W. H. Bragg ile iletişim alışverişinde bulunarak karakteristik X-ışınları ile ölçülen elementler arasındaki ilişkiyi açıkladı (Beckhoff, Kanngießner, Langhoff, Wedell, & Wolf, 2006).

1.1.1. Karakteristik X-İşınlarının Oluşumu

X-ışınlarının üretilmesi sürekli ve karakteristik X-ışınları olarak ikiye ayrılmaktadır. Sürekli (beyaz) X-ışınları; uyarılmış elektronların diğer bir elektrona çarpmasıyla ve hedef elementlerle etkileşimde bulunmasıyla aniden durması sonucu oluşur. Karakteristik (çizgi) X-ışınları; bir kabukta meydana gelen bir boşluğun daha dış yörüngelerde bulunan herhangi bir elektronla doldurulur. Bu iki yörüngenin bağlanma enerjileri arasındaki fark kadar enerjiye sahip bir foton yayımlanarak karakteristik X-ışınları oluşur. K tabakasından meydana gelen bir boşluk, L tabakasından gelen bir elektronla doldurulur. Bu şekilde yayımlanan foton K_{α} ışınları; M veya daha üst tabakalardan gelen elektronlar tarafından doldurulmasıyla yayımlanan foton ise K_{β} ışınları adını alır. Oluşan X-ışınları her zaman atomu terk etmez, bazen enerjisini dış yörüngelerde bulunan elektrona aktarır ve atomdan elektronu sökerek yok olurlar. Bu olay Auger olayı olarak, sökülen elektronda Auger elektronu olarak adlandırılır (Tıraşoğlu, 1994). Karakteristik X-ışınlarının oluşumu Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Karakteristik X-ışınlarının oluşumu (URL-1, 2025)

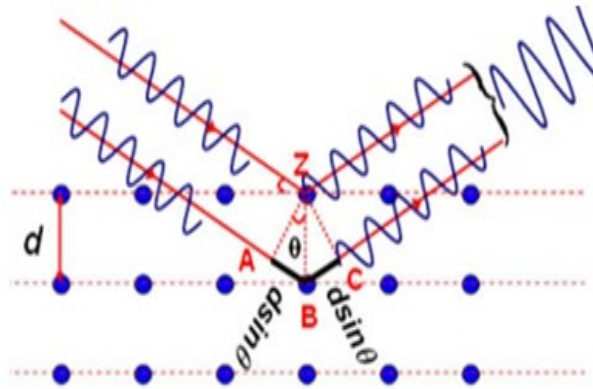
1.1.2. X-ışınlarının Temel Özellikleri

- X-ışınları elektromanyetik dalgalar olup, dalga boyları 0.1-100 Å arasındadır.
- Dalga boyları küçük ve giricilik özellikleri fazla olan X-ışını 'sert X-ışını', dalga boyları büyük, giricilikleri az olanlar ise 'yumuşak X-ışını' olarak adlandırılır.
- Kristal yapı analizinde 0.5-2.5 Å dalga boylu X-ışınları, tıpta tedavi amaçlı kullanımı ise 0.5-1 Å dalga boyundadır.
- X-ışınları elektromanyetik bir dalga olduğundan elektrikçe nötrdür, bu yüzden elektriksel veya manyetik alanda sapmaya uğramazlar.
- Boşlukta $c=3 \times 10^8$ m/s ışık hızıyla doğrusal olarak yayılırlar.
- X-ışınları çift karakterlidir, yani hem dalga hem de tanecik özelliği gösterirler. Fotoelektrik olay, Compton saçılması tanecik özelliği; polarizasyon ve Rayleigh saçılması dalga özelliği gösterir.
- Enerjileri yüksek olduğundan çarptıkları atomlardan elektron kopararak iyonlaşmaya neden olurlar. Bu özellik nedeniyle canlı dokulara zarar verebilirler.
- X-ışınlarının şiddeti, uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişmekte ve ışık kaynağından uzaklaştıkça azalmaktadır. Bu da 'ters kare kanunu (inverse square law)' ile ifade edilmektedir.
- Fotoğraf plakalarının kararmasına sebep olurlar ve bu sayede röntgen filmlerinin çekimiyle tıpta tanısal amaçlı kullanılırlar.

1.1.3. X-Işını Kırınımı ve Bragg Kırınım Yasası

X-Işını kırınım spektroskopisi, gama ışınları ile ultraviyole ışını arasında kalan X-ışını kullanılarak yapılan bir analiz türüdür. Çalışma prensibi numune üzerine gönderilen X-ışınlarının kırılma ve dağılma verilerinin hesaplanmasına dayanır. XRD (X-ışını kırınım yöntemi), atomik dizilimleri her bir kristal ve faza özgü olan X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırmasıdır. Faz için her bir kristalin kırınım profilleri parmak izi gibi her birinin kendine has özelliği mevcuttur. Kristal yapıların incelenmesi ve X-ışınlarının tanımlanmasında önemli bir yere sahip olan X-ışını kırınım metodu, analiz yapıldığı sırada numunelere herhangi bir zarar vermez ve çok küçük numunelerin analizinde etkin bir şekilde kullanılır. Kristal içinde düzgün bir şekilde dağılmış olan tanecikler, kristal üzerine gönderilen X-ışınları tarafından X-ışını kırınımına uğrarlar.

X-ışını kırınımı, iki veya daha fazla dalga arasındaki belirli bir faz ilişkisi varlığı olması durumundan kaynaklanır. Bu iki dalga veya ışın tamamen aynı fazda, elektrik alan vektörleri dalganın yayılma yönü boyunca ölçülen herhangi bir x noktasında aynı büyüklüğe ve aynı yöne sahiptir. Kristal içindeki tanecikler periyodik olarak sıralandığından, bunlar arasında belirli bir faz ilişkisi vardır. Bu faz ilişkileri çoğu saçılma yönünde yıkıcı girişimin meydana gelmesine, birkaç yönde de yapıcı girişimin meydana gelmesine kırınımlı ışınların oluşmasına neden olurlar. Şekil 3'te X-ışını kırınımı gösterilmektedir.



Şekil 3. X-ışını kırınımı (URL-2, 2025)

Kırınımın meydana gelmesi için temel koşul olan faz ilişkisi, ilk olarak W.L. Bragg tarafından formüle edilmiş ve Bragg yasası olarak adlandırılmıştır. Aralarında d uzaklığı

bulunan ardışık düzlemler tarafından saçılan λ dalga boylu X-ışınları arasındaki yol farkı $2d\sin\theta$ 'dır. Kırınımın meydana gelebileceği geliş açıları $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ kırınımın $n=1, 2, 3, \dots$ maksimum derecesine karşılık gelir. Bu durumda Bragg kırınım yasası;

$$n\lambda = 2d\sin\theta, n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

formülü ile verilir. Tüm düzlemlerdeki tüm atomlar tarafından saçılan ışınlar aynı fazdadır. Belirtilen yönde kırınan bir ışın oluşturmak için yapıcı girişim oluşturarak birbirlerini güçlendirirler (Cullity, 1978).

1.2. Gama Işınları

Atom çekirdeğinde meydana gelen enerji farklılıklarından dolayı çekirdekten bir alfa ya da bir beta parçacığı ayrılarak çekirdeğin enerjisi fazlalaşır. Yüksek enerjiye sahip atom kararsız hale gelir. Kararlı hale geçmek için fazla olan enerji çekirdekten ayrılır ve bunun sonucu gama ışınları yayınlanır. Gama ışınları;

- Enerji ve frekansları yüksektir, dalga boyları düşüktür.
- Kütlesiz ve yüksüzdürler, yüksüz oldukları için elektrik ve manyetik alanda sapmaya uğramazlar.
- Gama ışınlarının şiddetleri uzaklığın karesi ters orantılı olarak değişmektedir ve enerjilerini fotoelektrik olay, compton olayı, çift oluşum olayı ile kaybederler.

1.3. Gama ve X-ışınlarının Madde ile Etkileşmesi

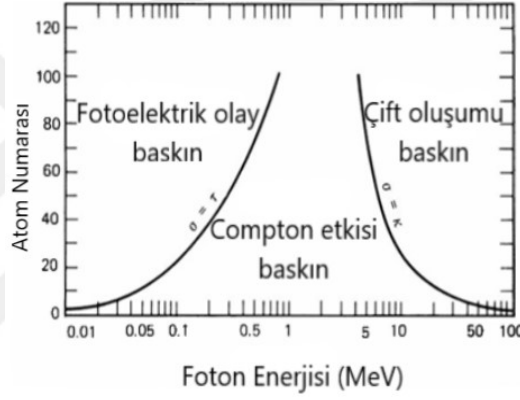
Gama ve X-ışınlarının madde ile etkileşimlerini dört temel özellikleri olan;

- Atomun elektronu ile etkileşmesi,
- Çekirdek ile etkileşmesi,
- Çekirdek ve elektronların etrafındaki elektrik alan ile etkileşmesi,
- Çekirdek etrafındaki mezon ile etkileşmesi,

şeklinde karakterize edilebilir (Apaydın, 2002).

1.4. Elektromanyetik Radyasyonun Soğrulması

X-ışınları, yörüngede bulunan elektronların birbirleri arasında olan karşılıklı tesir ve bu tesirin sürekliliği ile oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı numunenin içeriğindeki elementlerin yörüngedeki elektronların sayısına bağlıdır. X-ışını demeti her bir karşılıklı etkileşmeden dolayı enerji kaybeder. Bu nedenle kurşun (Pb), X-ışınlarına karşı iyi bir zırhlama sağlayan bir elementtir. Elektromanyetik radyasyonun soğrulması farklı birkaç olay sonucu gerçekleşmektedir. Ancak en baskın olduğu olaylar; fotoelektrik olay, compton saçılması, koherent saçılma ve çift oluşum olayıdır. Bu olayların oluşma olasılığı foton enerjisi ile değişmektedir (Apaydın, 2002).



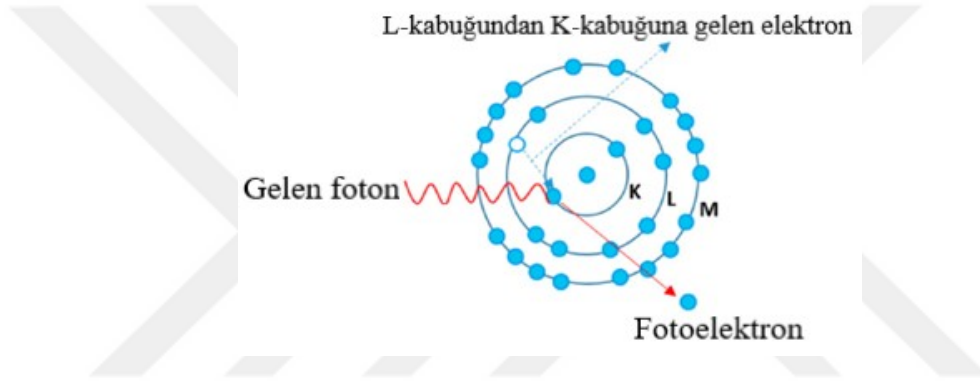
Şekil 4. Gama ışını etkileşiminin üç farklı olayın baskın olduğu aralıklar (Knoll, 1999)

Şekil 4'te elektromanyetik radyasyonun baskın olduğu bölgeler gösterilmektedir. Buna göre etkileşmelerin baskın olduğu enerji aralıkları foton enerjisi ve atom numarasına göre değişmektedir. Fotoelektrik olayın düşük enerjili gama ışınlarında baskınken çift oluşumu olayı (5-10MeV üzerinde) ise yüksek enerjili gama ışınlarında baskın olduğu görülmektedir. Compton saçılması bu iki olay arasındaki enerji aralığında yer almaktadır. Fotoelektrik olay tercih edilen etkileşim olduğundan, gama ışını spektroskopisi için kullanılan dedektörleri yüksek atom numaralı element içeren malzemelerden seçilmelidir.

Bir ışının madde içerisinde geçtiğinde ışının şiddetinde bir azalma meydana gelmektedir. Azalma maddenin kalınlığına ve ışın demetinin şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Madde içerisinden geçen X ve gama ışınlarının azalması fotoelektrik olay ve compton olayı ile mümkündür (Tıraşoğlu, 1990).

1.4.1. Fotoelektrik Olayı

Elektromanyetik dalgaların parçacık karakterli olduğunu belirten ilk deney olan fotoelektrik olay, ilk olarak 1887 yılında Hertz tarafından gözlenmiş ancak açıklanması Einstein tarafından yapılmıştır. Buna göre, ışığın etkisiyle bir yüzeyden elektronun sökülmesi olayına fotoelektrik olay, sökülün bu elektronlara da fotoelektron denir. Bu olay aslında güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir kavram olan güneş pillerinin çalışmasının temelini oluşturmaktadır (Eisberg, 1985). K kabuğundan elektronun fırlatılmasıyla meydana gelen fotoelektrik olayın şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Fotoelektrik olayının şematik gösterimi (URL-3, 2025)

K-kabuğundan sökülün elektronun enerjisi E_e olmak üzere;

$$E_e = E_\gamma - E_{bağlanma} \quad (2)$$

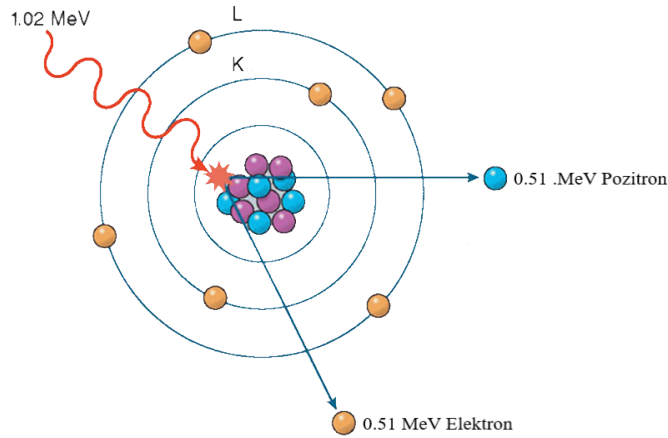
formülü ile ifade edilir. E_γ , gelen fotonun enerjisi ve E_b ise K-kabuğunun bağlanma enerjisi veya eşik enerjisidir. Gelen fotonun enerjisi bağlanma enerjisine eşitse, yüzeyden elektron sökebilir. Bağlanma enerjisinden daha büyük enerji taşıyan bir foton, bağlanma enerjisi kadar enerjiye sahip kısmı kadar elektron söker, geri kalan enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür. Eğer gelen fotonun enerjisi bağlanma enerjisinden küçükse yüzeyden elektron sökemez. Şekil 5'te gösterildiği gibi K-kabuğunda meydana gelen boşluk L-kabuğundan gelen elektron tarafından doldurulur. Bu işlem sonucunda K ve L-kabuklarının bağlanma enerjileri arasındaki fark kadar enerjiye sahip bir foton yayınlanır. Bu yayımlanan foton karakteristik X-ışını adını alır.

1.4.2. Çift Oluşumu

Çift oluşumu, soğurucu malzemenin çekirdeklerindeki protonların yakınındaki yoğun elektrik alanına giren bir fotonun bir elektron ve bir pozitrona dönüşmesine karşılık gelir. Bu süreçte, çekirdek ile etkileşimde bulunan foton yok olur (Knoll, 1999). Şekil 6’da gösterildiği gibi, elektron-pozitron çiftinin meydana gelmesi için gerekli enerji $2m_0c^2$ ’dir. Yani çift oluşum olması için 1.02 MeV’lik bir eşik enerjisi gereklidir. Gelen fotonun enerjisi bu değeri aşması halinde fazla enerji elektron-pozitron çifti tarafından paylaşılan kinetik enerji olarak ortaya çıkar. Her birinin durgun kütle enerjisi m_0c^2 , değeri 0.51MeV olan elektron pozitron çifti oluşur. Elektron-pozitron çiftleri aynı kütleye sahip, ancak zıt işaretlidir. Çekirdek etrafında meydana geldiği için hiçbir korunum ilkesi bozulmuş olmaz. Yani, çift oluşum sırasında yük, çizgisel momentum ve toplam enerji korunur. Gelen fotonunun enerjileri,

$$E_{e-} + E_{e+} = h\nu - 2m_0c^2 \quad (3)$$

toplamları denklem 2’de olduğu gibi elektron ve pozitronun kinetik enerjisine dönüşümü şeklinde olur. Şekil 6’da çift oluşum olayı gösterilmektedir.



Şekil 6. Çift oluşum olayının şematik gösterimi (URL-4, 2025)

X-ışını floresans tekniğinde numunelerin uyarılması gerekli olan enerji değeri genellikle 1.02 MeV’in altında olduğundan çift oluşum olayı meydana gelmesi söz konusu değildir.

1.5. Elektromanyetik Radyasyonun Saçılması

Elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesini saçılan ışının enerjisine göre koherent saçılma ve inkoherent saçılma olmak üzere iki grupta incelenir.

1.5.1. Koherent Saçılma

Koherent saçılma, enerji ve faz farkı olmadan gelen foton ile saçılan foton arasındaki saçılmaya denir. Gelen ışın ve saçılan foton aynı fazda olduğundan, fotonun enerjisinin elektronun bağlanma enerjisinden daha düşük olduğu durumda fotonun elektron üzerinden saçılmasıyla da meydana gelir. Bu saçılma, her bir elektrondan saçılan radyasyonun genlikleri ile atomdan saçılan radyasyonun toplam şiddetinin karesel toplamı alınarak hesaplanır. Thomson, Delbrück, Rayleigh ve Nükleer Rezonans olmak üzere dört ayrı koherent saçılma tipi vardır.

