

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Fe-FeB-Cu-C İÇEREN MALZEMELERDE GAMA
RADYASYON ZIRHLAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuana GEL

Fizik Anabilim Dalı

HAZİRAN 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Fe-FeB-Cu-C İÇEREN MALZEMELERDE GAMA
RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuana GEL

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emre TABAR

HAZİRAN 2025

Tuana GEL tarafından hazırlanan “Fe-FeB-Cu-C İÇEREN MALZEMELERDE GAMA RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI ” adlı tez çalışması 18.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç. Dr. Emre TABAR (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Betül USTA**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer DEMİRCİ SAYGI**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Fe-FeB-Cu-C İçeren Malzemelerde Gama Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(18.06.2025)

Tuana GEL





Aileme...



TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi çalışmasını tamamlamama katkı sağlayan, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, bilimsel düşünce yapımı geliştirmemde büyük rol oynayan değerli tez danışmanım Doç. Dr. Emre TABAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında bana yardımcı olan Dr. Gamze HOŞGÖR göstermiş olduğu sabır, anlayış ve rehberlik ile bana büyük destek sağlamıştır. Kendisinin bilimsel bakış açısı ve araştırmacı kişiliği, bu sürecin en verimli şekilde ilerlemesine önemli katkılarda bulunmuştur. Kendisine bu yolda bana olan katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Araştırmamın temelini oluşturan malzemelerin üretilmesinde bana yardımcı olan Dr. Mesut Ramazan EKİCİ hocama deneysel süreçlerde sırasında göstermiş oldukları anlayış ve yardımları için minnettarım.

Bu süreç boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, en zor anlarımda bile yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Özellikle sabrıyla, anlayışıyla ve sınırsız sevgisiyle bana güç veren anneme ve babama; her zaman yanımda hissettiğim kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım. Onların desteği olmasaydı, bu zorlu süreci başarıyla tamamlamak çok daha güç olurdu.

Hayatımın her anında bana moral ve motivasyon kaynağı olan, güzel anılar biriktirdiğim ve zor zamanlarımda desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Zehra OKTAR ve Oğuz ÇELENK'e de ayrıca teşekkür ederim. Varlıklarıyla bu süreci daha anlamlı ve katlanılabilir hale getirdiler.

Numunelerin FEG-SEM ve Raman Spektroskopisi'nin alınmasında emekleri için Sayın Öğr. Gör. Dr. Özlem GÜLDALİ'ya, XRD analizleri için ise Sayın Öğr. Gör. Fuat KAYIŞ'a teşekkür ederim.

Bu çalışmamda maddi olarak destek sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (Proje No:2024-26-62-17) destekleri için teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak, bu akademik yolculukta tanışma fırsatı bulduğum ve bana yeni ufuklar kazandıran tüm hocalarıma ve katkıda bulunan herkese teşekkür eder; bundan sonraki yaşamımda edindiğim tüm bu birikim ve tecrübeleri en iyi şekilde değerlendirmeyi temenni ederim.

Tuana GEL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	3
2. ÇEKİRDEK VE ÖZELLİKLERİ	5
2.1. Radyoaktif Çekirdek ve Radyoaktivite	6
2.2. Radyasyon	7
2.2.1. Radyasyon Türleri	8
2.2.1.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	8
B. Dalga tipi radyasyon	12
2.2.1.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon	15
2.3. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	16
2.3.1. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	16
2.3.1.1. Fotoelektrik olay	17
2.3.1.2. Compton saçılması	18
2.3.1.3. Çift oluşumu	19
2.4. Radyasyon Kaynakları	20
2.4.1. Doğal radyasyon	20
2.4.1.1. Kozmik radyasyon	21
2.4.1.2. Karasal radyasyon	22
2.4.1.3. İç radyasyon	22
2.4.2. Yapay radyasyon	22
2.5. Radyasyon Ölçümü	23
2.5.1. Radyasyon birimleri	23
2.5.2. Radyasyon ölçüm mekanizmaları	24
2.5.2.1. Gaz doldurulmuş dedektörler (iyonizasyon dedektörü)	24
2.5.2.2. Sintilasyon dedektörü	26
2.5.2.3. Yarı İletken dedektörleri	28
2.6. Radyasyonun Biyolojik Etkileri	29
2.7. Radyasyondan Korunma	30
2.7.1. Zaman kuralı	30
2.7.2. Mesafe kuralı	31
2.7.3. Zırhlama kuralı	31
3. YÖNTEM VE TEKNİKLER	33

3.1. Toz Metalurjisi (PM).....	33
3.1.1. FeB bazlı alaşımların toz metalurjisiyle üretimi	34
3.2. Mikroyapı İnceleme Teknikleri.....	35
3.2.1. X-ışını difraktometresi	35
3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	37
3.2.3. Raman Spektroskopisi.....	39
3.3. Gama Zırlama Özellikleri.....	40
3.3.1. Talyum Katkılı Sodyum İyodür (NaI (Tl)) dedektörü	40
3.3.2. Malzemelerin gama radyasyon zayıflama parametreleri	43
4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR.....	45
4.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları	45
4.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FEG-SEM) ve Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektroskopisi (EDS) Analiz Sonuçları	47
4.3. Raman Spektroskopisi Analiz Sonuçları	55
4.4. Gama Zırlama Özelliklerinin Belirlenmesi	57
5. GENEL SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR

PM	: Toz Metalurjisi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
FEG-SEM	: Alan Yayılımlı Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
XRD	: X-ışını Kırınımı
MAC	: Kütle Azaltma Katsayısı
LAC	: Lineer Azaltma Katsayısı
HVL	: Yarı Değer Kalınlığı
TVL	: Ondalık Değer Kalınlığı
MFP	: Ortalama Serbest Yol
MeV	: Mega Elektron Volt
NaI(Tl)	: Talyum Katkılı Sodyum İyodür
Cu	: Bakır
FeB	: Demir Borür



SİMGELER

I	: Malzemeden Geçen Radyasyon Şiddeti
I₀	: Malzemeye Gelen Başlangıç Radyasyon Şiddeti
x	: Soğurucu Malzeme Kalınlığı [m]
t	: Zaman [s]
μ/ρ	: Kütle Azaltma Katsayısı [cm^2/g]
N	: Birim Hacimdeki Atom/Molekül Sayısı
λ	: Ortalama Serbest Yol
ρ	: Malzemenin Yoğunluğu [g/cm^3]
μ	: Lineer Azaltma Katsayısı [cm^{-1}]
E	: Foton Enerjisi [MeV]
σ	: Etkileşim Kesiti