1.5.2. İnkoherent Saçılma

Gelen foton ile saçılan fotonun enerjilerinin birbirinden farklı olduğu saçılma türüdür. Gelen ve saçılan foton arasında faz farkı mevcuttur. Atomlar arası etkileşme dikkate alınmadan ortalama saçılma şiddeti, gelen fotonun enerjisine, saçılma açısı ve atom numarasına bağlı olarak serbest bir elektronun inkoherent saçılma tesir kesiti Klein-Nishina denklemi ile ifade edilir. Burada, inkoherent saçılmanın bir fonksiyonu olarak ifade edilen S , x ve Z atom numarasına bağlıdır. Diferansiyel tesir kesiti;

$$\frac{d\sigma_{inc}}{d\theta} = \frac{d\sigma}{d\theta} \times S(x, Z) \quad (4)$$

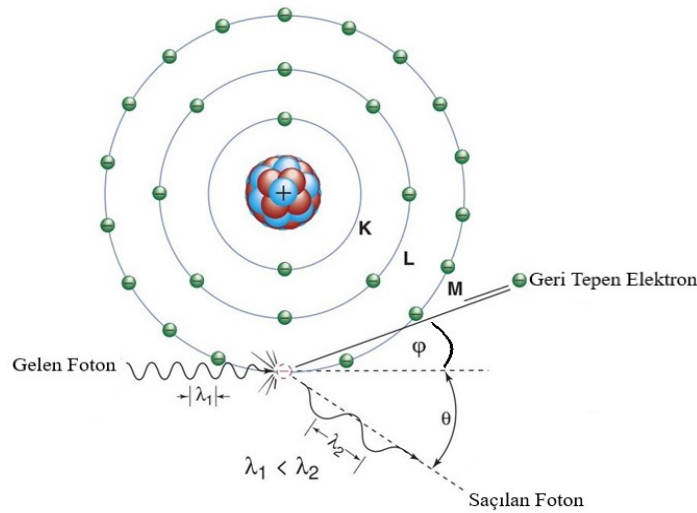
olur ve toplam tesir kesiti ise;

$$\sigma_{inc} = \int_{\theta=0}^{\pi} \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \times F_{KN} \times S(x, Z) \times 2\pi \sin \theta \, d\theta \quad (5)$$

ile gösterilir. Hubbell, Plechaty ve diğerleri $Z=1$ ile $Z=100$ arasındaki elementler için farklı malzemelerde σ_{inc} toplam compton tesir kesitini hesaplamışlardır (Johns & Cunningham, 1983). İnkohherent saçılma; Compton, Nükleer ve Raman saçılması olarak üç grupta incelenir. Bunların içinde en etkin olan saçılma Compton saçılmasıdır.

1.6. Compton Saçılması

Compton saçılması, bir foton ile serbest bir elektron arasındaki etkileşim sonucu meydana gelir. Atomun dış yörüngesinde zayıf olarak bağlı bulunan elektrona, elektronun atom veya moleküle bağlanma enerjisinden daha büyük enerjili foton çarparak elektronu bir doğrultuda belli bir açıyla fırlatırken kendisi de herhangi bir doğrultuda saçılmaya uğrar. Saçılan elektron, geri tepen elektron ya da compton elektronu adını alır. Bu olayda foton enerjisinin bir kısmını elektrona kinetik enerji olarak aktardığından fotonun etkileşme öncesi enerji değeri, etkileşme sonrası saçılan fotonun enerji değerinden daima büyüktür. Gelen foton, saçılan foton ve elektron aynı düzlemde olduğundan enerji ve momentum korur. Compton olayı Şekil 7’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7. Compton saçılması olayının şematik gösterimi (URL-5, 2025)

Compton elektronuna verilen enerji;

$$T_c = E_\gamma - E_{\gamma'} \quad (6)$$

bağıntısı ile ifade edilir. E_γ gelen fotonun enerjisi, $E_{\gamma'}$ saçılan fotonun enerjisidir. Denklem (3), momentumun korunumu denklemleri ile birlikte kullanılırsa saçılan fotonun enerjisi saçılma açısı θ 'ya bağlı ifadesi;

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos\theta)E_\gamma/m_0c^2} \quad (7)$$

formülü ile yazılır. Burada m_0c^2 , değeri 511 keV olan elektronun durgun enerjisidir. Elektronun kinetik enerjisi ise;

$$T = \frac{(1 - \cos\theta) E_\gamma/m_0c^2}{1 + (1 - \cos\theta) E_\gamma/m_0c^2} E_\gamma \quad (8)$$

bağıntısı elde edilir. Radyasyon ölçümleri için önemli bir konu olan foton ve elektronun maksimum ve minimum enerjileri, $\theta = \pi$ (180°) olduğunda, saçılan fotonun minimum enerjisi elektronun maksimum enerjisine karşılık gelir. $\theta=0^\circ$ olduğunda ise saçılan foton maksimum enerjiye elektron minimum enerjiye sahip olur. Bu durum etkileşmenin meydana gelmediğini gösterir. Dolayısıyla, compton saçılmasında gelen foton enerjisinin tamamını elektrona aktarması mümkün değildir (Tsoulfanidis, 1995).

1.7. Radyoizotop Kaynaklar

Genellikle X-ışını analizinde kullanılan radyoizotop kaynaklar; X-ışını spektrometrik uygulamalarında dört esas özellikleri ile nitelendirilebilir: Bunlar;

- Radyoaktif bozunma ve yayımlanan radyasyonun tipi (α , β , γ yayımlama, K ya da L elektronu yakalama)
- Yayımlanan radyasyonun enerjisi
- Kaynak aktivitesi
- Kaynağın yarı ömrü

Radyoaktivite özelliğine sahip olan atomların kararsız çekirdekleri parçalanmasıyla yeni bir çekirdek meydana gelir. Atom çekirdeklerinde meydana gelen bu değişiklikler sonucu radyasyon yayımlanması olayı radyoaktif bozunma olarak adlandırılır. Sonuç olarak kararsız bir atomun kararlı hale gelinceye kadar bir seri dönüşüme uğraması ve bu

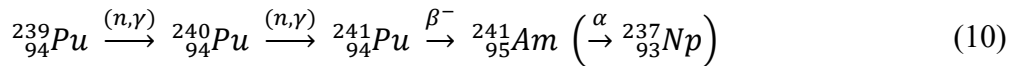
şekilde oluşan seriye de bozunma zinciri denir. Bu bozunma esnasında dışarıya (α , β) gibi radyoaktif parçacıkları ile γ ışını yayımlanır.

Bir radyoizotop kaynağının aktivitesi, saniyedeki bozunma sayısı ve kullanım süreleri yarı ömür olarak ifade edilmektedir. Aktivite Becquerel (Bq) olarak isimlendirilir. Ancak (SI) uluslararası birim sisteminde Curie (Ci) kullanılır. $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}$ Bq'dir. Yarı ömür, başlangıçtaki radyoizotopun aktivitesinin yarıya inmesi için geçen süre olarak tanımlanır. Yarı ömür aşağıdaki denklem 9'daki gibi ifade edilir.

$$N = N_0 e^{-0,693t/T_{1/2}} \quad (9)$$

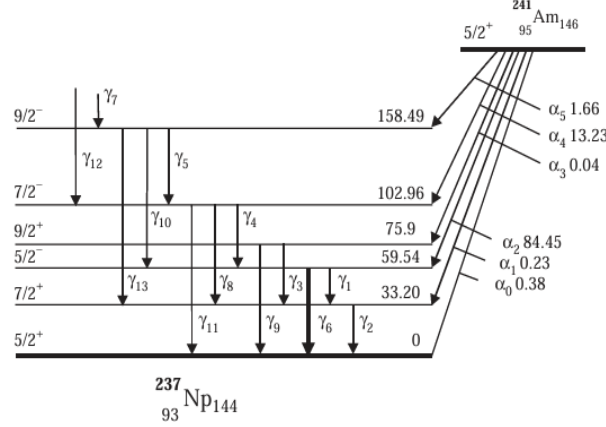
1.7.1. ^{241}Am Radyoizotop Kaynağı

^{241}Am , transuranik element (uranyumun atom numarasından büyük olan elementler) olan Amercium elementinin kararsız radyoizotopudur. ^{241}Am radyoizotopu, 1945 yılında Amerikalı bilim insanları G. T. Seaborg, R. A. James ve L. O. Morgan tarafından keşfedilmiştir. Yarılanma ömrü 432,2 yıldır. Başlıca üretim yönteminin aşağıdaki reaksiyonda gösterildiği gibi bir nükleer reaktörde plütonyum (Pu) atomlarının bombardımanı şeklindedir (Winberg & Garcia, 1995).



Yapay olarak üretilen ve kararsız bir izotop olan ^{241}Am elementi, α bozunumuna uğrayarak neptünyum çekirdeğine dönüşür. Bozunma süreci kararlı bizmut oluşana kadar eder. Bu olay neptünyum ile başlayıp bizmuta kadar devam ettiğinden dolayı bozunma süreci neptünyum serisi olarak adlandırılır. Nükleer bir reaksiyon çeşidi olan nötron yakalama, ağır bir çekirdek oluşturmak için bir araya gelen atomik çekirdeğin bir veya daha fazla nötronla çarpışmasıdır. Nötronlar elektriksel olarak nötrdür. Bundan dolayı çekirdeğin içine rahatça nüfuz edebilirler. β^- bozunumunda zayıf etkileşme bir nötronu, bir protona dönüştürür; bu bozunma da bir elektron ve bir antinötrino yayımlanır. Alfa bozunumu ise, bir atomik çekirdekten bir alfa parçacığı yayımlanır; alfa bozunumuna uğrayan çekirdeğin kütle numarasında 4, atom numarasında ise 2 azalma meydana gelir. Gama bozunumunda da bir çekirdek elektromanyetik radyasyon yayımlayarak yüksek

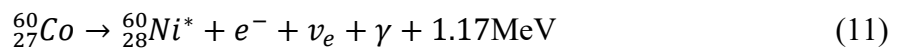
enerji durumundan düşük enerji durumuna geçer; gama bozunumuna uğrayan çekirdeğin proton ve nötron sayısı değişmez sabit kalır. Şekil 8’de ^{241}Am kararsız radyoizotopunun ^{237}Np izotopuna dönüşümü gösterilmektedir.

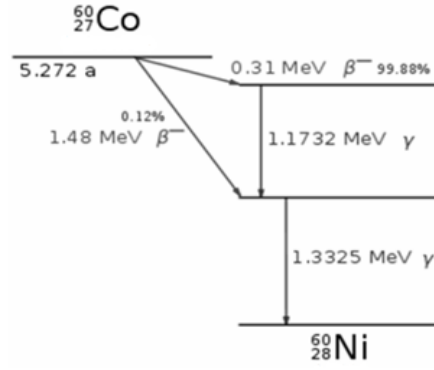


Şekil 8. ^{241}Am elementinin bozunma şeması (Iwahara, Silva, Filho, Bernardes, & Delgado, 2005)

1.7.2. ^{60}Co Radyoizotop Kaynağı

Kobalt elementinin radyoaktif izotopu olan ^{60}Co , 1735 yılında İsveçli bilim insanı kimyacı George Brandt tarafından keşfedilmiştir. Yarılanma ömrü 5,27 yıl olan radyoizotop bir kaynaktır. Gama ışınları genellikle alfa ya da beta gibi diğer radyasyon türlerinin yanı sıra radyonüklidlerin radyoaktif bozunması ile üretilir. Bir çekirdek bir α ya da β parçacığı yayımladığında, yavru çekirdek bazen uyarılmış bir durumda kalarak gama ışını yayımlar ve düşük bir enerji durumuna geçer. ^{60}Co radyoizotop kaynağının bozunum şeması gama ışını üretiminin iyi bilinen bir örneğidir. ^{60}Co , β bozunumuna uğrayarak uyarılmış ^{60}Ni 'e dönüşür. Daha sonra 1,1173 MeV ve 1.332 MeV enerji seviyesinde art arda iki gama ışını yayımlayarak temel hal durumuna düşer. ^{60}Co radyoizotop kaynağının bozunum denklemleri ve bozunum şeması Şekil 9’da gösterildiği gibidir (Preoteasa, Preoteasa, & Suciu, 2012).

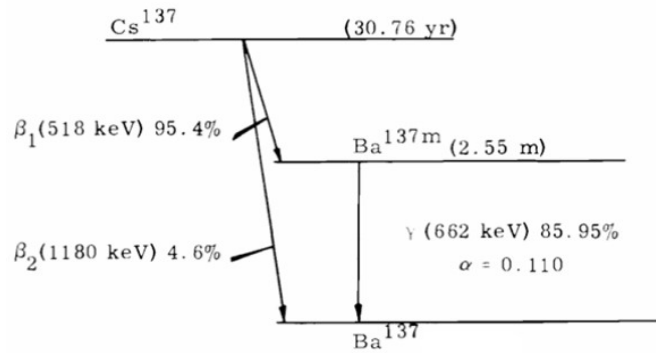




Şekil 9. ^{60}Co elementinin bozunum şeması

1.7.3. ^{137}Cs Radyoizotop Kaynağı

Sezyum (Cs) elementinin radyoaktif izotopu olan ^{137}Cs , ilk olarak Seaborg'un öğrencisi Margaret Melhase tarafından 1941 yılında uranyumun fisyon reaksiyonu sonucu ortaya çıktığını keşfettiler. İki hafta içinde bozunmanın %1 den daha az olduğunu gözlemlenmiş ve ^{137}Cs radyoizotop kaynağının yarılanma süresi 30 yıl olarak belirlenmiştir (Patton, 1999). ^{137}Cs radyoizotop kaynağının radyoaktif bozunması iki aşamada gerçekleşir. Başlangıçta ^{137}Cs kısa ömürlü ^{137}Ba üretmek için saniyeler içinde kararlı ^{137}Ba 'ye geçerek 661,66 keV gama radyasyonu yayımlar (Cafferty, 2010). ^{137}Cs radyoizotop kaynağının bozunum şeması Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. ^{137}Cs elementinin bozunum şeması (Matsumoto, 1965)

1.8. Radyasyon ve Türleri

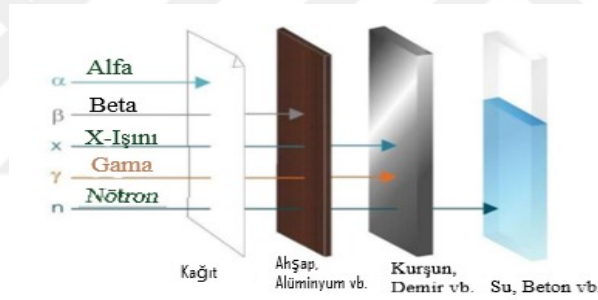
Radyoaktif maddelerin bozunması sırasında ortama alfa, beta, gama gibi ışınları yayılması veya uzayda yayılan elektromanyetik spektrumun çeşitli bileşenleri gibi farklı formlarda gözlemlenebilen radyasyon, iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon şeklinde iki grupta incelenmektedir. Atomik bağları kırabilecek yeterli enerjiye sahip olmayan radyasyona iyonlaştırıcı olmayan radyasyon; atom ve moleküllerden elektron koparabilen radyasyona ise iyonlaştırıcı radyasyon denir (Türkkan & Pala, 2009). İyonlaştırıcı olmayan radyasyon; görünür ışık, morötesi ışık, kızılötesi ışık, radyo dalgaları ve mikrodalgalarıdır. Dalga boyları büyük, enerjileri ve frekansları düşüktür. İyonlaştırıcı radyasyonlar; kendi içinde parçacık türü (α , β ışınları, nötronlar) ve dalga türü (X ve γ ışınları) şeklinde incelenir. Bu tür radyasyonların enerjileri ve frekansları yüksek ancak dalga boyları düşüktür. Alfa ve beta parçacıkları küçüktür, hızlı hareket ederler. X-ışınları ve gama ışınları ise esasen etkileşime girdikleri su, protein veya DNA gibi moleküllerden elektron koparacak enerji taşırlar. Radyoaktif bir atom kararsız olduğundan, çekirdekteki proton-nötron oranını dengeleyerek başka bir elemente dönüşür. Atom çok fazla nötron içermesi durumunda bir nötron bir protona dönüşür, negatif bir beta parçacığı dışarı atar. Eğer çok fazla proton içeriyorsa, bir proton bir nötrona dönüşür, pozitif beta parçacığı dışarı atar. Radium gibi kurşundan daha büyük kütleli olan bazı atomlar da bir alfa parçacığı yayarak dönüşür. Geriye kalan fazla enerji, X-ışınlarıyla aynı olan gama ışınları olarak salınabilir. Tablo 1’de radyasyon türleri ve özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. Radyasyon tipleri ve özellikleri (Apaydın, 2006)

Radyasyon tipleri	Özellikleri
Kozmik Işınlr	Kütleli ve yüksek tanecikler içeren madde demetleridir.
Gama (γ) Işınları	Atom çekirdeği enerji seviyesi değişimlerinde meydana gelen fotonlar tarafından yayılan elektromanyetik dalgalarıdır.
X-ışınları	Atom çekirdeğinden yayılmayan, elektronların enerji seviyelerindeki değişiminden yayımlanan elektromanyetik dalgalarıdır.
Nötronlar	Kollüzyon ve fisyon tepkimeleri sonucunda atomun çekirdeğinden yayılan nötr taneciklerdir.
Alfa (α) ışınları	İki proton ve iki nötron içerir, atom çekirdeği bozunması sonucu yayılır. En iyi örnek elektronsuz Helyum atomudur.
Beta (β) ışınları	Elektron olarak da adlandırılan atom çekirdeğindeki bozunma sonucu yayılan çok yüksek hızlı taneciklerdir.

1.9. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Parçacık ve dalga şeklinde ayrılan iyonlaştırıcı radyasyon özellik bakımından birbirine yüksek oranda benzemesine rağmen meydana geliş şekilleri birbirinden farklıdır. X-ışınları çekirdek dışında meydana gelen elektron kaynaklı ışınlardır. γ -ışınları ise, radyoaktif bir çekirdeğin parçalanarak kararlı hale geçmesi sırasında açığa çıkan fazla enerjinin, çekirdekten dışarı atılması sonucu meydana gelmektedir (Çoşkun, 2011). Radyasyon kaynağından çıkan alfa (α), beta (β), gama (γ) ve X-ışınları gibi elektromanyetik ışınların giricilik özellikleri birbirinden farklıdır. Bu elektromanyetik radyasyon ışınlarının geçişi Şekil 11'den incelendiğinde; alfa ışınları kâğıdı geçemezken, beta ışınlarının kâğıdı geçtiği ancak plastik malzemeyi geçemediği gözlenmektedir. Gama ve X-ışınları incelendiğinde ise kısmen de olsa kurşun malzemeler tarafından durdurulmaktadır.



Şekil 11. Radyasyon giriciliği

1.10. Gama Radyasyonu veya Gama Işını

Fransız kimyager-fizikçi Paul Villard, radyum elementi ile çalışırken ilk kez gama ışınlarını fark etmiştir. Yaptığı deneyde, bir cam ampul içine, radyum (Ra) içeren az miktarda baryum klorür, bir kurşun tüpün içine yerleştirildi. Tüpün sonunda yaklaşık 20°'lik bir açıklık açısına sahip bir ışın konisi ortaya çıktı. Tüpün önüne tüpün eksenine 45°'lik bir açıyla yerleştirilmiş, 0.3mm kalınlığındaki bir alüminyum folyo ortaya çıkan ışının yarısını kesecek şekilde koyuldu. Tüm düzenek, ışık geçirmez siyah kâğıt ile muhafaza edilmiş bir fotoğraf plakası üzerine yerleştirilerek çıkan ışını sıyırma açısıyla alacak şekilde konumlandırıldı. Işınlanmaya maruz bırakılan plaka, alüminyum folyo tarafından engellenen ışın demetinin, engellenmeyen ışın demeti ile eşdeğer olmadığı

gözlemlendi. Alüminyum folyo ile etkisiyle belirgin bir kırılmaya uğramış ve dağınık bir saçılmaya eşlik etmiştir. Manyetik alan etkisinde fotoğraf plakasında üç farklı türde kararına gözlemlendi:

- α ışınları; ince madde katmanları tarafından kolayca emilen ve normal deneysel koşullarda gazın büyük bir kısmına iyonlaştıran (Ernest Rutherford tarafından daha sonradan tanımlanan) ışınlar,
- β ışınları; yüksek hızla yansıyan, negatif yüklü parçacıklardan oluşan ve katot ışınlarına benzeyen ışınlar,
- γ -ışınları; Paul Villard tarafından fark edilen ancak Rutherford tarafından isimlendirilen, manyetik alanda sapmayan ve çok derinlere nüfuz edebilen ışınlar (Gerward, 1999).

Dolayısıyla, atom çekirdeğinin enerji seviyelerinde meydana gelen bu ışınlar çekirdek bir alfa ya da beta parçacığı yayımlandıktan sonra kararlı halde bulunmazlar. İçerde kalan çekirdek enerjisi bir elektromanyetik radyasyon halinde yayımlanırken madde içinden geçen gama ışınları elektronlarla etkileştiğinde atomlarda iyonlaşmaya sebep olmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyon grubunda yer alan gama ışınları; kısa dalga boylarına, yüksek yoğunluğa, yüksek giriciliğe sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı radyasyona maruz kalınması durumunda hücre bölünmeleri, mutasyon ve kanser gibi pek çok bozukluklar meydana gelmektedir. Canlının yapısında meydana gelebilecek hasarlar, tedavi edilmesi mümkün olmayan ölümcül hastalıkların ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Radyasyonun etkisini tamamen yok etmek veya azaltmak için bazı koruyucu malzemeler kullanılmaktadır. Sadece kurşun ya da çelik gibi, yoğunluğu oldukça yüksek ve kalın malzemeler giriciliği çok yüksek olan gama radyasyonuna karşı iyi bir zırhlama sağlamaktadır. Sindirilmeden ya da solunum olmadan vücudun iç organlarına önemli ölçüde gama ışını ile doz alınabilmektedir (Aksoy, 2012). Radyasyon dozu değerlendirilmelerinde, doğal kaynakların önemli yer tutması sonucu insanların bu kaynaklardan yayımlanan radyasyonlardan belli oranlarda doz almaktadır. Alınan bu radyasyon, zamanla vücutta toksik etki bırakmaktadır (Sarı & Dizman, 2020).

Yıllık vücuda alınan doz miktarları sağlığa zarar vermeyecek şekilde uluslararası standartlara göre hem radyasyon ile çalışanlar için hem de halk için düzenlenmiştir. Buna göre, (ICRP) Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu tarafından belirlenen müsaade edilen maksimum doz miktarı, bir kişinin hiçbir vücut hastalığı ve genetik bir problem

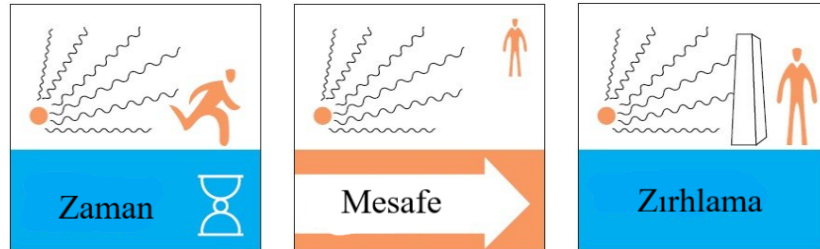
meydana getirmemesi durumu iyonlaştırıcı radyasyon dozu olarak ifade edilir. Tablo 2’de maksimum müsaade edilebilir doz miktarları gösterilmektedir.

Tablo 2. Müsaade edilen maksimum doz miktarları (URL-6, 2025)

Tüm Vücut Etkin Doz Miktarı			Radyasyon Görevlileri (mSv)	Halk (mSv)
			50	1
Yıllık Doz Miktarı	Göz Merceği	Eski	150	15
		Yeni	20	15 (yıl)
	El, Ayak, Tüm Cilt		500	50

1.11. Radyasyondan Korunma Yöntemleri

Radyasyonun biyolojik sistemler üzerindeki etkileri, doku hasarı, mutasyonlar, kontrolsüz hücre bölünmeleri gibi bazı reaksiyonlara sebep olarak zamanla ölümle sonuçlanabilecek kanser vakalarının ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Bu tür zararlı etkileri yanında tıpta teşhis ve tedavi amaçlı uygulamalarda, endüstriyel işlemlerde, nükleer reaktörlerde ve çeşitli bilimsel araştırma alanlarında fayda sağlayacak kritik öneme sahip uygulamaları bulunmaktadır. Radyasyon kaynakları kullanılarak yürütülen çalışmalarda, radyasyona bağlı kazaların önlenmesi, radyasyon yayan maddelerle çalışan kişilerin maruz kaldığı zararlı etkilerden korunmasını sağlamak amacıyla uluslararası kuruluşların belirlemiş olduğu üç temel güvenlik ilkesi mevcuttur. Bunlar; en uzak mesafe (uzaklık), en kalın zırhlama (koruyucu engel) ve en kısa zaman (süre)’dir (Çimen, Erdoğan, & Oğul, 2017). Bu üç temel ilkenin şematik gösterimi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Radyasyondan korunmanın üç temel ilkesi (URL-7, 2025)

1.11.1. Mesafe (Uzaklık)

Radyasyondan korunma yöntemlerinden biri olan mesafe (uzaklık), alfa, beta radyasyonlarının havada aldıkları yol nötron ve gama radyasyonlarına göre daha kısadır. Şiddetleri ise daha fazladır. Bu yüzden radyasyon kaynağının kişiye verebileceği zararın en aza düşürmek için kaynaktan olabildiğince uzakta kalınmalıdır. Bu durumda radyasyon kaynağına olan uzaklık arttıkça radyasyonun şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azalmaktadır.

$$D_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \times D_1 \quad (13)$$

Doz hızı D_2 olan d_2 mesafesindeki bir radyasyon kaynağı ve doz hızı D_1 olan d_1 mesafesinde başka bir radyasyon kaynağının ($d_1 < d_2$) şiddetleri, iki kaynak arasındaki mesafelerinin kareleri ile ters orantılı olacak şekilde daha küçük olduğu görülmektedir (Akyıldırım, 2011).

1.11.2. Zaman (Süre)

Radyasyonun yaygın kullanımı sonucu beraberinde meydana getirdiği risklerden korunma konusunda uluslararası düzeyde kabul gören, radyasyondan korunmanın temel taşını oluşturan, ALARA (As-Low-As-Reasonably Achievable) adı verilen prensip geliştirilmiştir (Sürücü & Subaşı, 2021). Kendisinden r mesafesinde olan A aktivitesine sahip bir kaynağın doz hızı, Γ spesifik gama ışını sabiti olmak üzere;

$$\Delta X = \Gamma \frac{A}{r^2} \Delta t \quad (14)$$

formülüyle ifade edilir (Akyıldırım, 2011). Buna göre, soğrulan radyasyon dozu, maruz kalınan süre ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Yani; radyasyon kaynağı yakınında çalışma süresi ne kadar az olursa vücuda alınan doz miktarı da o kadar az olacaktır. Çalışma süresi artacak olursa radyasyon kaynağının zararlı etkilerinin önlenmesi için zırhlama yapılması gerekmektedir.

1.11.3. Zırhlama (Koruyucu Engel)

Radyasyon kaynağı ile radyasyona maruz kalacak kişiler arasına radyasyonu tamamen emecek veya şiddetini istenilen doz seviyelerine kadar azaltacak özellikte bir engel konulmasıdır. Bu yöntem radyasyonu engellemek için önemli bir yoldur. Zırhlama için yapılabilecek malzemeler, radyoaktif maddelerden yayımlana radyasyonu ortadan kaldıracabilecek düzeyde veya etkisini azaltabilecek düzeyde tasarlanmaktadır. Son yıllarda endüstriyel, tıbbi, zirai amaçlar için kullanılan X-ışınları ve yapay radyoaktif maddeler, nükleer silah denemelerinde ortaya çıkan nükleer serpintiler veya nükleer güç üretiminde salınan radyoaktif maddeler sonucu çevrede doğal radyasyon miktarı seviyelerinde artış gözlenmiştir (Binici, Küçükönder, Sevinç, Eken, & Kara, 2013). Radyasyon kullanılan sistemlerde kullanılan radyasyonu zayıflatma yönünde tasarlanan malzemelerin kalınlığının belirlenmesinde ve zırhlamasının sağlanması maruz kalınan radyasyonun önlenmesi veya tayin edilmesi konusunda zırhlama parametrelerini tayin etmek önem arz etmektedir. Bunun için belirlenen bazı soğurma ve zırhlama parametreleri, yarı değer kalınlığı HVL (Half Value Layer), onda bir değer kalınlığı TVL (Tenth Value Layer), ortalama serbest yol MFP (Mean Free Path) , kütle ve doğrusal soğurma katsayıları gibi parametrelerin zırhlama özelliklerinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir (Aksoy, Dizman, Çakır, Koparan, & Tıraşoğlu, 2021). Radyasyon zırhlama malzemesinin tasarımında geleneksel malzemeler olan kurşun (Pb), tuğla, ağır agregalı beton ve çelik gibi malzemeler kullanılmaktadır. Zırhlama malzemesi olarak en uygun malzeme kurşundur. Ancak kurşun gibi toksik bir etkiye sahip olan bazı elementlerin belli bir oranlarına kadar RoHS (8 Haziran 2011 tarih ve 2011/65/EU sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi, elektrikli ve elektronik ekipmanlarda belirli tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanmasına ilişkin direktifin kısaltması) ve WEEE (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 2012/19/EU sayılı direktifi, elektrikli ve elektronik ekipman atıkları) tarafından bu tür malzemelerin kullanımına sınırlama getirmiştir (Aksoy, 2021). Aşağıdaki Tablo 3'te RoHS tarafından belirlenen maddelerin maksimum konsantrasyon değerleri verilmiştir.

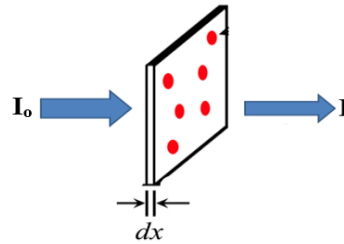
Tablo 3. RoHS tarafından belirlenen maddelerin maksimum konsantrasyon değerleri (URL-8, 2024)

Kısıtlanan Madde	İzin Verilen Maksimum Konsantrasyon
Kurşun (Pb)	%0.10
Cıva (Hg)	%0.10
Kadmiyum (Cd)	%0.01
(+6) değerlikli krom (Cr)	%0.10
Polibromlu bifeniller (PBB)	%0.10
Polibromlu difenileterler (PBDE)	%0.10
Bis(2-etilheksil) ftalat (BBP)	%0.10
Butil benzil ftalat (BBP)	%0.10
Dibutil ftalat (DBP)	%0.10
Diizobutil ftalat (DIBP)	%0.10

Zırhlama parametrelerinin çok büyük miktarlarından dolayı verilerin derlenmesi ve hesaplamaların yapılması bir hayli zordur. Bundan dolayı bu verilerin teorik hesaplanması nedeniyle 1keV-20MeV enerji bölgesindeki çeşitli elementler için birçok yazılımlar geliştirilmiştir (Şakar, Özpolat, Alım, Sayyed, & Kurudirek, 2020). Parametrelerin hesaplanması Beer-Lambert Yasası göz önüne bulundurularak yapılmaktadır. Bu tezde de radyasyon teorik hesaplamaları Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

1.11.4. Beer-Lambert Yasası ve Lineer Soğurma Katsayısı (LAC)

Bir fotonun belirli bir malzeme ile belirli bir şekilde etkileşimde bulunma ihtimalinin, birim yol uzunluğu başına göre değişimine lineer soğurma katsayısı olarak adlandırılır. μ ile gösterilir ve birimi cm^{-1} 'dir. Radyasyon zırhlamada kullanılan, soğurucu olan malzemenin atom numarasına (Z), foton enerjisine (E) ve malzemenin yoğunluğuna bağlı olan önemli bir parametredir (Bashter, 1997).



Şekil 13. Kalınlığı dx olan bir malzemede elektromanyetik radyasyonun soğurulması (URL-9, 2025)

Şekil 13'te bir malzemedan geçen elektromanyetik radyasyonun soğrulması gösterilmektedir. Burada; dx kalınlığına sahip soğurucu bir malzeme üzerine I_0 şiddetinde gönderilen monokromatik X-ışın demeti dx kalınlığını geçerken dI kadar azalmaya uğrar. dI azalma miktarı soğurucu malzemenin kalınlığı ile doğru orantılı değişmektedir.

$$dI \propto -I dx \quad (15)$$

$$dI = -\mu I dx \quad (16)$$

ifadesinin x kalınlığı üzerinden integrali alınır;

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx \quad (17)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (18)$$

şeklinde ifade edilen “Beer Lambert Yasası” elde edilmiş olur. Burada μ lineer soğurma katsayısı ve birimi cm^{-1} , I_0 gelen fotonun yoğunluğu, I emici malzeme içinden geçen foton yoğunluğu, x malzemenin kalınlığıdır.

$$\mu = \frac{\ln(\frac{I_0}{I})}{x} \quad (19)$$

1.11.5. Kütle Soğurma Katsayısı (MAC)

Bir malzemenin içinden geçen elektromanyetik radyasyonun, malzeme içinden geçtikten sonra ne kadarını soğurduğunu veya saçtığını belirten zırlama parametresidir. μ/ρ ile gösterilir ve birimi cm^2/g 'dır. Bir başka ifadeyle lineer soğurma katsayısının yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilir. Foton enerjisine bağlı ve ters orantılı olarak değişmektedir. Burada foton enerjisi ne kadar yüksek olursa kütle soğurma katsayısı düşük olacaktır. Atom numarasına bağlıdır. Atom numarası arttıkça kütle soğurma katsayısı da artacaktır.

Bazen birden fazla element içeren malzemelerin kütle soğurma katsayılarını bilmek gerekmektedir. Madde mekanik bir karışım, çözelti veya kimyasal bir bileşik (katı, sıvı, gaz gibi) olması halinde kütle soğurma katsayısı basitçe bileşen elementlerin kütle soğurma katsayılarının ağırlıklı ortalamasıdır. Eğer $w_1, w_2, \dots$, elementin ağırlık kesri ise, kütle soğurma katsayıları toplamı denklem 20'deki gibi ifade edilir (Cullity, 1978).

$$\frac{\mu}{\rho} = w_1 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_1 + w_2 \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_2 + \dots \quad (20)$$

1.11.6. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)

Yarı değer kalınlığı (HVL); kullanılan radyasyon malzemesi içerisindeki yoğunluğunun başlangıç değerinin yarıya düştüğü noktaya karşılık gelen kalınlık olarak ifade edilmekte ve birimi (cm) ile gösterilmektedir (Kamışlıoğlu, 2021). HVL değeri, ne kadar düşükse fotonların yoğunluğunu azaltmak için gereken numunenin küçük kalınlığı nedeniyle zırlama özelliği daha iyi olmaktadır. Bu bağlamda, malzeme kalınlığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, radyasyon zırlama uygulamalarında kullanılan önemli bir parametredir. Lineer soğurma katsayısı ile ilişkili bir kavram olup aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (21)$$

1.11.7. Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL)

Onda bir değer kalınlığı (TVL); kullanılan radyasyon malzemesinin içerisindeki yoğunluğunu başlangıç değerinin onda birine yani %10'una düşüren kalınlık olarak ifade edilmekte ve birim olarak cm ile gösterilmektedir. Bu değere ne kadar yüksek enerji gönderilirse o kadar nüfuz etme oranı artmaktadır. Ancak zırlama malzemelerinde bu değer nüfuz etme oranının azaltılması gerekmektedir. TVL değeri, lineer soğurma katsayısı (μ) kullanılarak denklem 22'de belirtildiği gibi ifade edilmektedir.

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.302}{\mu} \quad (22)$$

1.11.8. Ortalama Serbest Yol (MFP)

Ortalama serbest yol (MFP); iki ardışık çarpışma arasında bir parçacığın katetmiş olduğu ortalama mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bir malzemenin radyasyon zırhlama özelliklerini gösteren temel bir parametredir. Birimi cm olup;

$$MFP = \frac{\int_0^{\infty} t e^{(-\mu t)} dt}{\int_0^{\infty} e^{(-\mu t)} dt} = \frac{1}{\mu} \quad (23)$$

formülü ile gösterilmektedir (Aksoy, 2021). Bu değer düşük enerjilerde küçük değere sahiptir. Yüksek enerjilere doğru hızlı artmaktadır. Bu durum foton enerjisi arttıkça fotonun malzemeye daha iyi nüfuz edeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden daha iyi radyasyon zırhlama elde etmek için yüksek enerjili bir fotonun kullanıldığı numunelerde numune kalınlığını arttırmak daha iyi olacaktır.

1.11.9. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Atomdaki elektronlar ile protonlar arasındaki elektrostatik etkileşimin bir ölçüsü olan Z_{eff} değeri, ilk kez 1952 yılında Hine tarafından ortaya konuldu. Bileşik veya kompozit gibi malzemelerde farklı enerji bölgelerinde bulunan X-ışını ve gama ışını etkileşimlerini temsil etmek için kullanılan bir parametredir. Tek bir sayı olarak ifade edildiğinden, birkaç elementten oluşan bir malzemenin etkin atom numarasını temsil etmez. X-ışınları ve gama ışınlarının maddeyle etkileşime girebildiği farklı aralıkların her biri için, malzemede bulunan farklı atom numaraları farklı ağırlık numaralarına sahip olur. Bundan dolayı Z_{eff} değeri, malzeme için gerçek bir değer olmayıp etkileşim aralıklarına bağlı olarak foton enerjisine göre değişmektedir. Birden fazla element içeren malzemelerin karmaşık etkileşimlerini basitleştirerek daha kolay analiz, tasarım yapılmasına olanak tanımakta ve bu değer

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i A_i (\mu/\rho)_i}{\sum_j n_j A_j / Z_j (\mu/\rho)_j} \quad (24)$$

formülü ile ifade edilmektedir (Manohara, Hanagodimath, Thind, & Gerward, 2008). Burada n, elementin mol sayısı; A, atomik kütlesi; Z, atom numarası; μ , kütle soğurma katsayısı; (μ/ρ) malzeme içindeki elementin kütle soğurma katsayısıdır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Malzeme Üretimi

Bu çalışmada kullanılan lehim alaşım numuneleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Atom ve Molekül Fiziği laboratuvarında üretilmiştir. Pb, Bi, In ve Sn elementlerinden kütle oranları değerlendirilerek küçük parçalar alındı. Alınan her parça numuneyi duyarlılığı 10^{-1} g olan Ohaus marka cihaza konularak tartıldı. Küçük numune kaplarına alınan parçaların üzerine aseton döküldü ve içine su doldurulan Hy Teknoloji Ultrasonic Machine cihazına yerleştirilerek 5 dakika temizlenmesi sağlandı. Temizlenen numuneler kalıplara alınarak 1 saat süre ile 350°C üzerindeki sıcaklıklarda eritildi. Eritilen numuneler kalıplara alındı ve kalınlıkları ayarlanarak kesme işlemi gerçekleştirildi. Şekil 14'te bir numuneye ait eritme işlemi ve bütün numunelerin şekli gösterilmektedir.