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Radyasyon Türleri (Tanır, 2013).	8
Tablo 2.4. Radyasyon dozu birimleri dönüşüm tablosu (Tanır, 2013).....	23
Tablo 2.5. Radyasyonun deterministik ve stokastik etkileri (TAEK, 2017).	29
Tablo 3.1. Numunelerin içerikleri ve yoğunlukları.	34
Tablo 4.1. Deneysel ve teorik MAC Değerleri.....	57
Tablo 4.2. Deneysel ölçümler sonucu belirlenen LAC, HVL, TVL ve MFP değerleri.	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Çekirdek kararlılığının nötron ve protona bağlılığı (Knoll, 2010).	6
Şekil 2.2. ^{238}U radyoaktif bozunma serisi şematik gösterimi (Ayotte vd, 2007).	7
Şekil 2.3. ^{226}Ra çekirdeği alfa bozunması yaparak ^{222}Rn çekirdeğine dönüşür (Lilley, 2001).	9
Şekil 2.4. (a) ^{27}Mg çekirdeği β^- bozunması yaparak ^{27}Al çekirdeğine, (b) ^{13}N çekirdeği β^+ bozunması yaparak ^{13}C çekirdeğine dönüşüyor (Lilley, 2001).	11
Şekil 2.5. Elektron Yakalanması olayı (Krane, 2019).	12
Şekil 2.6. Elektromanyetik spektrumun dalga boyu ve enerji aralığı.	13
Şekil 2.7. Gama Bozunumu (Lilley, 2001).	13
Şekil 2.8. Alfa (α -), beta (β -) ve gama (γ -) ışınlarının farklı malzemeler üzerindeki geçirgenlikleri (Knoll, 2010).	16
Şekil 2.9. Fotoelektrik olay.	18
Şekil 2.10. Compton Saçılması (Beiser, 2003).	19
Şekil 2.11. Çift oluşumu (Knoll, 2010).	20
Şekil 2.12. Radyasyon kaynakları (Afad, 2025).	20
Şekil 2.13. Geiger-Müller Sayacı.	26
Şekil 2.14. Sintilasyon Dedektörü (Tabar, 2025).	28
Şekil 2.15. Radyasyondan Korunma Yolları (Knoll, 2010).	30
Şekil 3.1. Toz metalurjisi kullanarak numune üretimi.	35
Şekil 3.2. Üretilen Fe ve FeB katkılı malzemeler. En üstte (2,5x2,5x1,65) cm ölçülerde bakalit kaplı hali, ortada (1,61x1,59x0,37) cm ölçülerde soğuk presli hali, en altta (1,0x1,0x0,9)cm ölçülerde soğuk presli hali.	35
Şekil 3.3. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Rigaku D-Max 2100 PC Model Difraktometre Cihazı.	37
Şekil 3.4. Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM)'nde bulunan Quanta FEG-450 Model FEG-SEM cihazı.	39
Şekil 3.5. Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan RAMANRXN1 Mikroprob cihazı.	40
Şekil 3.6. Sintilatör ve foto-çoğaltıcı tüp (PMT) içeren dedeksiyon sisteminin şematik gösterimi (Kerlin ve Upadhyaya, 2019).	41
Şekil 3.7. NaI (Tl) dedektörü ve foto-çoğaltıcı tüp tabanı.	42
Şekil 3.8. Gama zırhlama özelliklerini belirlemek için kullanılan deneysel düzenek (Ekici, 2024).	42
Şekil 3.9. Azalma işlemleri ile foton demetinin değişimi (Tanır, 2013).	43
Şekil 4.1. Tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin XRD analiz sonuçları. ...	45
Şekil 4.2. A Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 μm , (b) 5 μm ve (c) 3 μm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 μm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmeye EDS alanları gösterilmektedir.	48

Şekil 4.3. A numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.2.(d)'de gösterilmiştir.....	49
Şekil 4.4. B Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.	50
Şekil 4.5. B Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.4.(d)'de gösterilmiştir.....	51
Şekil 4.6. C Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.	52
Şekil 4.7. C Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.6.(d)'de gösterilmiştir.....	53
Şekil 4.8. D Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.	54
Şekil 4.9. D Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.8.(d)'de gösterilmiştir.....	55
Şekil 4.10. Raman spektroskopisi ile numunelerin yapısal incelemesi.	56
Şekil 4.11. Dört farklı malzemenin 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerindeki LAC değerleri.....	59
Şekil 4.12. Deneysel HVL, TVL ve MFP grafikleri.....	61
Şekil 4.13. 1,173 MeV için tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin deneysel olarak belirlenen LAC değerleri (açık mavi), farklı Fe bazlı alaşımların ve kurşun ile betonun LAC değerleriyle (koyu mavi) karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.14. 1,332 MeV için tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin deneysel olarak belirlenen LAC değerleri (açık mavi), farklı Fe bazlı alaşımların ve kurşun ile betonun LAC değerleriyle (koyu mavi) karşılaştırılması.....	63

Fe-FeB-Cu-C İÇEREN MALZEMELERDE GAMA ZIRHLAMA RADYASYON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi (Powder Metallurgy-PM) yöntemi ile farklı oranlarda Fe, FeB, Cu ve C içeren kompozit malzemeler üretilmiş, bu malzemelerin mikroyapısal özellikleri ile gama zırhlama performansları detaylı olarak araştırılmıştır. Mikroyapısal analizlerde X-ışını difraktometresi (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FEG-SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) ve Raman spektroskopisi; gama zırhlama özelliklerinin belirlenmesinde ise NaI(Tl) dedektörü ve ^{60}Co nokta kaynağı kullanılmıştır.

FEG-SEM görüntülerinde tüm numunelerin farklı bölgelerinde morfolojik düzensizlikler ve belirgin çatlak oluşumları dikkat çekmiştir. XRD analizlerinde numunelerin tamamında $2\theta \approx 44^\circ$ civarında yoğun bir pik gözlemlenmiştir ve bu pik Fe'nin (110) düzlemine karşılık gelmektedir. Ayrıca $2\theta \approx 64^\circ$ ve 82° civarlarında Fe'nin (200) ve (211) düzlemleri ile ilişkili diğer karakteristik pike de rastlanmıştır. Raman analizleri sonucunda tüm numunelerde 1350 cm^{-1} (D bandı) ve 1580 cm^{-1} (G bandı) civarında iki temel pik belirlenmiştir. D bandının yüksekliği yapıda düzensizliğe ve amorf karbon içeriğine işaret etmektedir.