Şekil 14. Kurşun ve kurşun içerikli lehim alaşım numunelerinin görünüşü

Çalışılan numunelerin kimyasal formülü, kütlesi, kalınlığı, alanı, hacmi ve yoğunlukları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Kurşun içeren lehim alaşım numuneleri ve özellikleri

Kimyasal Formül	Numune Kodu	Kütlesi (g)	Kalınlık (cm)	Alan (cm ²)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
Pb _{0.5} Bi _{0.45} In _{0.1}	Örnek-1	0.1397	0.027	5.3020	0.1432	9.6580
Pb _{0.6} Bi _{0.4}	Örnek-2	0.0969	0.014	6.3347	0.0887	10.6960
Pb _{0.7} Sn _{0.3}	Örnek-3	0.1632	0.034	6.2404	0.2122	10.0961
Saf Pb	Örnek-4	0.2597	0.054	6.3503	0.3429	11.3000
Pb _{0.5} Sn _{0.5}	Örnek-5	0.0963	0.020	5.4799	0.1041	9.2935
Pb ₆₀ Sn ₄₀	Örnek-6	0.1744	0.050	2.9571	0.1419	9.6948
Pb ₄₀ Sn ₆₀	Örnek-7	0.1078	0.040	4.4678	0.1921	8.8922

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında lehim alaşım numunelerinin konsantrasyon değerleri SEM (Scanning Electron Microscopy) ve XRD (X-Ray Diffraction) cihazları kullanılarak ölçüldü. Buradan alınan sonuçlar, Origin yazılımına girildi ve program ile şiddet-2θ grafikleri çizildi. Ayrıca bu çalışmada radyasyon parametrelerinin ölçülmesinde bağlı verimi %55, çözünürlüğü (yarı maksimumdaki tam genişliği) çok kanallı bir analizöre sahip yüksek saflıktaki germanyum dedektörü ORTEC HPGe marka, GEM55P4-95 model cihaz kullanılmıştır (Tüysüz & Dizman, 2022).

Radyasyon soğurma kapasitelerinin ölçülmesinde ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs ve ⁶⁰Co radyoaktif halka kaynakları ile numuneler uyarılmıştır. Deney düzeneğine örnekler yerleştirilmeden önce radyoaktif kaynaktan yayımlanan gama ışınlarının değerini belirlemek için boş sayım yapıldı. Ölçümler için gama ışını dedektörü ile sırasıyla ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co ve ²⁴¹Am radyoaktif kaynak arasına lehim alaşım numunelerinin her biri ayrı ayrı yerleştirildi. Her bir lehim alaşım numunesi 10 dakika (600 saniye) boyunca HPGe ile sayıldı. Gama spektrumları ölçümler sonucunda elde edildi ve Ortec Gamma Vision yazılımı kullanılarak foto pik alanları belirlendi. Belirlenen foto pik alanları Excel programında yerine yazılarak elde edilen verilerle hem Orijin yazılımında hem de Excel programında grafikleri çizildi. Germanyum dedektörü (HPGe) sisteminin genel görünüşü Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. Germanyum dedektör (HPGe) sisteminin görünüşü

2.2. XRD (X-Işını Kırınımı)

X-ışını kırınım, bir kristalin atomik ve moleküler yapısını belirlemek için malzeme üzerine gönderilen X-ışınını her yöne kırmaya yarayan yöntem veya araç olarak nitelendirilir. Kristal malzemelerin karakterizasyonu, ince taneli minerallerin tanımlanması, birim hücre boyutlarının belirlenmesi numune saflığının ölçülmesi gibi birçok uygulamada kullanılır. XRD yönteminin işlevi, toz veya katı malzemelerin fazını tanımlamak ve analiz etmektir. Hem kalitatif hem de kantitatif olmak üzere iki tür analiz yöntemi vardır. Kantitatif analizde verileri bileşenlerinin her birinin miktar yönünden incelemeyi içerirken; kalitatif analizde ise verileri hangi bileşenlerden meydana geldiğini, faz tipinin, faz bileşiminin yüzdesi, kristalin boyutu, yönelimi şeklinde olan faz analizini içermektedir. X-ışını madde ile etkileşime girdiğinde demetlerinin bir kısmı emilir, iletilir ve bir kısmı da saçılmaya uğrar. Fazlar birbirinden farklı olduğunda saçılan X-ışını demeti birbirini yok eder. Fazlar aynı olduğunda ise birbirlerini güçlendirirler. Bu şekilde birbirini güçlendiren X-ışını demetleri kırınım demetleri olarak ifade edilir ve bu demetler parmak izi adı verilen belirli desenler oluştururlar (Fatimah, Ragadhita, Husaeni, & Nandiyanto, 2022).

Çalışmada Rigaku SmartLab marka X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. Bu cihazla toz, katı gibi numunelerde fazların miktarı, kristal boyutu, yönelimi, latis parametreleri,

yapıdaki değişimleri hakkında bilgiler sunmaktadır. Kristal yapıdaki faz değişimlerini 2300°C'ye kadar atmosfer, vakum ve hareketsiz gaz ortamında görmek mümkün olmaktadır. Şekil 16'da kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 16. XRD Rigabu SmartLab cihazı (RTE Üniversitesi)

2.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

Taramalı elektron mikroskobu, malzemelerin şekil, boyut, bileşim, kristalografik yapıları hakkında bilgi sağlayan ve yüksek çözünürlüklü görüntülerinin oluşturulması için kullanılan bir cihazdır. Mikroskopta oluşturulan yüksek çözünürlüklü görüntüler, cihazda bulunan ikincil elektron görüntü (SEI) ve geri yansıyan elektron görüntü (BSE) dedektörleri ile mümkündür. EDS sistemiyle birlikte kullanılmasıyla seçilmiş alanın X-ışını haritalanması yapılarak bu bölgenin kantitatif ve kalitatif analizleri yapılmasına olanak sağlamaktadır.

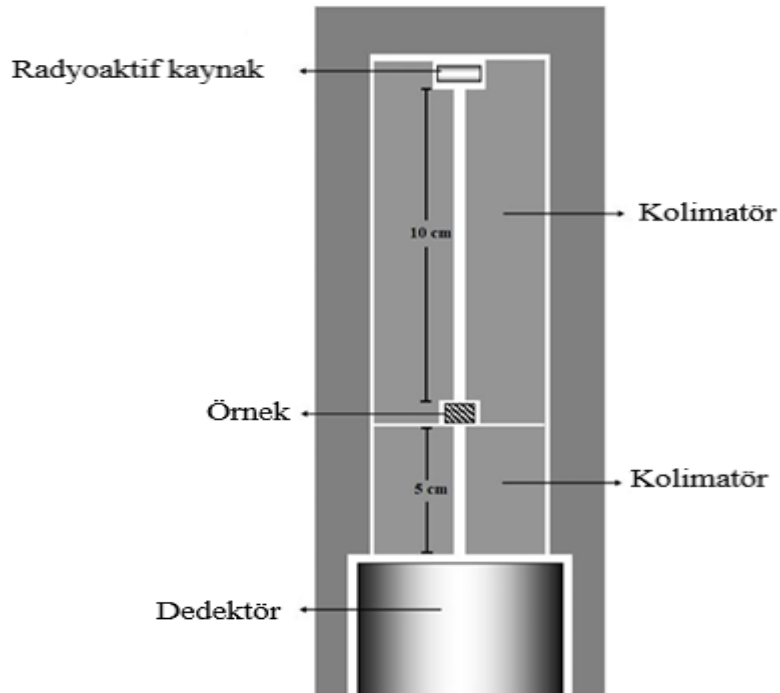
Bu çalışmada kurşun ve kurşun içerikli lehim alaşımların mikroskobik çalışmaları için yüksek vakum sputter platin kaplama cihazı, karbon kaplama ataçmanı ve biyolojik örnekler için kritik nokta kurutucusu olan JEOL 6610 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) kullanıldı. Şekil 17'de laboratuvarında kullanılan SEM/EDX sisteminin şematik şekli gösterilmektedir. Elektron demetinin malzeme ile etkileşimde bulunması ile geri yansıyan elektronların sayılmasıyla görüntüler elde edilir. SEM, yüksek atom numarası ve geri yansıyan elektron numaralarında daha etkili olduğundan bu tür malzemelerin görüntülerindeki yüksek atom numarasına sahip ağır metallerin daha parlak olmasını sağlar.



Şekil 17. SEM/EDX JOEL 6610 taramalı elektron mikroskobu (RTE Üniversitesi)

2.4. Deney Tasarımı ve Geometrisi

Soğurma ölçümlerinde kullanılan yüksek saflıkta germanyum dedektörü, arka plan radyasyon (background) seviyesini azaltmak için 10 cm kalınlığa sahip silindirik kurşun kalkan ile çevrilmiştir. Radyoaktif kaynaktan çıkan gama ışınlarının dedektör penceresine 90° olarak gelmesini sağlamak için kolimatör kullanılmıştır. Kurşun içerikli lehim alaşımlarının soğurma kapasitelerinin ölçülmesinde Şekil 18’de gösterilen deney düzeneği kullanıldı.



Şekil 18. Gama ışını soğurma sisteminin deneysel kurulum şeması

2.5. Phy-X/PSD ile Teorik Hesaplama

PHY-X/PSD çevrimiçi yazılımı, radyasyon zırlama parametrelerinin hesaplanması için geliştirilmiştir. PSD yazılımını kullanabilmek için <https://phy-x.net/PSD> web sayfasına erişimin olması gereklidir. İlk adım olarak, hesaplamalarda kullanılacak malzemenin kimyasal bileşimi doğru bir şekilde tanımlanır. Malzemenin kimyasal bileşimi mol kesri veya ağırlık kesri şeklinde iki farklı yolla girilebilir. Belirlenen kimyasal bileşimin mol kesri veya ağırlık kesri toplamının 100 ya da 1'e eşit olması gerekmektedir. Ayrıca yazılımda kimyasal bileşimin yoğunluk değerleri de ilgili yere yazılmalıdır. Phy-X/PSD çevrimiçi yazılımda 15 keV-15 MeV ve 1 keV-100 GeV olmak üzere iki enerji aralığı mevcuttur. Sürekli enerji aralığı veya bazı karakteristik (K-kabuğu) X-ışınları enerji aralığı seçilerek hesaplanması istenilen parametrelerin teorik verileri elde edilmektedir (Şakar, Özpolat, Alım, Sayyed, & Kurudirek, 2020).

Bu çalışmada Phy-X/PSD çevrimiçi yazılımı kullanılarak $Pb_{0.5}Bi_{0.45}In_{0.1}$; $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$; $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$; Saf Pb, $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$; $Pb_{60}Sn_{40}$ ve $Pb_{40}Sn_{60}$ lehim alaşımlarının mol kesri cinsinden kimyasal bileşimleri, yoğunluk değerleri dikkate alınarak, 1keV-100 GeV sürekli enerji aralığında teorik zırlama verileri elde edilmiştir. Her alaşım için ayrı ayrı yapılan hesaplamalarda ^{241}Am , ^{60}Co ve ^{137}Cs radyoaktif kaynakları kullanılmıştır. Teorik olarak lineer soğurma katsayısı (LAC), kütle soğurma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR

Bu çalışmada 59.5keV düşük enerjiye sahip ^{241}Am , 1172keV ve 1332keV yüksek enerjiye sahip ^{60}Co , 662keV orta enerjiye sahip ^{137}Cs radyoaktif kaynaklar kullanılarak, Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının Ortec Gamma Vision programı yardımıyla foton pik alanları belirlendi ve “Beer-Lambert Yasası” kullanılarak Orijin yazılımında analizleri yapılmıştır. Pb, Sn, Bi, In elementlerini içeren farklı alaşımlar için ^{241}Am , ^{60}Co ve ^{137}Cs kaynaklarından yayılan gama fotonlarına karşı zırlama parametrelerinin hem deneysel hem de Phy-X/PSD yazılımı kullanılarak teorik hesaplamaları yapılmıştır. Üretilen kurşun içeren lehim alaşım numuneleri $\text{Pb}_{0.5}\text{Bi}_{0.45}\text{In}_{0.1}$ -(Örnek-1); $\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$ -(Örnek-2); $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$ -(Örnek-3); Saf Pb-(Örnek-4); $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ -(Örnek-5); $\text{Pb}_{60}\text{Sn}_{40}$ -(Örnek-6) ve $\text{Pb}_{40}\text{Sn}_{60}$ -(Örnek-7) olarak kodlanmıştır.

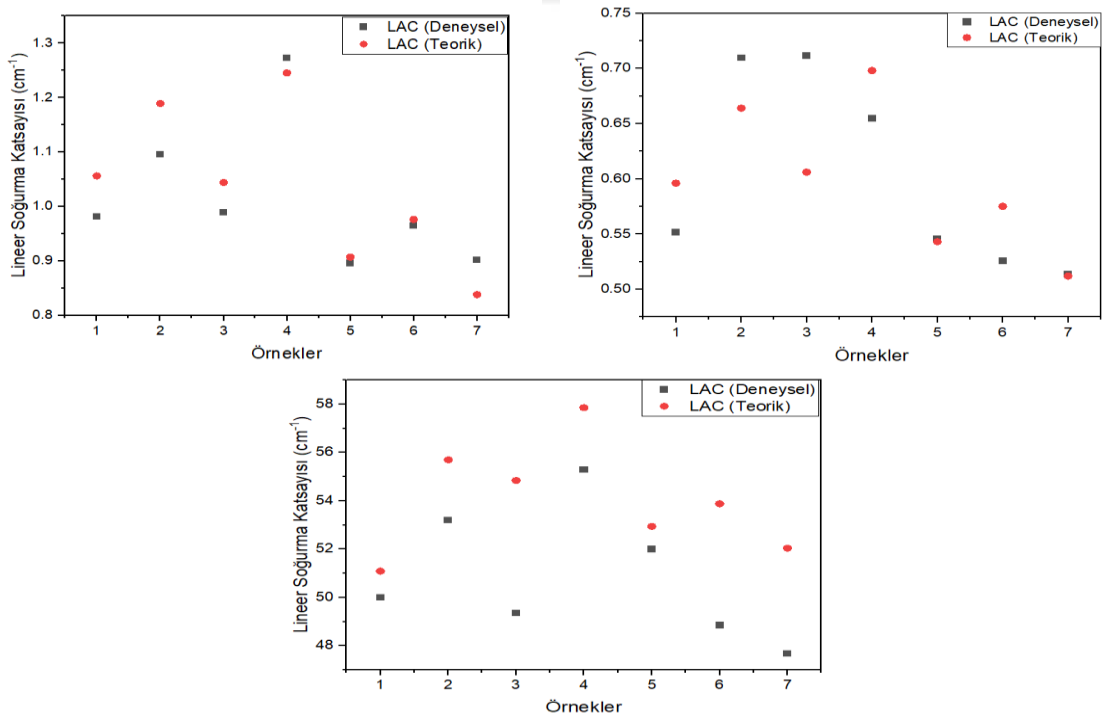
3.1. Lineer Soğurma Katsayıları (LAC)

Soğrulan malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak değişen bir parametre olan lineer soğurma katsayısının (μ) deneysel değerleri Beer-Lambert Yasası kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 5’te Pb ve Pb içerikli lehim alaşımların ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarına karşı deneysel ve teorik (Phy-X/PSD) hesaplamaları karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik LAC değerleri

Numune Adı	Lineer Soğurma Katsayısı (cm^{-1})					
	^{241}Am (59.5keV)		^{60}Co (1172keV)		^{137}Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
$\text{Pb}_{0.5}\text{Bi}_{0.45}\text{In}_{0.1}$	49.997± 0.021	51.090	0.552±0.074	0.596	0.981±0.071	1.056
$\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$	53.205±0.045	55.696	0.710±0.069	0.664	1.095±0.079	1.189
$\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$	49.359± 0.010	54.840	0.711±0.174	0.606	0.989±0.053	1.044
Saf Pb	55.292±0.044	57.854	0.654±0.063	0.698	1.272±0.022	1.245
$\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$	51.995± 0.018	52.939	0.546±0.005	0.543	0.896±0.012	0.907
$\text{Pb}_{60}\text{Sn}_{40}$	48.847± 0.093	53.877	0.525±0.086	0.575	0.964±0.012	0.976
$\text{Pb}_{40}\text{Sn}_{60}$	47.678± 0.084	52.032	0.513±0.002	0.512	0.902±0.076	0.838

Tablo 5'e göre, yüksek atom numarası ve yoğunluğa sahip olan kurşun, yüksek soğurma katsayısına sahiptir. Alaşımlarda kurşun oranı azaldıkça soğurma katsayısı da azalmaktadır. 59,5 keV enerjili ^{241}Am düşük enerjili gama kaynağı ile alınan ölçümde, tüm numunelerde soğurma katsayısının oldukça yüksek olduğu ve bu durumun da düşük enerjili fotonların madde içinde daha kolay soğrulabildiğini göstermektedir. Bu kaynakla yapılan ölçümde saf kurşun ve $\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$ numunelerinin en yüksek soğurma katsayısına sahip olduğu görülmektedir. 1,172MeV ve 1,332MeV enerjili ^{60}Co yüksek enerjili gama kaynağı kullanılarak alınan ölçümde, tüm numunelerde soğurma katsayılarının düşük olduğu bundan dolayı yüksek enerjili fotonların maddeyi kolay geçebildiği, $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$ ve $\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$ lehim alaşımlarının deneysel olarak yüksek soğurma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Yine 0,662 MeV enerjili ^{137}Cs orta enerjili gama kaynağı kullanılarak alınan ölçümde, tüm numunelerin soğurma değerlerinin orta düzeyde olduğu ve saf kurşun ve $\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$ numunelerinin yüksek soğurma katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 19'daki grafikler sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am gama kaynakları kullanılarak alınan ölçümlerde deneysel ve teorik verilerin genel olarak birbirine yakın oldukları görülmektedir.



Şekil 19. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik LAC karşılaştırılması gösterimi

3.2. Kütle Soğurma Katsayıları (MAC)

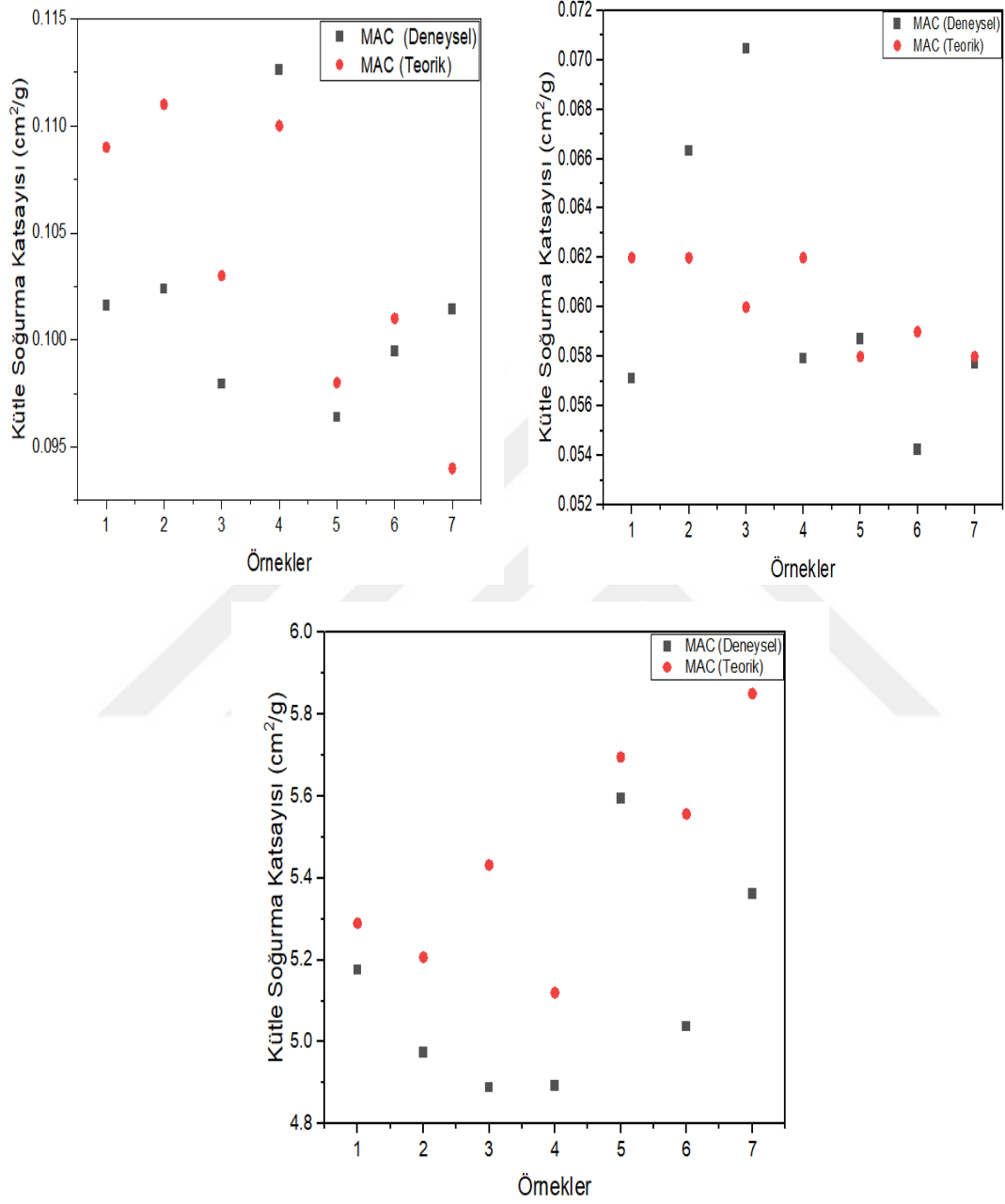
Tablo 6’da Pb ve Pb içeren lehim alaşımlarının üç farklı gama ışını kaynağı kullanılarak kütle soğurma katsayılarının (μ/ρ) deneysel ve teorik (Phy-X/PSD) karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 6. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik MAC değerleri

Numune Adı	Kütle Soğurma Katsayısı (cm^2/g)					
	^{241}Am (59.5keV)		^{60}Co (1172keV)		^{137}Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
$\text{Pb}_{0.5}\text{Bi}_{0.45}\text{In}_{0.1}$	5.176 ± 0.021	5.290	0.057 ± 0.080	0.062	0.102 ± 0.064	0.109
$\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$	4.974 ± 0.045	5.207	0.066 ± 0.065	0.062	0.102 ± 0.081	0.111
$\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$	4.889 ± 0.099	5.432	0.070 ± 0.175	0.060	0.097 ± 0.049	0.103
Saf Pb	4.893 ± 0.044	5.120	0.057 ± 0.080	0.062	0.113 ± 0.027	0.110
$\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$	5.594 ± 0.018	5.696	0.059 ± 0.017	0.058	0.096 ± 0.020	0.098
$\text{Pb}_{60}\text{Sn}_{40}$	5.038 ± 0.093	5.557	0.054 ± 0.085	0.059	0.099 ± 0.019	0.101
$\text{Pb}_{40}\text{Sn}_{60}$	5.361 ± 0.084	5.851	0.058 ± 0.000	0.058	0.101 ± 0.074	0.094

Buna göre, tüm numuneler için üç farklı radyoaktif kaynağa karşı kütle soğurma katsayılarının teorik verilerle uyumlu olduğu görülmektedir. ^{241}Am radyoaktif kaynağın 59.5 keV düşük enerjili gama fotonları için Pb içeriği yüksek olan numunelerde kütle soğurma katsayılarının yüksek olduğu, bu verinin özellikle $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ numune alaşımında gözlemlendiği görülmektedir. Bi içeren numunelerin soğurma katsayıları yüksek atom numarasına sahip olması nedeniyle nispeten yüksektir. 1.17 ve 1.33MeV enerji aralığında ^{60}Co yüksek enerjili kaynağa karşı tüm numunelerde kütle soğurma katsayıları oldukça düşüktür. Ancak en yüksek deneysel değer $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$ alaşımında olması ve teorik değerinden yüksek olması ölçüm belirsizliğinden kaynaklanabilir. $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ numune lehim alaşımının deneysel kütle soğurma katsayısı değeri $0.059 \text{ cm}^2/\text{g}$, teorik değeri ise $0.058 \text{ cm}^2/\text{g}$ olduğundan aralarındaki farkın oldukça düşük olduğu ve bu enerji aralığında deneysel verileri iyi temsil ettiği görülmektedir. ^{137}Cs orta enerjili gama kaynağı kullanılarak yapılan incelemede ise kurşun içeriği yüksek olan numune alaşımlarında kütle soğurma katsayısı daha iyi sonuç vermektedir. Bu bağlamda, geniş enerji aralığında etkili zırhlama amacıyla $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ lehim alaşımının en uygun aday olduğu söylenebilir. Şekil

20'deki grafiklerde sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am kaynaklarından yayılan gama ışınlarının deneysel ve teorik verilerin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 20. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik MAC karşılaştırılmalı gösterimi

3.3. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)

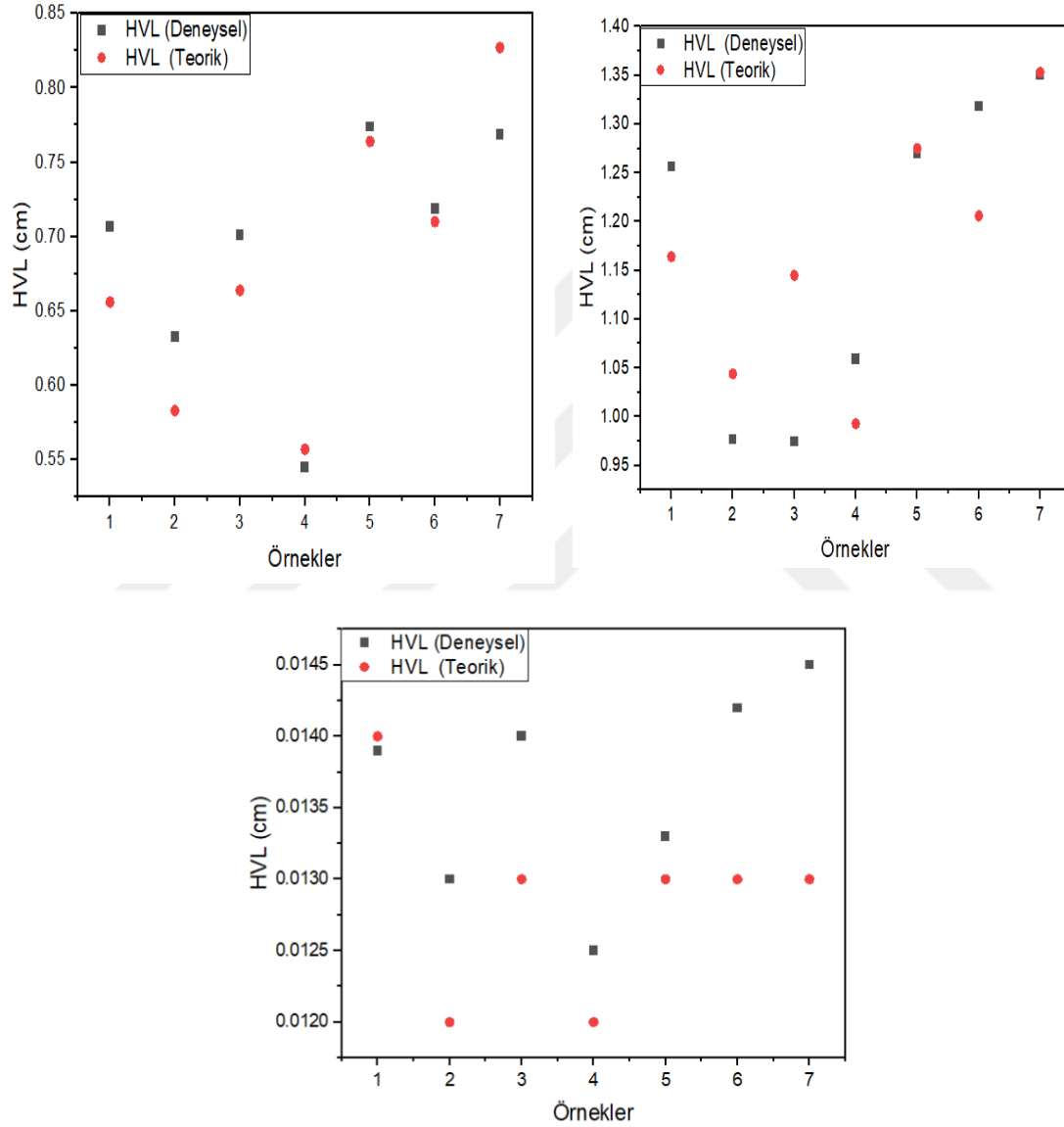
Yedi farklı lehim alaşım numunelerinin hem deneysel hem de teorik HVL değerleri hesaplanarak Tablo 7'deki veriler elde edilmiştir. HVL, bir malzemenin gama şiddetini yarıya indiren kalınlık parametresi olarak ifade edilmektedir. Herhangi bir lehim alaşım numunesinin düşük HVL değerine sahip olması, daha az kalınlıkta etkin zırhlama sağlayabileceği ve daha iyi zırhlama etkisi göstereceği söylenebilir.

Tablo 7. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik HVL değerleri

Numune Adı	(HVL) Yarı Değer Kalınlığı (cm)					
	²⁴¹ Am (59.5keV)		⁶⁰ Co (1172keV)		¹³⁷ Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
Pb _{0.5} Bi _{0.45} In _{0.1}	0.014±0.000	0.014	1.257±0.080	1.164	0.706±0.076	0.656
Pb _{0.6} Bi _{0.4}	0.013±0.083	0.012	0.977±0.064	1.044	0.633±0.086	0.583
Pb _{0.7} Sn _{0.3}	0.014±0.077	0.013	0.974±0.149	1.145	0.701±0.056	0.664
Saf Pb	0.013±0.083	0.012	1.059±0.067	0.993	0.545±0.022	0.557
Pb _{0.5} Sn _{0.5}	0.013±0.000	0.013	1.270±0.003	1.275	0.774±0.013	0.764
Pb ₆₀ Sn ₄₀	0.014±0.077	0.013	1.318±0.093	1.206	0.719±0.012	0.710
Pb ₄₀ Sn ₆₀	0.015±0.154	0.013	1.350±0.002	1.353	0.768±0.071	0.827

Buna göre, ²⁴¹Am radyoaktif kaynağın düşük enerjili gama fotonları için yapılan ölçümde, saf Pb numunesinin en iyi zırhlama malzemesi olarak gözlenmekte olduğu, Sn miktarında artış olduğunda HVL değerinin arttığı zırhlama etkisinin ise düştüğü görülmektedir. Bu durumda en zayıf zırhlama etkisi Pb₄₀Sn₆₀ lehim alaşımıdır. ⁶⁰Co yüksek enerjili gama kaynağı ile yapılan ölçümde 1.17 MeV ve 1.33 MeV enerji aralığında Compton saçılması baskındır. En iyi zırhlama etkisinin Pb_{0.6}Bi_{0.4}; Pb_{0.7}Sn_{0.3} ve saf Pb lehim alaşım numunelerinde olduğu görülmektedir. Burada Pb_{0.7}Sn_{0.3} diğer Sn katkılı numune alaşımlarda daha iyi bir etki göstermiş olması, Sn oranının belirli bir seviyeye kadar zırhlama etkisini kritik seviyede azaltmadığı, ancak oranın artması durumunda zırhlama etkisi azaldığı görülmektedir. Bu durumda, en zayıf zırhlama etkisi ise Pb₄₀Sn₆₀ ve Pb₆₀Sn₄₀ numunelerinde gözlemlendiği bununda artan Sn miktarının zırhlama kabiliyetini düşürmesinden kaynaklı olduğu bilinmektedir. ¹³⁷Cs orta enerjili gama kaynağı 662 keV enerji aralığında olduğundan hem fotoelektrik olay hem de Compton saçılması birlikte meydana gelir. Bu durumda, en düşük HVL değerinin saf Pb'de olduğu ve en etkili

zırhlama olduğu gözlenir. Alternatif olarak Bi katkılı olan lehim alaşımlarının makul seviyede zırhlama sağladığı ancak Sn oranı artan numune alaşımlarında HVL değerinin arttığı ve bu da zırhlama etkisini düşürdüğü gözlenmektedir. Şekil 21’de sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am radyoaktif kaynakları kullanılarak elde edilen HVL grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 21. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik HVL karşılaştırılmalı gösterimi

3.4. Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL)

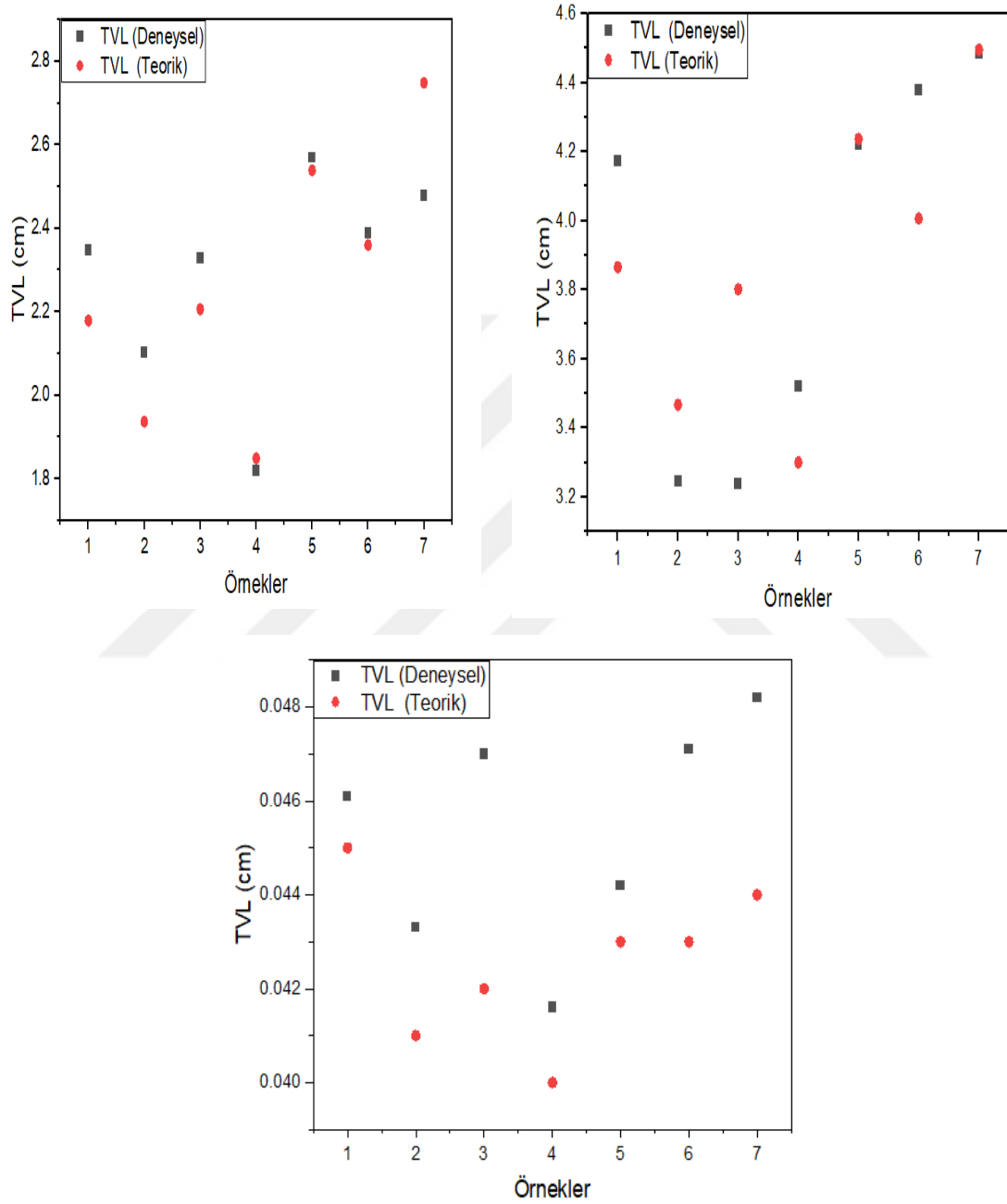
TVL; radyasyon şiddetini onda birine düşürmek için gerekli olan malzeme kalınlığı olduğundan, daha düşük TVL değerinin olması daha iyi zırhlama etkisine sahip olduğu söylenebilir. Yüksek TVL değerlerinde ise, daha kalın malzeme olduğunu ve bununda zırhlama etkisinin düşük olduğunu gösterir.