Gama zırhlama karakterizasyonu kapsamında lineer azaltma katsayısı (LAC), kütleli zayıflatma katsayısı (MAC), yarı değerlik kalınlığı (HVL), ondalık değerlik kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) parametreleri 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjiye sahip gama fotonları için belirlenmiştir. Elde edilen deneysel MAC değerleri, XCOM veri tabanı kullanılarak hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılmış ve genel olarak %14'ün altında hata oranları elde edilmiştir. En düşük hata %1,35 ile C numunesinin 1,332 MeV enerjisindeki MAC değeri için, en yüksek hata ise %13,89 ile A numunesinde bulunmuştur. A numunesi, her iki enerji seviyesinde de en yüksek MAC ve LAC değerlerine, buna karşılık en düşük HVL, TVL ve MFP değerlerine sahiptir. Bu özellikler A numunesinin gama ışınlarını diğer numunelere kıyasla daha etkin bir şekilde zayıflatabildiğini ortaya koymaktadır. D numunesi ise benzer şekilde yüksek zayıflatma kapasitesi göstermiş ve A numunesinin ardından ikinci sırada yer almıştır. Sonuç olarak, çatlak oluşumu gibi bazı yapısal dezavantajlara rağmen, özellikle yüksek korozyon direnci ve termal kararlılığı sayesinde bu tür FeB, Cu ve C katkılı malzemeler belirli gama zırhlama uygulamalarında potansiyel adaylar olabilir.



INVESTIGATION OF GAMMA RADIATION SHIELDING PROPERTIES OF Fe-FeB-Cu-C CONTAINING MATERIALS

SUMMARY

In recent years, the need for alternative materials in radiation shielding has driven researchers to focus on iron-based composites modified with elements like boron, copper, and carbon. These elements are known to influence key physical and chemical properties. For instance, boron increases the hardness and thermal resistance of the structure through the formation of borides. Copper is commonly used to enhance corrosion resistance, while carbon significantly strengthens the material and contributes to phase development. Despite these advantages, such additions can also introduce microstructural inhomogeneity and internal stresses, which may compromise the overall mechanical performance.

This thesis presents a study on Fe-based composites produced via the powder metallurgy technique, focusing on their microstructure and gamma radiation shielding behavior. Four different samples were prepared: Sample A was composed of pure iron; Sample B contained 50% Fe and 50% FeB; Sample C included 49% Fe, 49% FeB, and 2% Cu; and Sample D consisted of 48.75% Fe, 48.75% FeB, 2% Cu, and 0.5% C. The powders were mixed for 24 hours using a ceramic ball mill, followed by compaction at 600 MPa. All samples were sintered at 1200°C for 30 minutes under a nitrogen atmosphere.

The morphological properties of the samples were investigated using a X-ray diffractometer (XRD), a field emission scanning electron microscope (FEG-SEM), an energy dispersive X-ray spectrometer (EDS), and a Raman spectrometer. Afterwards, the gamma shielding properties (mass reduction coefficient (MAC), linear reduction coefficient (LAC), half value thickness (HVL), tenth value thickness (TVL) and mean free path (MFP)) of the samples at 1.173 MeV and 1.332 MeV energies were experimentally investigated using NaI(Tl) detector and the obtained results were compared with the calculated results in the XCOM theoretical database.

XRD analyses of the samples were carried out using a Rigaku D-Max 2100 PC brand device in the Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Sakarya University, in the $5\text{--}90^\circ$ 2θ range and at a scanning speed of $2^\circ/\text{min}$. According to the XRD analysis results, the highest intensity peak in all samples was obtained around $2\theta=44^\circ$, and all of these peaks belong to the (110) iron plane. In addition, the presence of (200) and (211) planes of iron can be seen at angles around $2\theta=64^\circ$ and 82° , respectively. In the FeB-doped B sample, the peaks at angles around $2\theta=26.46^\circ$, 42.37° , 44.80° , and 49.54° match the (111), (004), (212), and (114) planes of the FeB phase. In sample D, which contains low amounts of copper and carbon and high amounts of FeB, (002), (110), (111), (200), (004) and (220) planes belonging to the FeB phase were observed at the angles of $2\theta=20.81^\circ$, 24.34° , 26.42° , 34.64° , 42.13° and 50.16° , respectively; and (111) and (200) planes belonging to the Cu phase were observed at the angles of $2\theta=43.34^\circ$ and 50.46° . Additionally, (100),

(222), (211), (221), (110) and (333) planes of the carbon phase were determined at the angles of $2\theta=46.42^\circ$, 54.28° , 59.14° , 65.90° , 84.51° and 86.20° .

The FEG-SEM and EDS analyses of the samples were performed using the FEI/Quanta FEG 450 model FEG-SEM device within the Sakarya University Research Deanship Research-Development Application and Research Center (SARGEM). The images of the samples were taken at 10 μm , 5 μm , and 3 μm scales, and the EDS analyses were taken from 3 different regions in 10 μm scale images. The FEG-SEM images of the samples show distinct cracked structures in the various areas. These structures show that the material has an irregular distribution in its microstructural properties and contains areas resistant to mechanical loading. It can be said that the high boron content, especially in samples B, C, and D, increases the hardness of these samples and their wear resistance, while also significantly increasing the fragility of the structure. In the obtained FEG-SEM images, it can be seen that cracks form and progress as a direct result of this effect. EDS analyses from different regions show that the samples contain high amounts of Fe and FeB and considerable amounts of C and Cu.

Raman spectroscopy analyses of the samples were performed using the Kaiser RAMANRXN1 Microprobe device within the Sakarya University Research Deanship Research-Development Application and Research Center (SARGEM). Two distinct peaks were detected in the Raman spectra of the samples, the D band around 1350 cm^{-1} and the G band around 1580 cm^{-1} . The fact that the height of the D band in the samples is more dominant than the G band indicates that the sample structures contain more amorphous carbon and the crystal structure is irregular.