Tablo 8. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik TVL değerleri

Numune Adı	(TVL) Onda Bir Değer Kalınlığı (cm)					
	²⁴¹ Am (59.5keV)		⁶⁰ Co (1172keV)		¹³⁷ Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
Pb _{0.5} Bi _{0.45} In _{0.1}	0.046±0.022	0.045	4.174±0.080	3.866	2.347±0.077	2.179
Pb _{0.6} Bi _{0.4}	0.043±0.049	0.041	3.245±0.064	3.467	2.102±0.085	1.937
Pb _{0.7} Sn _{0.3}	0.047±0.119	0.042	3.237±0.149	3.802	2.329±0.056	2.206
Saf Pb	0.042±0.050	0.040	3.519±0.066	3.300	1.820±0.016	1.849
Pb _{0.5} Sn _{0.5}	0.044±0.023	0.043	4.220±0.004	4.237	2.570±0.012	2.539
Pb ₆₀ Sn ₄₀	0.047±0.093	0.043	4.379±0.093	4.007	2.388±0.012	2.360
Pb ₄₀ Sn ₆₀	0.048±0.091	0.044	4.486±0.002	4.496	2.479±0.098	2.749

Buna göre, Tablo 8’de belirtildiği gibi tüm numunelerde deneysel ve teorik verilerin birbirine yakın değerler almaktadır. 59.5 keV düşük enerjili ²⁴¹Am kaynağı karşı en düşük TVL değerine 0.042 cm ile saf Pb ve 0.043 cm ile Pb_{0.6}Bi_{0.4} lehim alaşımları sahiptir, bunların ²⁴¹Am kaynağına karşı en iyi zırhlama numuneleri olduğu ve zırhlaması zayıf olan 0.0482 cm ile Pb₄₀Sn₆₀ numunesi olduğu görülmektedir. 1.17 MeV ve 1.33 MeV yüksek enerjili ⁶⁰Co kaynağına karşı en düşük TVL, en iyi zırhlama malzemesinin Pb_{0.6}Bi_{0.4} olduğu ve hata oranının düşük olduğu görülmektedir. Pb₄₀Sn₆₀ alaşımı 4.486 cm ile en yüksek TVL değerini göstermekte, ancak %2’lik en düşük hata oranına sahiptir. Bu durumun oluşmasının nedeni, Sn oranının artmasıyla yüksek enerjili gama ışınlarına karşı zırhlama etkisinin azaldığı gözlenmektedir. 662 keV orta enerjili ¹³⁷Cs kaynağı için elde edilen en düşük TVL değeri saf Pb 1.820 cm ile, 2.570 cm ile Pb_{0.5}Sn_{0.5} alaşımı en yüksek değerine sahiptir. Bu sonuçların çıkması Bi ve Sn katkılarının ¹³⁷Cs karşısında deneysel ve teorik verilerin tutarlı olduğu kurşunun soğurma etkisinin farklı şekillerde etkelediği gözlenmiştir. Alaşım numunesinde Sn oranının artışı zırhlama etkisini azaltmaktadır. Kurşun oranındaki azalma ile birlikte Bi, Sn katkılarının artması TVL değerinde artışa

neden olmakta; bu durum zırhlama etkisinin düştüğünü göstermektedir. Şekil 22’de sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am kaynaklarından elde edilen TVL değerlerinin grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 22. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik TVL karşılaştırılmalı gösterimi

3.5. Ortalama Serbest Yol (MFP)

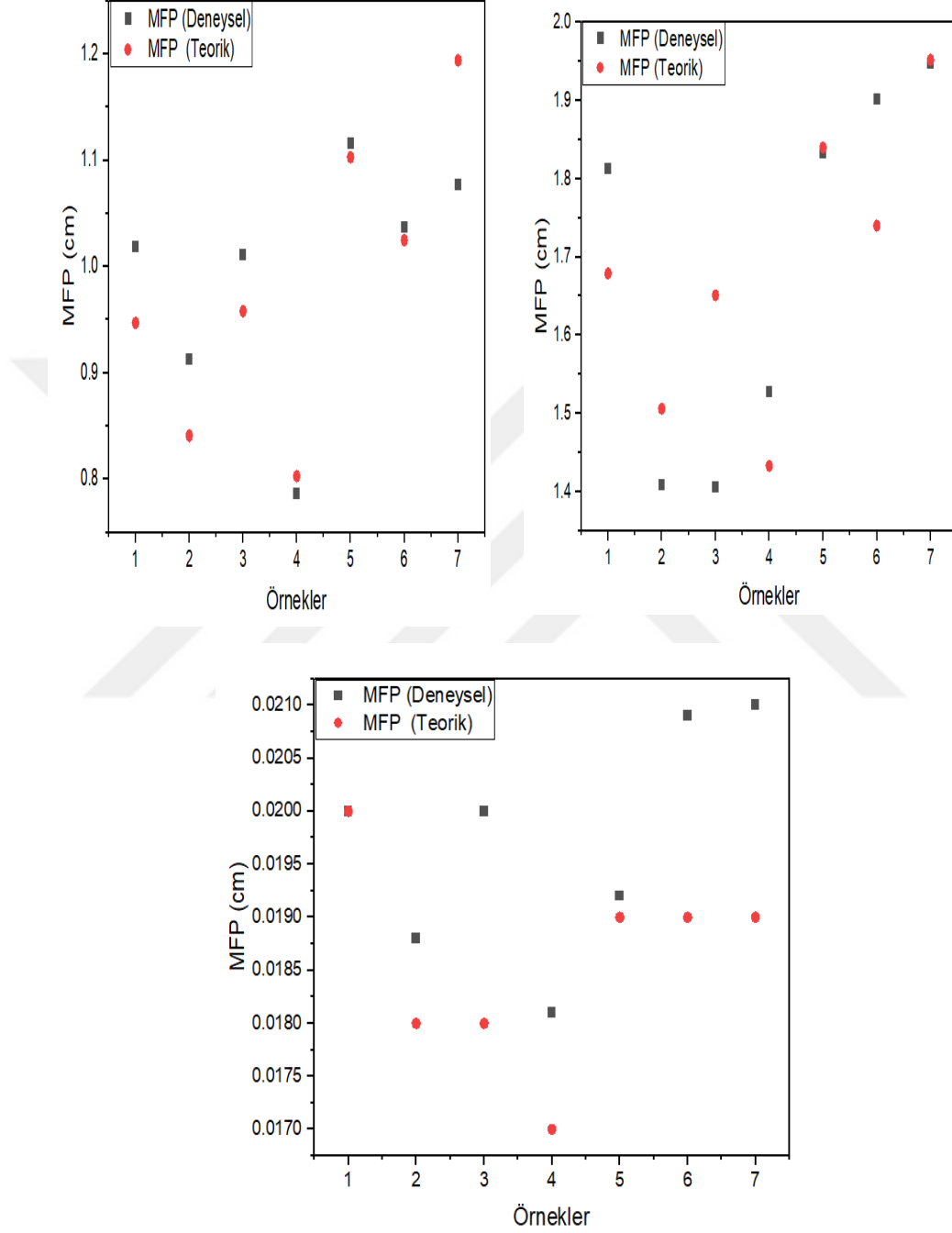
MFP; radyasyonun bir malzeme içerisinde geçerken etkileşime girmeden aldığı yol olarak ifade edildiğinden, daha düşük MFP değerleri, ilgili malzemenin radyasyonu daha iyi soğurduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 9. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik MFP değerleri

Numune Adı	(MFP) Ortalama Serbest Yol (cm)					
	²⁴¹ Am (59.5keV)		⁶⁰ Co (1172keV)		¹³⁷ Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
Pb _{0.5} Bi _{0.45} In _{0.1}	0.020±0.000	0.020	1.813±0.080	1.679	1.019±0.076	0.947
Pb _{0.6} Bi _{0.4}	0.019±0.056	0.018	1.409±0.064	1.506	0.913±0.086	0.841
Pb _{0.7} Sn _{0.3}	0.020±0.111	0.018	1.406±0.148	1.651	1.011±0.055	0.958
Saf Pb	0.018±0.059	0.017	1.528±0.066	1.433	0.786±0.021	0.803
Pb _{0.5} Sn _{0.5}	0.019±0.000	0.019	1.833±0.003	1.840	1.116±0.012	1.103
Pb ₆₀ Sn ₄₀	0.021±0.105	0.019	1.902±0.093	1.740	1.037±0.012	1.025
Pb ₄₀ Sn ₆₀	0.021±0.105	0.019	1.948±0.002	1.952	1.077±0.098	1.194

Tablo 9’da belirtildiği gibi, 59.5 keV düşük enerjili ²⁴¹Am kaynağına karşı deneysel ve teorik MFP değerleri arasında yüksek düzeyde uyum gözlenmektedir. Bi ve In katkılı alaşımlar düşük enerji aralığında Pb kadar iyi bir zırhlama sağlamakta, ancak yüksek enerjide biraz daha az etkili olmaktadır. Bu durumda en düşük MFP değerleri 0.018 cm ile saf Pb, 0.019 cm ile Pb_{0.6}Bi_{0.4}, 0.020 cm ile Pb_{0.7}Sn_{0.3} görülmektedir. En yüksek MFP değeri ise 0.021 cm ile Pb₆₀Sn₄₀ ve 0.021 cm ile Pb₄₀Sn₆₀ numune alaşımlarında etkili olduğu gözlenmektedir. 1.77 MeV ve 1.33 MeV yüksek enerjili ⁶⁰Co kaynağına karşı en düşük MFP değeri 1.409 cm ile Pb_{0.6}Bi_{0.4} sahip ve en iyi zırhlama numunesidir. En yüksek MFP değeri 1.948 cm ile Pb₄₀Sn₆₀ ve 1.902 cm ile Pb₆₀Sn₄₀ zayıf zırhlama özelliğine sahiptir. Bi katkısının, bu enerji seviyesinde zırhlama etkisini arttırdığı, Sn oranı arttıkça MFP değerinin arttırdığı bu da zırhlama etkisini azalttığını göstermektedir. 662keV orta enerjili ¹³⁷Cs kaynağı ile yapılan ölçümlerde en düşük MFP değerinin 0.786 cm ile saf Pb numunesinde olduğu, en yüksek MFP değerinin de 1.116 cm ile Pb_{0.5}Sn_{0.5} ve 1.077 cm ile Pb₄₀Sn₆₀ olduğu görülmektedir. Kurşun içeren numunelerin orta enerjili gama ışınlarına karşı diğer alaşımlara kıyasla etkili olduğu ancak bu Sn katkısının artması durumunda da radyasyon zırhlama etkisinin azaldığı göstermektedir. Genel olarak deneysel ve teorik

veriler birbirleriyle uyumlu olduğu söylenebilir. Sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am kaynakları kullanılarak elde edilen MFP değerlerinin grafikleri Şekil 23'te gösterilmektedir.



Şekil 23. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağı ile deneysel ve teorik MFP karşılaştırılmalı gösterimi

3.6. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

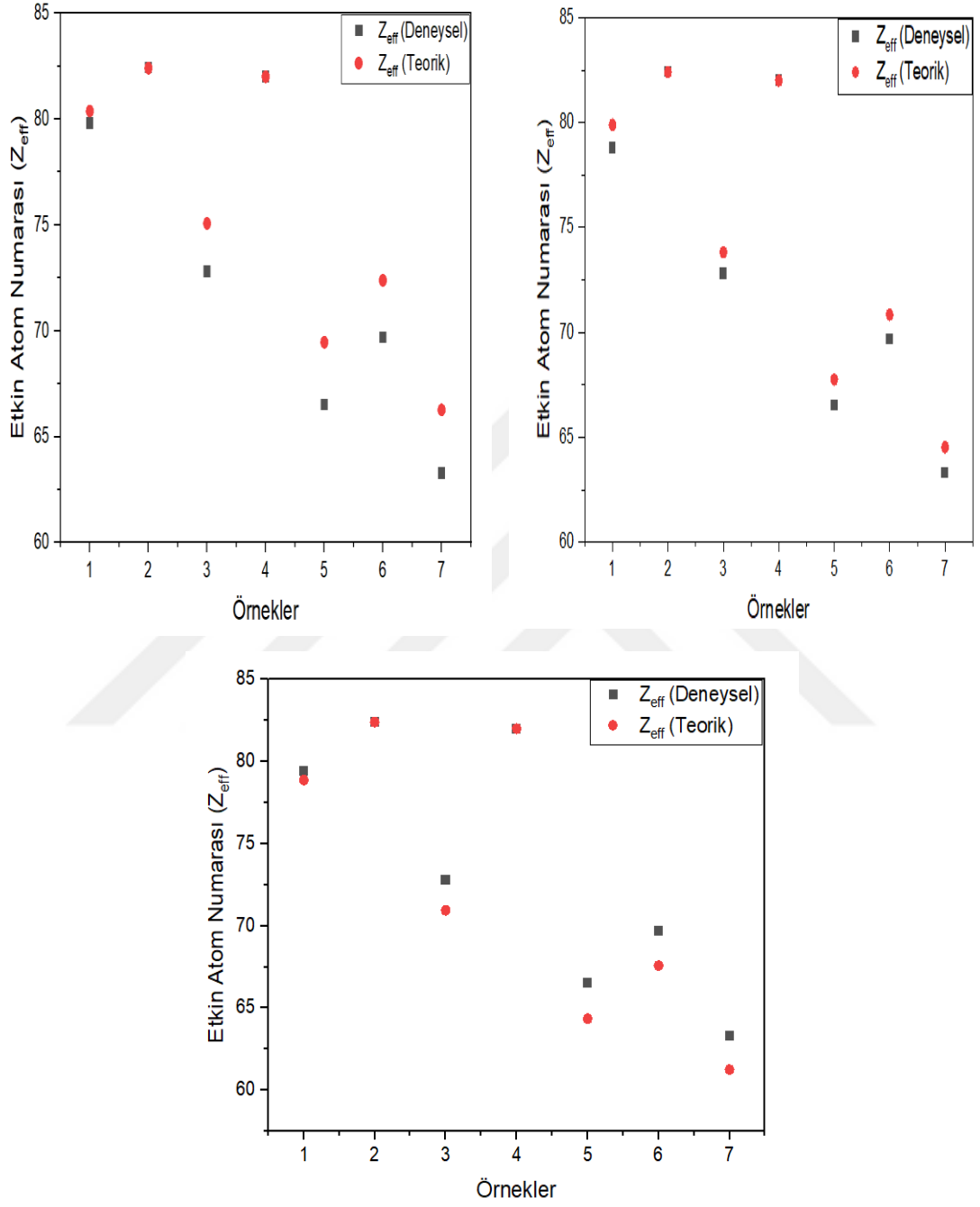
Z_{eff} değerlerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması, farklı alaşım numunelerin bileşimlerinin foton etkileşimine olan katkısını anlamak için önemlidir. Tablo 10'da deneysel ve teorik veriler birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Pb ve Pb içerikli lehim alaşımlarının deneysel ve teorik Z_{eff} değerleri

Numune Adı	Etkin Atom Numarası (Z_{eff})					
	^{241}Am (59.5 keV)		^{60}Co (1172keV)		^{137}Cs (662keV)	
	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik	Deneysel	Phy-X Teorik
$\text{Pb}_{0.5}\text{Bi}_{0.45}\text{In}_{0.1}$	79.40±0.007	78.88	78.80±0.014	79.89	79.80±0.007	80.38
$\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$	82.40±0.000	82.41	82.40±0.000	82.40	82.42±0.000	82.40
$\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}$	72.81±0.026	70.95	72.81±0.014	73.81	72.81±0.030	75.07
Saf Pb	82.00±0.000	82.00	82.00±0.000	82.00	82.00±0.000	82.00
$\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$	66.50±0.033	64.35	66.50±0.018	67.75	66.50±0.043	69.46
$\text{Pb}_{60}\text{Sn}_{40}$	69.67±0.031	67.58	69.67±0.017	70.84	69.68±0.037	72.38
$\text{Pb}_{40}\text{Sn}_{60}$	63.28±0.033	61.25	63.28±0.019	64.52	63.28±0.045	66.27

59.5 keV düşük enerjili ^{241}Am ile kaynağı ile yapılan ölçümlerde Z_{eff} değerlerinin daha belirgin farklılık göstermesinin nedeni fotoelektrik etkinin baskın olmasından kaynaklıdır. Fotoelektrik etkinin baskın olduğu bu enerjide Pb ve Bi içeren alaşımlar Z_{eff} açısından avantajlı olduğu görülmektedir. Sn oranının artması Z_{eff} değerini düşürdüğü ve bu da deneysel verilerde net bir şekilde görülmektedir. 1.17 MeV ve 1.33 MeV yüksek enerjili ^{60}Co kaynağı ile yapılan ölçümde ve 662 keV orta enerjili ^{137}Cs kaynağı ile yapılan ölçümde Compton saçılması baskındır. Yüksek enerjili ^{60}Co kaynağında Compton saçılması baskın olduğundan Z_{eff} değeri daha az oranda değişmekte, deneysel ve teorik değerlerin birbirine yakın olması da yüksek enerjili fotonların atom numarasına karşı olan duyarlılığın düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak, Pb elementinin atom numarası yüksek olduğundan oranı arttıkça Z_{eff} değeri artmaktadır. Sn elementinin atom numarası Pb'den düşük olduğundan numunelerde kalay oranı arttıkça Z_{eff} değeri düşmektedir. Bu durum, $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$; $\text{Pb}_{60}\text{Sn}_{40}$; $\text{Pb}_{40}\text{Sn}_{60}$ lehim alaşım numunelerinden belirgin olarak görülmektedir. Bi elementi yüksek atom numarasına sahip olduğundan Bi içeren numunelerin Z_{eff} değerleri yüksektir. Şekil 24'te sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{241}Am gama kaynakları