Gamma shielding capabilities were tested using a 3"×3" NaI(Tl) detector and a ^{60}Co point source, targeting photon energies of 1.173 MeV and 1.332 MeV. Each sample was measured three times for 20 minutes. Based on these measurements, mass attenuation coefficients (MAC), linear attenuation coefficients (LAC), half-value layers (HVL), tenth-value layers (TVL), and mean free paths (MFP) were calculated. The radiation shielding performance of the samples was quantitatively evaluated at photon energies of 1.173 MeV and 1.332 MeV using key shielding parameters such as the mass attenuation coefficient (MAC), linear attenuation coefficient (LAC), half-value layer (HVL), tenth-value layer (TVL), and mean free path (MFP). At 1.173 MeV, the experimentally determined MAC values were $0.057\pm0.002\text{ cm}^2/\text{g}$ for Sample A, $0.054\pm0.002\text{ cm}^2/\text{g}$ for Sample B, $0.050\pm0.002\text{ cm}^2/\text{g}$ for Sample C and $0.054\pm0.001\text{ cm}^2/\text{g}$ for Sample D. The corresponding error rates compared to theoretical values from the XCOM database were 3.26% for Sample A, 1.99% for Sample B, 9.25% for Sample C, and 1.99% for Sample D. At 1.332 MeV, the experimental MAC values were $0.059\pm0.003\text{ cm}^2/\text{g}$, $0.056\pm0.004\text{ cm}^2/\text{g}$, $0.051\pm0.002\text{ cm}^2/\text{g}$, and $0.056\pm0.001\text{ cm}^2/\text{g}$ for Sample A, B, C, and D, respectively. The respective error rates at this energy were 13.89% (A), 8.31% (B), 9.25% (C), and 8.31% (D). Notably, the minimum error rate (1.35%) was observed for Sample C at 1.332 MeV, and the maximum error (13.89%) for Sample A at the same energy. Overall, the experimental and theoretical MAC values demonstrated reasonable agreement, with all error margins remaining below 14%.

The experimental LAC values obtained in this study were compared to those reported in the literature for conventional and Fe-based shielding materials. At 1.173 MeV, the LAC values of the fabricated samples were higher than those of traditional materials such as concrete (0.139 cm^{-1}) and several Fe-based polymer-infiltrated foams like

Poly-IF20 (0.187 cm^{-1}), Poly-IF30 (0.245 cm^{-1}), and Poly-IF40 (0.327 cm^{-1}). Moreover, the shielding efficiency of the samples was comparable to advanced materials like Poly-IF50 (0.420 cm^{-1}) and Fe/Cr18/Ni10 (0.435 cm^{-1}). At 1.332 MeV, the LAC values of all samples again outperformed those of Poly-IF20, Poly-IF30, and standard concrete. The results were comparable to high-alloy steels such as Fe/Cr8/Ni10. However, the fabricated composites still fell short of the performance shown by high-density materials such as Fe/Cr25/Ni20 (0.464 cm^{-1}), Fe/Cr16/Ni72 (0.580 cm^{-1}), and especially lead (Pb), which displayed an LAC of 0.637 cm^{-1} .

Morphological analysis for samples A, B, C, and D confirmed the presence of different phases in their structures. It was observed that carbon and boron additives, in particular, caused incompatibility between phases and structural stress-induced defects. These additives may cause primary and secondary cracks on the surfaces and negatively affect the mechanical strength of the samples. Findings regarding gamma shielding performances show that FeB, Cu, and C additives reduce this property to a limited extent. On the other hand, alloys containing FeB stand out with their high wear and corrosion resistance. In addition, the high temperature stability of boron phases can potentially increase thermal strength. However, FeB, Cu, and C additives disrupt the homogeneity of the phase distribution and increase the risk of crack formation (due to boride/carbide formation). This situation was also clearly demonstrated by morphological observations. As a result, the samples can be considered potential candidates for gamma shielding applications under certain engineering conditions, with their high corrosion resistance and structural stability.



1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılda nükleer fizikteki bilgi birikimi hızla artmış ve bunun sonucu olarak çok çeşitli sektörlerde nükleer teknolojilerden yararlanılmaya başlanmıştır (Al-Hadeethi, 2020). Günümüzde nükleer fizik, endüstri, tıp ve bilimsel araştırmalar gibi pek çok alanda önemli uygulamalara sahiptir. Böcek kontrolü için steril böcek tekniği, tarımda genetik mutasyon çalışmaları ve gıda muhafazası, tıpta radyoterapi, endüstride tahribatsız muayene ve malzeme karakterizasyonu gibi birçok alanda nükleer fizik bilgisinden faydalanılmaktadır (Kurudirek ve ark., 2018).

İyonlaştırıcı radyasyon, x-ışınları ve gama ışınları gibi farklı formlarda ortaya çıkar. X-ışınları genellikle tıbbi görüntüleme ve tanı amaçlı kullanılırken, gama (γ -) ışınları tıp, endüstri ve enerji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Gama ışınları özellikle kanser tedavisinde ve endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer tutar (Sayyed ve ark., 2017).

Gama radyasyonunun sahip olduğu yararlı kullanım alanlarına rağmen, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu radyasyona doğrudan maruz kalma, cilt döküntüleri, organ yetmezlikleri, genetik mutasyonlar ve hatta ölüm gibi ağır sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, nükleer teknolojiler ve radyasyonun yoğun olarak kullanıldığı ortamlarda, etkili radyasyon zırlama sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması hayati önem taşımaktadır (Hoşgör ve ark., 2025).

Gama ışınlarına karşı etkili bir korunma sağlamak için seçilecek zırh malzemesinin yüksek atom numarasına (Z) ve yoğunluğa (özkütle) sahip olması gerekir. Ayrıca bu malzemelerin iyi radyasyon direnci, düşük maliyet, uzun ömür, ısı yayılımı, kalıcılık ve kolay temin edilebilirlik gibi nitelikleri de taşıması beklenir (Geidam, 2022). Gama ışınlarından korunma prensibi iyi bir zırlama malzemesi kullanarak, radyasyonun bu malzemelerden geçerken fotoelektrik olay (FE), Compton saçılması (CS) ve çift oluşumu (PP) gibi etkileşimler yoluyla şiddetinin azaltılmasına dayanmaktadır. Bu amaçla tercih edilen malzemelerin radyasyon zırlama performansları, kütle azaltma katsayısı (MAC), lineer azaltma katsayısı (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onuncu değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) gibi parametrelerle

değerlendirilmektedir (Alım, 2020). Bugün hala kurşun ve beton gibi geleneksel malzemeler, gama ışınlarına karşı zırhlama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak kurşunun toksik etkileri ve çevresel sağlık riskleri nedeniyle kullanımı sınırlandırılmaya başlamıştır. Özellikle kurşun tozunun solunması, vücutta birikimi ve biyolojik olarak parçalanamaması gibi olumsuz etkileri ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (Al-Hadeethi, 2020). Öte yandan beton, görünür ışığa karşı opaktır, uzun süreli kullanımdan sonra çatlama olasılığı yüksektir ve radyasyona maruz kaldığında su kaybeder (Hoşgör ve ark., 2025).