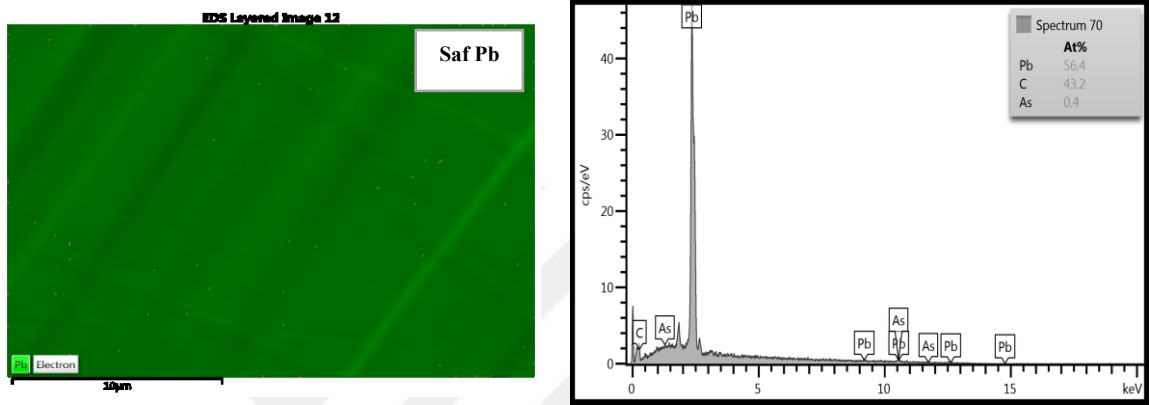
kullanılarak alınan ölçümlerin deneysel ve teorik Z_{eff} değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 24. Numunelerin sırasıyla ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am radyoaktif kaynağına karşı deneysel ve teorik Z_{eff} karşılaştırılmalı gösterimi

3.7. XRD ve SEM/EDX Sonuçları

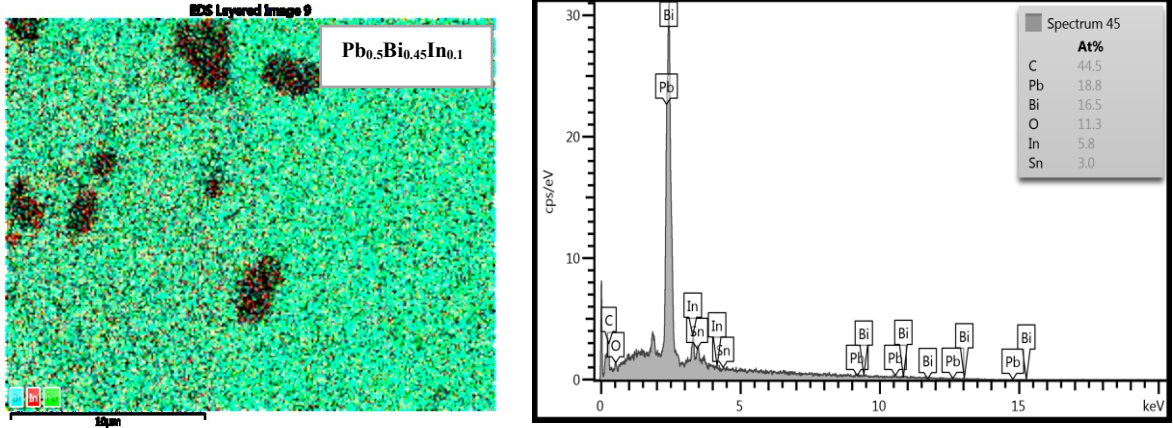
Şekil 25'te saf kurşun numunesine ait SEM/EDX spektrumları ve EDX haritalama görüntüsü gösterilmektedir. Görüntüde yeşil alanlar Pb elementini temsil etmekte olup, tüm yüzeye eşit bir şekilde homojen bir dağılıma sahip olduğu, dolayısıyla kristal bir yapıda, yüksek saflıkta olduğu görülmektedir.



Şekil 25. Saf Pb numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

Karbon elementinin varlığı muhtemelen numunenin hazırlanması sırasında ortaya çıktığı, az miktarda bulunan arsenik elementinin varlığı ise yine üretim sürecinden kaynaklı olabilir. EDX spektrumunda başka fazların varlığı olmadığından saflık oranı oldukça yüksek, tepe noktası saf Pb elementinin karakteristik kristal yapılarına karşılık gelmektedir.

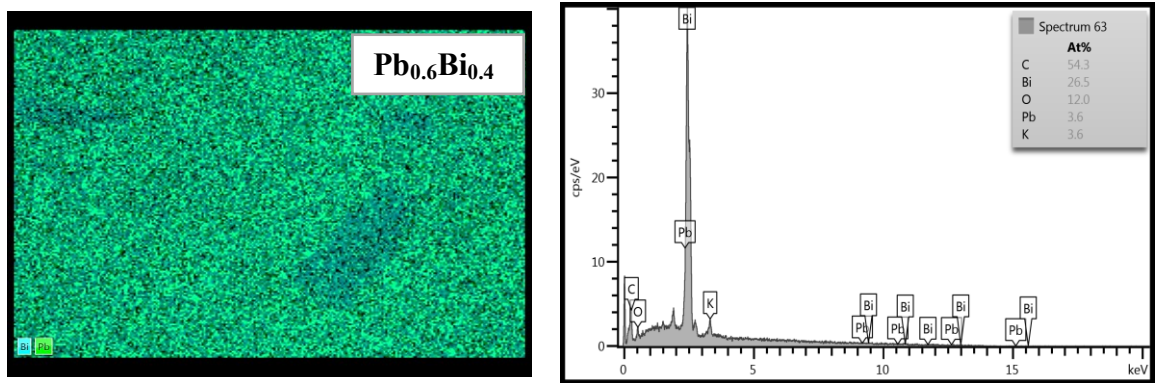
Şekil 26'da $Pb_{0.5}Bi_{0.45}In_{0.1}$ SEM/EDX spektrumları ve EDX haritalama görüntüsü gösterilmektedir. Buna göre; yeşil renk Pb, mavi renk Bi ve kırmızı renk In elementini temsil etmektedir. Bi ve Pb elementleri yüzeye homojen dağılmış olmasına rağmen In elementi bazı bölgelerde faz ayrımına uğrayarak biriktiği görülmektedir.



Şekil 26. $Pb_{0.5}Bi_{0.45}In_{0.1}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

Yüzeyde meydana gelen oksitlenmenin sonucunda oksijen elementinin ve numune hazırlanması sırasında veya yüzey kontaminasyonundan kaynaklı karbon elementinin varlığından görüntüde söz etmek mümkündür. EDX spektrumunda, pikler keskin ve belirgindir. Bu da $Pb_{0.5}Bi_{0.45}In_{0.1}$ lehim alaşım numunesinin düzenli bir yapıda olduğunu göstergesidir.

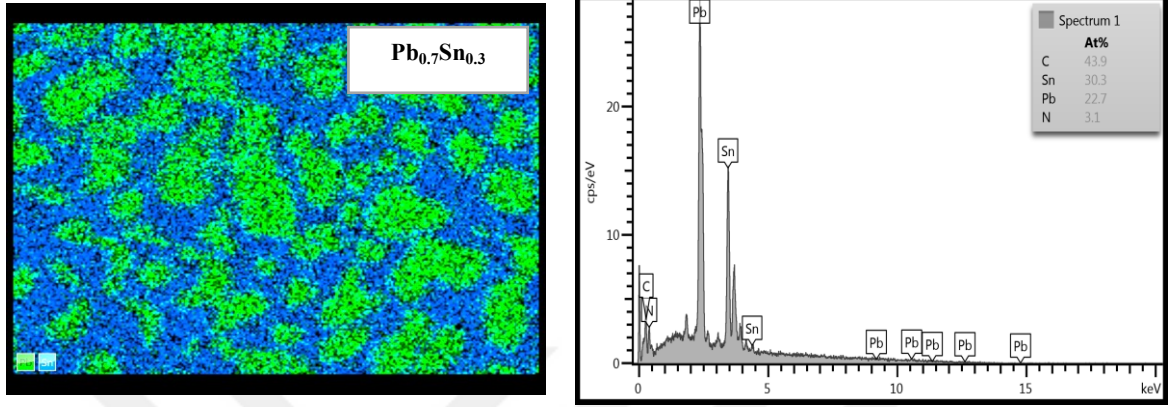
$Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ lehim alaşımına ait SEM/EDX spektrumları ve EDX haritalama görüntüsü Şekil 27’de gösterilmektedir.



Şekil 27. $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

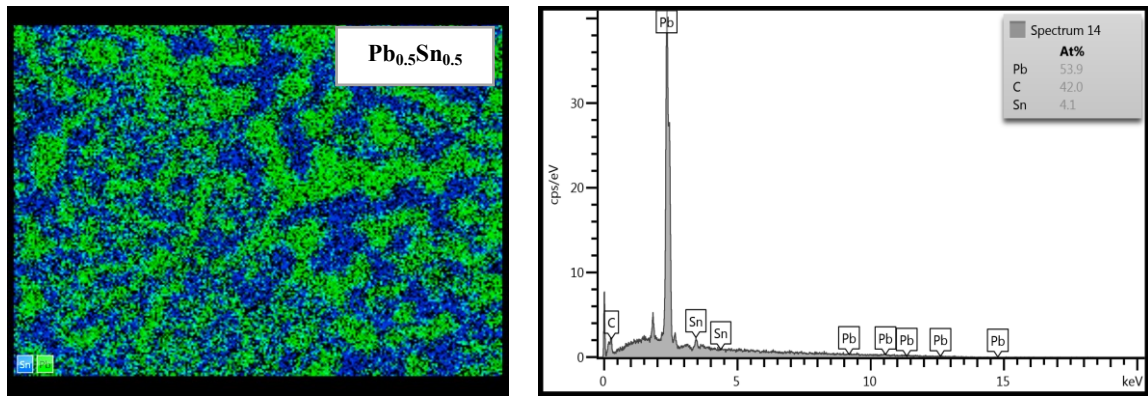
Görüntüde homojen bir yüzey dağılımı görünmekte ve ağır element olan Pb, Bi geri saçılan elektronların görüntüsü nedeniyle daha parlak renktedir. Yeşil alan Pb, mavi alan Bi elementini temsil etmektedir. Farklı alanlarda EDX spektrumunda birçok keskin pik mevcut ve piklerin yüksekliği, keskinliği lehim alaşım numunesinin kristal yapıda olduğu amorf yani düzensiz bir faz içermediğinin göstergesidir. Karbon ve potasyum elementinin

varlığının olması numune hazırlanması sırasında ortamda bulunan organik bir maddenin kalıntısından, oksijen elementinin varlığı yüzeyde meydana gelen oksitlenmeden ve çok düşük miktarda arsenik olması ise muhtemelen kirlilikten kaynaklı olabilir.



Şekil 28. $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

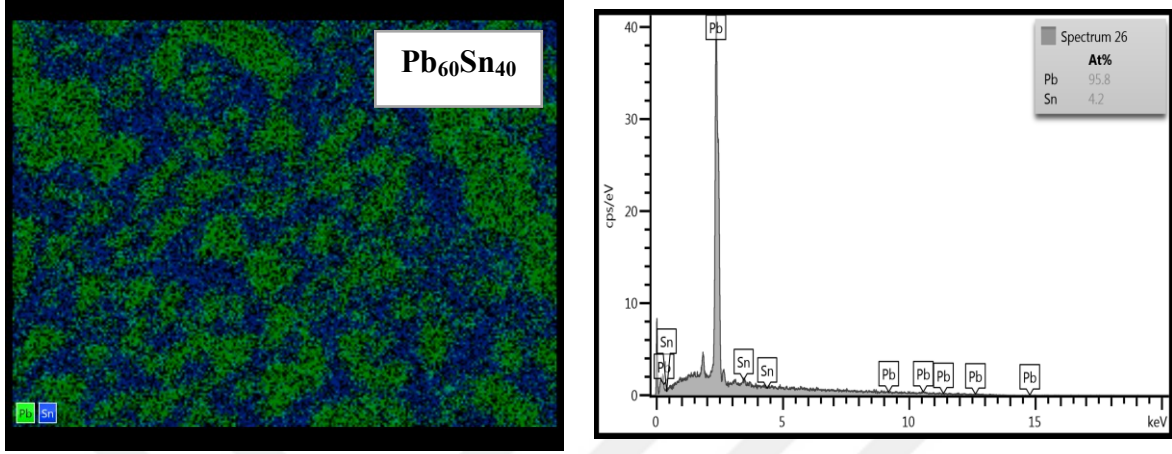
Şekil 28’de $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$ lehim alaşımının SEM/EDX spektrumları ve EDX haritalama görüntüsü gösterilmektedir. Yeşil renk Pb, mavi renk kalay elementini temsil etmekte, her iki elementte yüzeye homojen olarak dağılmıştır. EDX spektrumunda yüzeyde Sn, Pb dışında karbon (C), azot (N) bulunmakta, bunların varlığı numune hazırlama sırasında kirlenmeden kaynaklı olabilir. Spektrum üzerinde keskin piklerin yer alması numunenin kristal ve oldukça düzenli yapıda olduğunu göstermektedir.



Şekil 29. $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

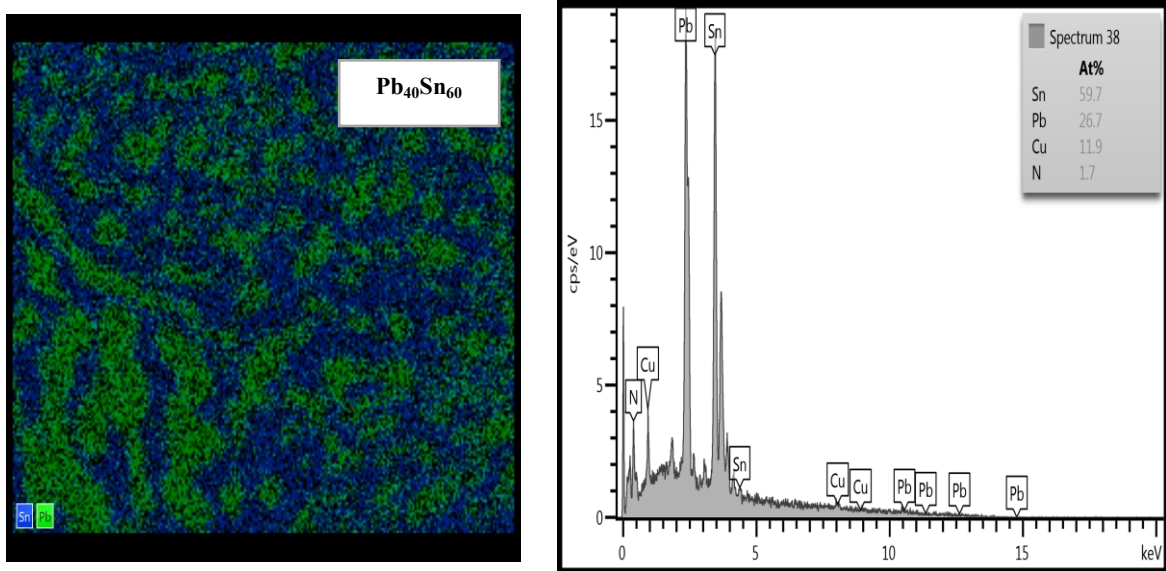
$Pb_{0.5}Sn_{0.5}$ lehim alaşım numunesinin SEM/EDX spektrumları ve EDX haritama görüntüsü Şekil 29’da gösterilmektedir. Yeşil renk Pb, mavi renk Sn elementlerini temsil etmektedir. Pb elementinin Sn elementine göre yüzeyde daha yoğun bir şekilde heterojen

olarak dağıldığı görülmektedir. Numune yüzeyinde diğer karbon ve azot elementinin varlığı numune hazırlama aşamasında ortamda bulunan malzemelerden kaynaklı olabilir.



Şekil 30. $Pb_{60}Sn_{40}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

Şekil 30'da $Pb_{60}Sn_{40}$ numunesinin SEM/EDX görüntüsünde yeşil renk Pb elementini, mavi renk Sn elementini göstermekte ve dağılımın homojen olduğu görülmektedir. EDX spektrumunun geniş tepe pikine sahip olması bu numunenin düşük kristalliteye sahip olduğu söylenebilir.

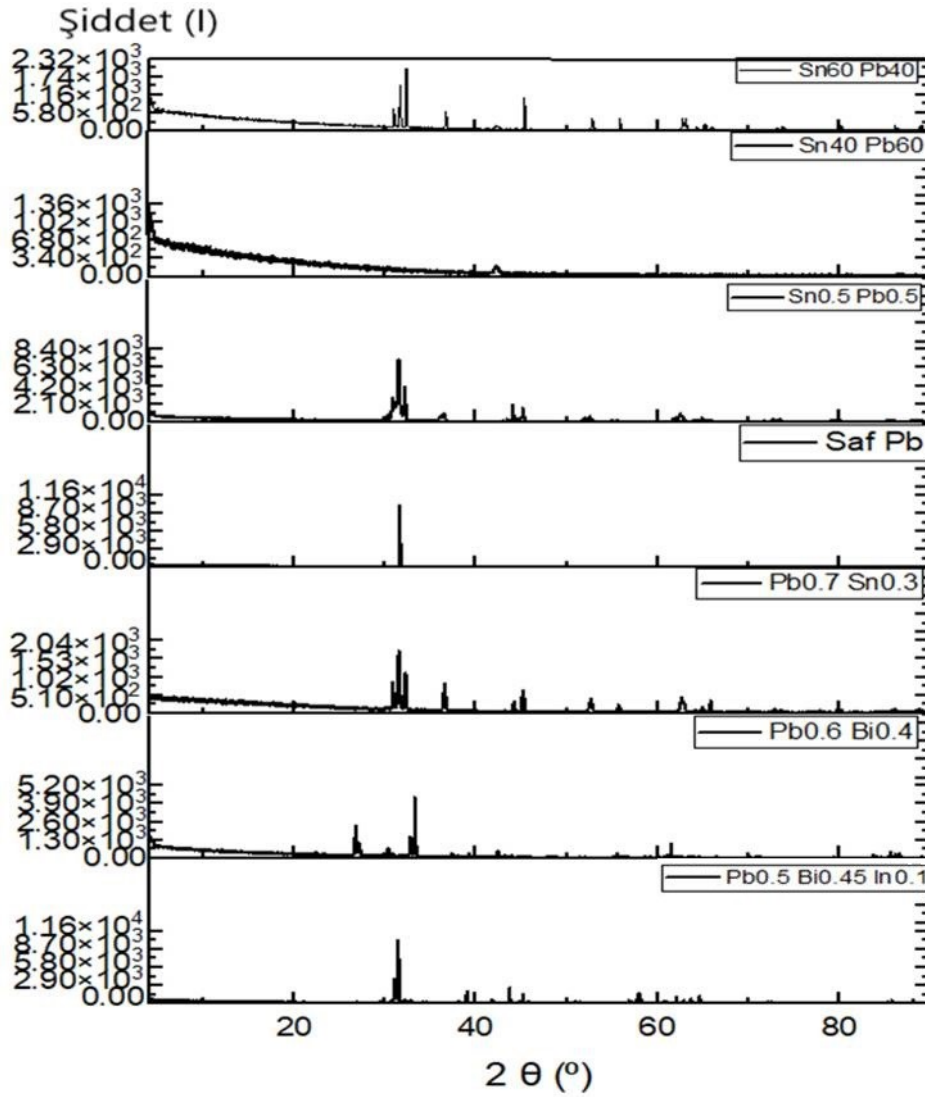


Şekil 31. $Pb_{40}Sn_{60}$ numunesinin EDX haritalama görüntüsü ve spektrumu

Şekil 31'de $Pb_{40}Sn_{60}$ numunesine ait SEM/EDX spektrumları ve EDX haritalama görüntüsü gösterilmekte yeşil alanlar Pb, mavi alanlar Sn elementinin bulunduğu bölgeleri

temsil etmektedir. Pb ve Sn elementi yüzeyde heterojen bir dağılım gösterdiği, bazı bölgelerde Pb elementinin ağırlıkta olduğu bazı bölgelerde de Sn elementinin ağırlıkta olduğu görülmektedir. Spektrumda Cu elementinin varlığı muhtemelen yüzey temasından kaynaklı olabilir. EDX spektrumunda keskin piklerin olması numunenin kristal yapıda olduğu söylenebilir.