Bu sorunların önüne geçmek amacıyla polimerler, kayalar, alaşımlar ve camlar gibi çevre dostu ve düşük maliyetli alternatif malzemeler geliştirilmeye başlamıştır (Krane, 2019). Özellikle camlar, kolay üretimi ve kompozisyon çeşitliliği nedeniyle son yıllarda modern radyasyon koruma uygulamalarında umut vaat eden malzemeler arasında yer almaktadır (Hoşgör ve ark., 2025; Sayyed ve ark., 2025; More ve ark., 2025; Yabsantia ve ark., 2025; Ulaş ve ark., 2025; Saleh ve ark., 2024; Kuluöztürk, 2023). Özellikle estetik ve sürdürülebilir mimari uygulamalarda cam kullanımı yaygınlaşmış, bu malzemenin radyasyon koruma potansiyeli de ön plana çıkmıştır. Cam, aynı zamanda tarım, bilimsel araştırmalar, tıp, mühendislik ve uzay teknolojileri gibi pek çok alanda zararlı radyasyonun etkilerinden korunmak için de kullanılmaktadır (Buriahi ve ark., 2020). Ancak camın düşük mekanik dayanımı, kırılabilirliği, işlenebilirliğinin zor olması, kurşun veya ağır metal içerdiğinde toksik bir malzemeye dönüşmesi ve yoğunluğunun belirli sınırlar içerisinde kalması gibi dezavantajları da vardır (Henaish ve ark., 2021).

Özellikle şeffaflığın zorunlu olmadığı durumlarda, mekanik mukavemet, termal kararlılık ve korozyon direnci gibi özelliklerin ön plana çıkması nedeniyle alaşımlar, camlara kıyasla daha uygun bir zırhlama malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, bu malzemelerin kullanım alanlarının netleştirilebilmesi için yalnızca mekanik ve yapısal özellikleri değil, aynı zamanda farklı enerjili radyasyonlarla etkileşim davranışlarının da kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır. Özellikle Dünyada ve ülkemizde gelişen nükleer teknoloji ve uzay bilimlerinde artan uygulama potansiyeli, bu tür çok yönlü analizleri zorunlu kılmaktadır."

Bu tez çalışmasında toz metalurjisi yöntemiyle saf Demir'e (Fe), Ferrobor (FeB), Bakır (Cu) ve Karbon (C) katkılanması sonucu elde edilen malzemelerin morfolojik özellikleri ve iki farklı enerjide (1,173 MeV ve 1,332 MeV) gama zırhlama özellikleri

araştırılacaktır. Demire katkılanan Ferrobör, Bakır ve Karbon oranları değiştirilerek söz konusu karışımın (Fe-FeB-Cu-C) optimum radyasyon soğurma kapasitesi tayin edilecektir.

Beş bölümden oluşan bu tez çalışmasının birinci bölümünde, gama radyasyonu ve bu radyasyondan korunmak amacıyla kullanılan zırh malzemeleri ele alınmış; söz konusu malzemelerin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Ayrıca literatürde demir içeren malzemelerle ilgili yürütülen çalışmalara da kısaca değinilmiştir.

İkinci bölümde, gama zırhlama açısından temel teşkil eden radyoaktivite, radyasyonun tanımı, madde ile etkileşimi, radyasyon kaynakları, ölçüm yöntemleri ve radyasyondan korunma ilkeleri detaylı biçimde açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, malzeme üretiminde kullanılan toz metalurjisi yöntemi, mikroyapı karakterizasyon teknikleri ve gama zırhlama özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Sodyum İyodür (NaI(Tl)) sintilasyon dedektörü hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde X-ışını difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (FEG-SEM) ve Raman spektroskopisi ile elde edilen analiz sonuçları ve NaI(Tl) dedektörü kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen gama zırhlama parametreleri değerlendirilmiştir. Üretilen malzemelerin, 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerji seviyelerinde ölçülen lineer azaltma katsayıları (LAC), literatürde yer alan diğer demir bazlı malzemeler, kurşun ve beton ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise elde edilen bulgular özetlenmiş ve çalışmanın literatüre katkısı vurgulanmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Son yıllarda üretilen demir bazlı malzemelerin gama zırhlama özelliklerinin incelendiği bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir;

Akman ve ark. 2019 yılında yaptıkları bir çalışmada Fe/Cr16/Ni72, Fe/Cr21/Ni32.5, Fe/Cr25/Ni20, Fe/Cr18/Ni10 ve Fe/Cr17/Ni7 üçlü alaşımlarının gama zırhlama performansı incelenmiştir. Çalışmada seçilen üçlü alaşımlar için bazı önemli gama zırhlama parametreleri ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba ve ^{137}Cs radyoaktif kaynaklarının yaydığı 81 keV-1333 keV enerji aralığında deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlara göre, seçilen alaşımlar arasında Fe/Cr16Ni72 alaşımı en

iyi radyasyon zırhlama özelliklerine sahipken, Fe/Cr17/Ni7 alaşımı en kötü radyasyon zırhlama özelliklerine sahiptir.

B. Alshahrani ve ark. 2021 yılında yaptıkları çalışmada Monte Carlo simülasyon yöntemini kullanarak yüksek Fe içeriğine sahip amorf alaşımların ($\text{Fe}_{83}\text{B}_9\text{C}_3\text{Si}_4\text{P}_1$, $\text{Fe}_{84}\text{B}_{10}\text{C}_2\text{Si}_2\text{P}$, $\text{Fe}_{85}\text{B}_8\text{C}_3\text{Si}_3\text{P}$ ve $\text{Fe}_{86}\text{B}_5\text{C}_8\text{P}_1$) gama zırhlama özelliklerini rapor etmişlerdir. Yapılan simülasyonlar sonucu MAC değerinin foton enerjisi arttıkça FBCSP1, FBCSP2, FBCSP3 ve FBCSP4 için sırasıyla 0,0997- 0,0387, 0,0997-0,0387, 0,0998-0,0387 ve 0,0998-0,0387 cm^2/g arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Bünyamin Aygün (2021) Geant4 Monte Carlo simülasyon yöntemiyle demir içerikli bazı malzemelerin gama zırhlama özelliklerini incelemiştir. Gözlemlenen başarılı kütle azaltma katsayısı (MAC) değerleri sayesinde üretilen bu numunelerin radyasyon zırhlama yeteneğinin iyi olduğu ve nükleer uygulama sistemleri için aday malzemeler haline gelebileceği belirtilmiştir.

Wafa M. Al-Saleh ve ark. 2023 yılında atık demir talaşı (IF) ile katkılanmış ve Poly, Poly-IF20, Poly-IF30, Poly-IF40, Poly-IF50 ve Poly-IF60 (Poly-IF60 %40 polyester ve %60 IF'yi temsil eder) olarak kodlanmış altı farklı IF konsantrasyonunda numune üreterek bunların lineer azaltma katsayılarını deneysel olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü ve ^{241}Am , ^{137}Cs ve ^{60}Co olmak üzere üç radyoaktif kaynak kullanmışlardır. Numuneler arasında en yüksek gama zırhlama özelliği gösteren Poly-IF60 iken en düşük gama zırhlama özelliği gösteren ise Poly olmuştur.

2. ÇEKİRDEK VE ÖZELLİKLERİ

Bir atomun yapısı, merkezde yer alan çekirdek ve bu çekirdeğin çevresinde bulunan elektron bulutundan oluşur. Çekirdek, pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan meydana gelir. Elektronlar ise negatif yüklü taneciklerdir. Atomun kütlesinin büyük bir kısmı çekirdekte yoğunlaşmıştır. Çekirdekte yer alan proton ve nötronlar, “çekirdeğin yapı taşları” anlamına gelen nükleonlar olarak adlandırılır. Proton ve nötronlar, aynı ana parçacıktan türeyebilen farklı hâllerdeki taneciklerdir (Şahinaslan, 1997; Turhan, 2008).

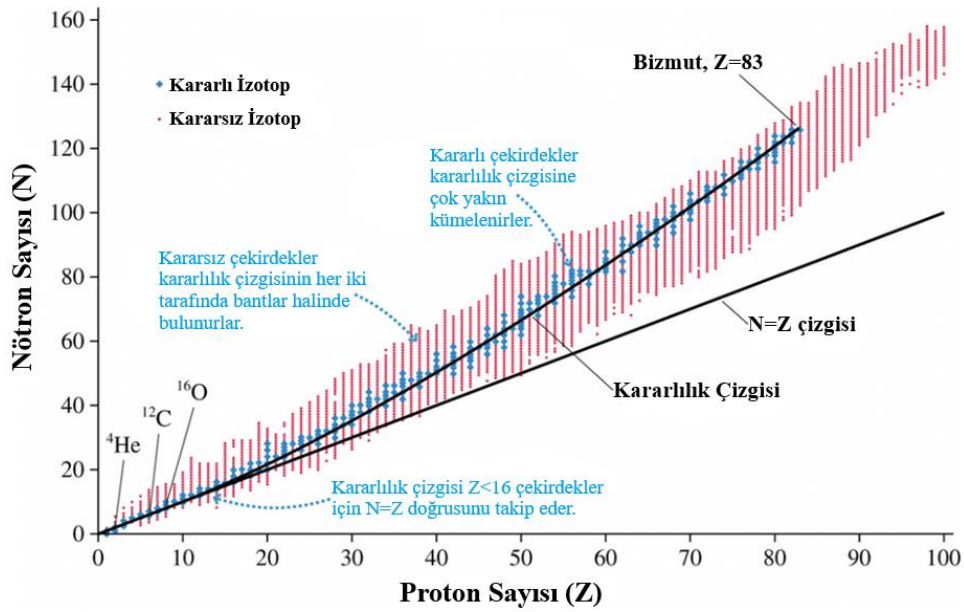
Atom çekirdeğinin parçalanmaya ve nükleer bozunmaya karşı gösterdiği direnç, çekirdek kararlılığı olarak adlandırılır. Çekirdek kararlılığını etkileyen en önemli unsur, çekirdekte bulunan nötron ve proton sayıları arasındaki orandır. Düşük atom kütlesine sahip çekirdeklerin kararlı kalabilmesi için bu oranın bir ya da bire oldukça yakın bir değerde olması gerekir. Örneğin, ^{12}C , ^{13}C ve ^{14}C karbon izotoplarında bu oran sırasıyla 1,00, 1,16 ve 1,33’tür. Bu nedenle, doğal karbon izotopları arasında kararlı olanlar bulunsada bazı izotoplar kararsızdır ve radyoaktif özellik sergiler (Turhan, 2008).

Atom numarası arttıkça proton sayısı da artar ve bu durum, protonlar arasındaki itme kuvvetlerinin daha etkili olmasına yol açar. Çekirdeği bir arada tutan güçlü çekim kuvvetlerine rağmen, artan itme kuvvetleri belirli bir noktadan sonra baskın hale gelerek çekirdek kararlılığını olumsuz yönde etkiler (Turhan, 2008). Büyük atom kütlesine sahip çekirdeklerin kararlılığını koruyabilmesi için ise nötron/proton oranının yaklaşık olarak 1,5 civarında olması gerekir (Berber, 2005; Turhan, 2008). Ancak çekirdekteki nötron sayısı ne kadar fazla olursa olsun, kararlı bir çekirdekte bulunabilecek maksimum proton sayısı sınırlıdır. Bilinen en yüksek atom numarasına sahip kararlı çekirdek Bizmut-209 (^{209}Bi)’dur. Bu atom numarasından daha büyük çekirdeklerin tamamı radyoaktif özellik gösterir. Radyoaktif çekirdekler, kararlı bir nötron/proton oranına ulaşabilmek amacıyla “radyoaktif bozunma” süreciyle enerji yayar ve bu süreçte “radyasyon” meydana gelir (Chang ve Goldsby, 2016).