Her bir lehim numune alaşımlarının her birinin Origin programında XRD grafiği çizilmiştir. Şekil 32’de de lehim numune alaşımlarının XRD grafiği gösterilmektedir.



Şekil 32. Tüm lehim numune alaşımları için XRD grafiği

4. SONUÇLAR

Teknolojinin gelişmesi, uzay araştırmaları, nükleer reaktörler, tıpta teşhis ve tedavi gibi amaçlarla kullanılan radyasyonun insan sağlığı üzerinde bazı olumsuz etkileri meydana gelmektedir. Radyasyondan korunmak için, radyasyonla geçirilen zamanın kısa tutulması, radyasyon kaynağı arasındaki mesafenin artırılması vücuda alınan radyasyon miktarını azaltma yönünde etkili olmakla birlikte yeterli değildir. Radyasyonun olumsuz etkilerini minimum düzeye indirecek en etkili yol yüksek atom numarası ve yüksek yoğunluğa sahip zırh malzemeleri kullanmaktır. Bu nedenle zırhlama malzemesi olarak lehim alaşımlar tercih edilmektedir. Lehim alaşımlara kurşun elementi takviyesi yapıldığında, süperiletken lehim alaşımların fiziksel, manyetik ve elektriksel özellikleri artırarak, radyasyon kullanılan sistemlerde radyasyonu azaltma eğilimine sahip olmaktadır. En iyi zırhlama malzemesinin seçiminde en yüksek LAC ve MAC değerinin yüksek olması; HVL, TVL, MFP gibi zırhlama parametrelerinin düşük olması gerekmektedir.

Bu çalışmada da farklı oranlarda olan Pb elementinin Sn, Bi, In elementleri ile birleştirilerek yedi farklı lehim alaşımları üretildi, bu alaşımların radyasyon zırhlama parametreleri olan lineer soğurma katsayısı (LAC), kütle soğurma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onda bir değer kalınlığı (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) sayısal olarak değerleri ve yapısal analizleri incelenmiştir. ^{241}Am , ^{60}Co ve ^{137}Cs olmak üzere farklı radyoaktif kullanılarak elde edilen deneysel ve Phy-X/PSD yazılımı ile hesaplanan teorik verilerin karşılaştırılması, iki veri arasındaki hata oranları Tablo 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 da verilmiştir.

Tablo 5'te üretilen lehim alaşım numunelerinin elde edilen LAC sonuçlarının deneysel ve teorik arasındaki hata oranı %1 ile %17 aralığında olduğu görülmektedir. Düşük enerjilerde ^{241}Am radyoaktif kaynağına karşı atom numarası yüksek olan saf Pb elementinde fotoelektrik soğurma daha baskındır. Zırhlama etkisi saf kurşunda fazla, özellikle düşük ve orta enerji seviyelerinde $\text{Pb}_{0.6}\text{Bi}_{0.4}$ alaşımı tüm enerji seviyelerinde zırhlama özelliği yüksek olduğu gözlenmiştir.

Tablo 6'da üretilen lehim alaşım numuneleri için elde edilen deneysel ve teorik MAC değerleri arasındaki hata %0 ile %17 aralığında olduğu görülmektedir. Düşük enerjili fotonlara karşı en yüksek MAC değeri $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ lehim alaşımı, yüksek enerjili

fotonlara karşı $Pb_{0.7}Sn_{0.3}$ lehim alaşımı, orta enerjili fotonlara karşı ise $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ lehim alaşımı etkilidir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde geniş bir enerji aralığında $Pb_{0.5}Sn_{0.5}$ alaşımı uygun aday olarak değerlendirilebilir.

Tablo 7’de üretilen lehim alaşım numunelerinin elde edilen HVL sonuçlarının deneysel ve teorik arasındaki hata %0 ile %14 aralığında olduğu görülmektedir. Tablo incelendiğinde tüm radyoaktif kaynaklarına karşı iyi bir zırhlama malzemesi olarak $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ lehim alaşımı göze çarpmaktadır. $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ lehim alaşımı; ^{241}Am radyoaktif kaynağına karşı 0.013 cm ile HVL değeri oldukça yüksek bir etkiye, ^{60}Co radyoaktif kaynağına karşı 0.977 cm değeri teorik değerinden daha az olduğundan yüksek enerjide daha etkili olabileceği, ^{137}Cs radyoaktif kaynağına karşı makul seviyede bir zırhlama etkisi gösterdiği gözlenmektedir.

Tablo 8’de üretilen lehim alaşım numunelerinin elde edilen TVL sonuçlarının deneysel ve teorik arasındaki hata %1 ile %14 aralığında olduğu görülmektedir. Tüm radyoaktif kaynaklar için en düşük TVL değerine sahiptir. Bi katkılı lehim alaşımları radyasyon etkisini azalttığı görülürken, Sn katkılı lehim alaşımlarının radyasyonu azaltmada Bi lehimlerine oranla daha az katkı sağlamakta olduğu görülmektedir.

Tablo 9’da üretilen lehim alaşım numunelerinin elde edilen MFP sonuçlarının deneysel ve teorik arasındaki hata %0 ile %14 aralığında olduğu görülmektedir. Deneysel ve teorik verilerin birbirleriyle uyumlu olması yanında saf kurşun orta enerjili ^{137}Cs radyoaktif kaynağına karşı en düşük MFP değerine sahip olduğu, yüksek enerjili ^{60}Co radyoaktif kaynağına karşı Bi katkılı $Pb_{0.6}Bi_{0.4}$ lehim alaşımının radyasyon zırhlamada daha etkili olduğu ve bazı alaşımlarda Sn oranının atmasıyla radyasyon zırhlama yeteneğinin azaldığı gözlenmektedir.

Tablo 10’da üretilen lehim alaşım numunelerinin elde edilen Z_{eff} sonuçlarının deneysel ve teorik arasındaki hata %0 ile %7 aralığında olduğu görülmektedir. Phy-X/PSD yazılımında hesaplanan Z_{eff} teorik değerleri ile deneysel Z_{eff} değerleri genel manada uyumludur. Ancak yüksek miktarda Sn içeren lehim alaşımlarında teorik verilerin deneysel verilere göre biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Bi ve In katkılı lehim alaşımları yüksek Z_{eff} değeri sağlar, ancak Sn içeriği artan lehim alaşımlarında Z_{eff} değerinde düşmeye neden olduğu gözlenmektedir.

SEM analizlileri incelendiğinde, genel olarak tüm numune alaşımlarında elementlerin hemen hemen çoğu homojen dağılım gösterdiği, bunun dışında numunelerin yüzeyinde Pb, Sn, In, Bi haricinde karbon, azot ve arsenik gözlenmiştir. Bu tür

elementlerin lehim numune alaşımlarında bulunmasının nedeni numune hazırlık sürecinde ortamdan kaynaklı meydana geldiği söylenebilir.

Çalışmada yer alan tüm numuneler için ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs kaynaklarına karşı LAC, MAC, HVL, TVL, MFP, Z_{eff} parametrelerinin deneysel ve teorik veriler karşılaştırıldığında genelde birbirleriyle uyumlu olduğu ancak bazı numunelerde deneysel verilerin teorik verilerden küçük veya yüksek farklılar olduğu görülmektedir. Bu sapmaların numunelerin homojenliğinden, geometrisinden, dedektör kalibrasyonundan, safsızlıklarından ve deney yapılan ortamından kaynaklı olabilir.



5. ÖNERİLER

Bu çalışmada saf Pb ve Pb ile Bi, In ve Sn elementlerinin birleştirilerek oluşturulan lehim alaşımlarının zırlama etkilerinin deneysel ve teorik karşılaştırılması yapılarak radyasyon zırlaması için iyi olan malzeme belirlenmesi amaçlanmıştır.

^{241}Am , ^{60}Co ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarına karşı yüksek atom numarasına ve yüksek yoğunluğa sahip saf kurşun elementinin radyasyonu soğurma etkisi yüksektir. Ancak toksit bir etkisi mevcuttur. Bu yüzden zırlama malzemesi olarak farklı oranlarda kurşun ile farklı oranlarda birleştirilmiş atom numarası yüksek, toksit özelliği az olan Bi elementi ile oluşturulan Pb-Bi lehim alaşımı alternatif olarak düşünülebilir. Sn katkılı lehim alaşımları düşük soğurma katsayısına sahip olmasına rağmen esnek yapısından dolayı mekanik dayanım açısından tercih edilebilir. In katkılı lehim alaşımlar mekanik dayanım, kolay şekillendirebilme ve toksit özelliği düşürmede kullanılması faydalı olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Aksoy, C. (2012). Bazı Elementler ve Bileşiklerinin Floresans Parametreleri ve Feysel-Xtex Süperiletken İnce Filmlerin Yapısal Analizi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Aksoy, C. (2021). The Shielding Parameters of the Superconducting Tin Based Solders. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 8(3), s. 1529-1535.
- Aksoy, C. (2021). The X-Ray Fluorescence Parameters and Radiation Shielding Efficiency of Silver Doped Superconducting Alloys. Radiation Physics and Chemistry, 186(109543). doi:<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109543>
- Aksoy, C., Dizman, S., Çakır, B., Koparan, E. T., & Tıraşoğlu, E. (2021). The Radiation Shielding Properties of the Low Temperature Alloys. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21 (2021)(051101), s. 1022-1026. doi:10.35414/akufemubid.977219
- Akyıldırım, H. (2011). Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
- Alfantazi, A. M., & Moskalyk, R. R. (2003). Processing of indium: a review. Minerals Engineering, 16 (2003), s. 687-694.
- Apaydın, G. (2002). $69 \leq Z \leq 92$ Bölgesindeki Bazı Elementlerin M Kabuğuna Ait Tesir Kesitlerinin, Ortalama Floresans Verimlerinin ve Diferansiyel Tesir Kesitlerinin Ölçülmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Apaydın, G. (2006). $65 \leq Z \leq 92$ Bölgesinde Bazı Elementlerin K ve L X-Işını Floresans Parametrelerinin Ölçülmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bashter, I. I. (1997). Calculation of Radiation Attenuation Coefficients for Shielding Concretes. Ann. Nucl. Energy, 24(17), s. 1389-1401.
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolf, H. (2006). Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. Berlin, Germany.
- Binici, H., Küçükönder, A., Sevinç, A. H., Eken, M., & Kara, M. (2013). Hafif ve Ağır Malzemelerin Isı, Ses ve Radyasyon Yalıtım Özelliklerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2(28), s. 113-123.
- Cafferty, K. G. (2010). Application of Bayesian and Geostatistical Modeling to the Environmental Monitoring of Cs-137 at the Idaho National Laboratory.

- Chen, Y., & Yan, B. H. (2023). The technology of shielding design for nuclear reactor: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 161 (2023)(104741), s. 1-12.
- Çimen, B., Erdoğan, M., & Oğul, R. (2017). İyonlaştırıcı Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 2(43), s. 139-147.
- Çoşkun, Ö. (2011). İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), s. 13-17.
- Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-ray Diffraction*, Second Edition. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, s. 13-15.
- Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-Ray Diffraction*, Second Edition. London, ABD: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Eisberg, R. (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Fatimah, S., Ragadhita, R., Husaeni, D. F., & Nandiyanto, A. B. (2022). How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 2(1), s. 65-76.
- Gerward, L. (1999). Paul Villard and his Discovery of Gamma Rays. *Physics in Perspective*, 1 (1999), s. 367-383.
- Iwahara, A., Silva, M. A., Filho, A. E., Bernardes, E. M., & Delgado, J. U. (2005). Determination of disintegration rates and γ -Ray Emission Probabilities of 65-Zn and 241-Am. *Applied Radiation and Isotopes*, 63 (2005), s. 107-113.
- Johns, H. E., & Cunningham, J. R. (1983). *The Physics of Radiology*, Fourth Edition. U.S.A.: Charles C Thomas.
- Kamışlıoğlu, M. (2021). Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters. *Result in Physics*, 22 (2021), s. 2211-3797. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.103844>
- Kaur, T., Sharmab, J., & Singh, T. (2019). Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing. *Progress in Nuclear Energy*, 113 (2019), s. 95-113.
- Knoll, G. F. (1999). *Radiation Detection and Measurement*, Third Edition. New York, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Majeed, E. I., Najam, L. A., Hamood, M. A., & Mahmoud, K. A. (2025). A Comprehensive study on the γ -ray shielding performance of Al-Cu-PbO alloy: Experimental and simulation studies. *Nuclear Engineering and Technology*, 57 (2025)(103124), s. 1-7.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., & Gerward, L. (2008). On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 266, s. 3906-3912.

- Matsumoto, W. Y. (1965). Evaluation of the Accuracy of Decay Scheme Constants and Calibration Standards for Cesium-137. Washington: Pacific Northwest Laboratory Richland.
- Ojebuoboh, F. K. (1992). Bismuth-Production, Properties, and Applications. Review of Extractive Metallurgy, s. 46-49.
- Patton, D. D. (1999). How Cesium-137 Was Discovered by an Undergraduate Student. 40(4).
- Preoteasa, E. A., Preoteasa, E., & Suciu, I. (2012). Atomik and Nuclear Surface Analysis Methods: A Novel Perspective for the Characterization of Dental Composites. New York: Dental Science, Materials and Technology, Nova Science Publishers.
- 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).
- Sarı, S., & Dizman, S. (2020). Ovit Dağbaşı Gölü Çevresinden Alınan Toprak Örneklerinde Radyoaktivite ve Radyolojik Etkilerin Araştırılması. El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 7(3), s. 1122-1130.
- Sathisha, K., Manjunatha, H., Vidyac, Y., Sankarshand, B., Guptaa, P. D., Seenappaa, L., . . . Raj, A. C. (2021). Investigation on shielding properties of lead based alloys. Progress in Nuclear Energy, 137 (2021)(103788), s. 1-9.
- Sternbach, G., MD, F., Varon, J., & MD, F. (1993). Wilhelm Konrad Roentgen: A new Kind of Rays. The Journal of Emergency Medicine, 11, s. 743-745.
- Sürücü, A. M., & Subaşı, S. (2021). Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(1), s. 182-194. doi:DOI:10.31202/ecjse.812372
- Tıraşoğlu, E. (1990). Toz Halindeki numunelerde XRF tekniği ile Konsantrasyon Tayininde Parçacık Büyüklüğünün Etkisi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Tıraşoğlu, E. (1994). Enerji Dispersiv X-Işını Floresans Analizinde Şiddetlendirme Etkisi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Tsoufanidis, N. (1995). Measurement and Detection of Radiation, Second Edition, Taylor & Francis. London, U.K.
- Türkkan, A., & Pala, K. (2009). Çok Düşük Frekanslı Elektromanyetik Radyasyon Ve Sağlık Etkileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2).
- Tüysüz, B., & Dizman, S. (2022). Bazı Seramiklerin Düşük Enerjili Gamalar için Radyasyon Soğurma Kapasitelerinin Belirlenmesi. El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 9(2), s. 522-531.

- URL-1. (2025, Nisan 05). https://www.researchgate.net/figure/Photoelectric-effect_fig5_355263735 adresinden alındı
- URL-2. (2025, Nisan 11). <https://merlab.metu.edu.tr/tr/system/files/Belgeler/TanitimBrosurleri/XRDL.pdf> adresinden alındı
- URL-3. (2025, Nisan 05). <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/3/183> adresinden alındı
- URL-4. (2025, Nisan 05). <https://radiologykey.com/x-ray-imaging-fundamentals/> adresinden alındı
- URL-5. (2025, Nisan 05). https://www.creatis.insa-lyon.fr/~letang/x-ray-book/_images/interactionCompton.jpg adresinden alındı
- URL-6. (2025, Nisan 15). <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyondan-korunmada-temel-prensip?v=1.0.24> adresinden alındı
- URL-7. (2025, Nisan 01). <https://www.afad.gov.tr/kbrn/icsel-ve-dissal-radyasyondan-korunma> adresinden alındı
- URL-8. (2024, Ekim 20). <https://ayansan.com/rohs-belgesi/> adresinden alındı
- URL-9. (2025, Nisan 13). https://www.researchgate.net/figure/llustration-to-Beer-lamberts-law_fig2_323077652 adresinden alındı
- Uzun, A. S. (2021). Radyasyonun ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Kurşunun İnsan Sağlığına Etkileri Üzerine Bir Araştırma. Dünya Sağlık ve Tabiat Bilimleri Dergisi, DÜSTAD, 4(2), s. 65-74.
- Winberg, M. R., & Garcia, R. S. (1995). National Low-Level Waste Management Program Radionuclide Report Series. DOE/LLW-130, 14, s. 1-20.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul ve ortaokulu öğrenimini Of'ta, lise öğrenimini Bursa ili Mudanya ilçesinde tamamladı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde öğrenim hayatına hazırlık sınıfından başlayarak 2015 yılında mezun oldu. Millî Eğitim Bakanlığı'na bağlı devlet kurumlarında Fizik öğretmeni olarak ücretli öğretmenlik yaptı. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans programına başladı. Şu an Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans programına devam etmekte, orta derecede İngilizce bilmektedir.