Çekirdek kararlılığını etkileyen bir diğer önemli faktör ise çekirdekteki nötron ve proton sayılarının tek ya da çift olmasıdır. “Tek-çift kuralı” olarak bilinen bu kurala göre, nötron ve/veya proton sayısı çift olan çekirdeklerin daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

Örneğin, bilinen 264 kararlı çekirdeğin 157'sinde hem nötron hem de proton sayısı çift, 102'sinde ise nötron veya proton sayısı çifttir. Bununla birlikte yalnızca 5 çekirdekte hem nötron hem de proton sayısı tektir (Turhan, 2008).

Çekirdek kararlılığıyla ilgili diğer önemli kavram “sihirli sayılar” olgusudur. Bu yaklaşıma göre, nötron ve/veya proton sayıları 2, 8, 20, 50, 82 ve 126 gibi özel değerlere sahip olan çekirdekler yüksek kararlılık sergiler. Özellikle hem proton hem de nötron sayıları bu sihirli sayılara eşit olan çekirdekler, doğada yaygın olarak bulunan ve yüksek kararlılığa sahip izotoplar arasında yer almaktadır (Turhan, 2008) (Şekil 2.1).



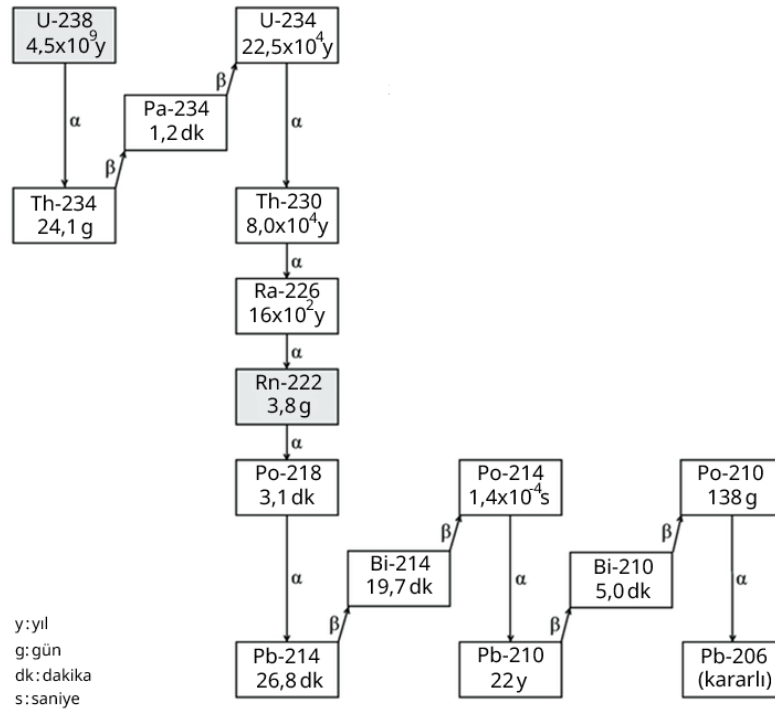
Şekil 2.1. Çekirdek kararlılığının nötron ve protona bağlılığı (Knoll, 2010).

2.1. Radyoaktif Çekirdek ve Radyoaktivite

Doğada kararlı çekirdeğe sahip atomların sayısı oldukça sınırlıdır. Bir çekirdeğin kararlılığını sürdürebilmesi için belirli bir nötron ve proton sayısına sahip olması gerekmektedir. Bu denge bozulduğunda çekirdek yapısı kararsız hale gelir. Kararlılığı sağlamak amacıyla bozunma sürecine giren çekirdeklere “radyoaktif çekirdek” adı verilir (Berber, 2005).

Radyoaktivite, dışarıdan herhangi bir müdahale ile kontrol altına alınamayan ve durdurulamayan doğal bir süreçtir. Bu süreç, zamanla üstel bir azalma göstererek radyoaktif element tamamen tükenene kadar devam eder ve bu olgu “radyoaktif bozunma” olarak tanımlanır (Mavi, 2004).

Radyoaktif çekirdekler, kararlı bir nötron/proton oranına ulaşıncaya kadar bozunma süreçlerini devam ettirirler. Bu süreçte radyoaktif çekirdekler, alfa (α), beta (β) parçacıkları ve gama (γ) ışınlarından birini ya da birden fazlasını yayarak daha kararlı bir yapıya ulaşmaya çalışır (Berber, 2005). Bozunma sürecinde ilk radyoaktif özellik gösteren çekirdek “ana çekirdek” olarak, bu çekirdeğin bozunması sonucunda oluşan yeni çekirdek ise “yavru çekirdek” olarak tanımlanır (Turhan, 2008). Radyoaktif bir ana çekirdeğin alfa (α), beta (β) ve gama (γ) bozunmaları sonucunda oluşturduğu yavru çekirdeklerin meydana getirdiği zincirler “radyoaktif seriler” olarak adlandırılır. Radyoaktif seriler; uranyum (U), toryum (Th), aktinyum (Ac) ve neptünyum (Np) serileri olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Her bir seri, bozunma zinciri boyunca ilerleyerek en sonunda kararlı bir çekirdek yapısına ulaşır (Krane, 2019). Şekil 2.2’de örnek olarak ^{238}U serisi verilmiştir.



Şekil 2.2. ^{238}U radyoaktif bozunma serisi şematik gösterimi (Ayotte vd, 2007).

2.2. Radyasyon

Doğal ve yapay radyoaktif çekirdekler, kararlı bir duruma ulaşabilmek için hızlı hareket eden parçacıklar ve foton adı verilen elektromanyetik dalgalar yayar. Bu süreçte yayılan bu parçacıklara ve dalgalara “radyasyon” adı verilir (Knoll, 2010)

Radyasyon, temel olarak “parçacık radyasyonu” ve “dalga tipi radyasyon” olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. Parçacık radyasyonu, belirli bir kütleye ve enerjiye sahip olan, yüksek hızla hareket eden parçacıklardan oluşur. Dalga tipi radyasyon ise kütsesizdir, elektrik ve manyetik alanların titreşimi sonucunda oluşur ve tüm elektromanyetik dalgalar gibi ışık hızıyla hareket eder (Knoll, 2010).

Radyasyon, etkileşim özelliklerine göre “iyonlaştırıcı radyasyon” ve “iyonlaştırıcı olmayan radyasyon” olmak üzere iki gruba ayrılır.

2.2.1. Radyasyon türleri

2.2.1.1. İyonlaştırıcı radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, maddeden geçerken enerjisini ortama aktararak atom ve molekülleri doğrudan ya da dolaylı yollarla iyonlaştırabilen bir radyasyon türüdür. Kozmik ışınlar, x-ışınları (röntgen ışınları) ile radyoaktif maddelerden yayılan alfa, beta, nötron ve gama ışınları bu tür radyasyona örnek olarak verilebilir (Krane,1987) (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Radyasyon Türleri (Tanır, 2013).

Radyasyon Türü	Yayılım Şekli	Yüklülük	Nüfuz Etme Gücü	Kaynağı/Örnek
Alfa	Helyum Çekirdeği	+2 yüklü	Birkaç cm havada	Radon gazı, uranyum
Beta	Elektron veya pozitron	-1 veya +1	Birkaç mm metal	Karbon-14 Potasyum-40
Gama	Elektromanyetik Dalga	Yüksüz	Kurşun, kalın beton	Kobalt-60
Nötron	Serbest Nötron	Çok yüksek	Su, beton, parafin	Nükleer Reaktörler

A. Parçacık radyasyonu

Parçacık radyasyonu, belirli bir kütleye ve enerjiye sahip, yüksek hızlarda hareket eden küçük parçacıkları ifade eder. Alfa (α), beta (β) ve nötron (n) parçacıkları bu tür radyasyona örnek olarak gösterilebilir (Önen, 1997).

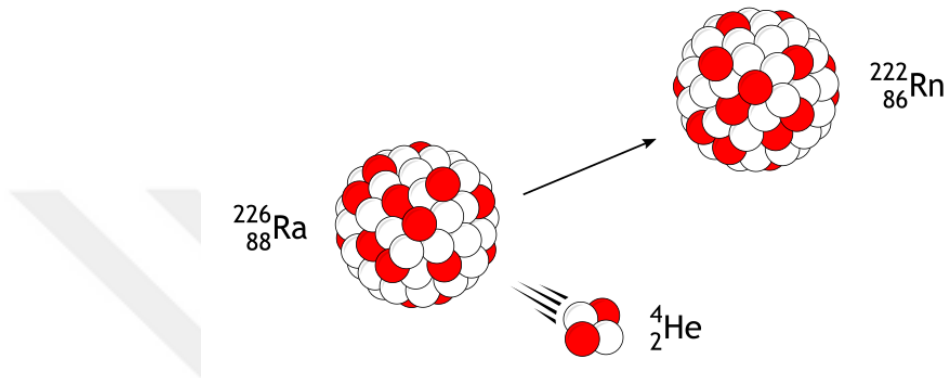
1. Alfa Bozunumu

Alfa parçacıkları, uranyum (U), toryum (Th), polonyum (Po) ve radyum (Ra) gibi çeşitli radyoaktif elementlerden yayılan ve 4 ile 9 MeV enerji aralığında bulunan helyum (He) çekirdekleridir. Eğer çekirdekteki kararsızlık hem nötron hem de proton

fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek kararlılığını sağlamak amacıyla iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayarak daha küçük ve daha kararlı bir çekirdeğe dönüşür. Bu bozunma süreci aşağıdaki şekilde ifade edilir:



Burada, X ana çekirdeği, Y ise alfa bozunması sonucunda oluşan yavru çekirdeği temsil etmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. ${}^{226}\text{Ra}$ çekirdeği alfa bozunması yaparak ${}^{222}\text{Rn}$ çekirdeğine dönüşür (Lilley, 2001).

Alfa parçacıkları, kütle numarası $A > 200$ olan radyonüklidlerde kendiliğinden gerçekleşen bir bozunma türüdür. Çekirdekten bir alfa parçacığının yayılması sonucunda, çekirdeğin kütle numarası 4 birim, atom numarası ise 2 birim azalır. Alfa parçacıkları, yaklaşık olarak ışık hızının onda biri kadar bir hıza ulaşabilir. Pozitif yüklü olmaları nedeniyle elektrik ve manyetik alanlarda sapmaya uğrarlar. Ayrıca içerdiği proton ve nötronlar nedeniyle, diğer radyoaktif bozunma ürünlerine kıyasla daha büyük bir kütleye sahiptirler (Oto, 2012).

Pozitif yük taşıyan alfa parçacıkları, madde içerisinden geçerken ortamın atomlarıyla etkileşime girerek elektronları yerinden koparır ve bu süreçte iyon çiftleri oluşturarak enerjilerini kaybederler. Nüfuz etme yetenekleri oldukça sınırlıdır, ince bir kâğıt parçasıyla bile alfa parçacıklarının geçişi engellenebilir. Sağlam bir deri tabakasını geçemeyen bu parçacıklar, insan vücuduna doğrudan temas edemedikleri sürece ciddi bir tehlike oluşturmazlar. Ancak, alfa yayıcı radyoaktif maddeler solunum veya sindirim yoluyla ya da açık yaralardan vücuda alındığında, içsel radyasyon kaynağına dönüşerek ciddi sağlık sorunlarına yol açabilirler (Oto, 2012).

2. Beta Bozunumu

Beta parçacıkları, kararsız atom çekirdeklerinden yayılan yüksek enerjili elektron (β^-) ve pozitron (β^+) parçacıklarıdır. Beta parçacıkları, kararsız atom çekirdeklerinden yayılan yüksek enerjili elektronlar (β^-) ya da pozitronlardır (β^+). Her ne kadar bu parçacıklar çekirdekten yayılıyor olsalar da bozunma öncesinde çekirdekte mevcut değildirler; nükleer bozunma süreci sırasında ortaya çıkarlar. Beta bozunumu, gerçekleşen sürece bağlı olarak üç ana grupta incelenmektedir.;

- a) β^- Bozunumu
- b) β^+ Bozunumu
- c) Elektron Yakalaması (Oto, 2012).

a) β^- Bozunumu

Nötron fazlası olan çekirdeklerde gerçekleşen beta (β^-) bozunması sürecinde, bir nötron bir protona dönüşürken beraberinde bir elektron ve momentum ile enerjinin korunumu gereği bir antinötrino salınır (Oto, 2012) (Şekil 2.4(a)):

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \quad (2.2)$$

veya

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \bar{\nu} \quad (2.3)$$

Denklem (2.2)'de n nötron, p proton ve $\bar{\nu}$ antinötrinoyu temsil ederken denklem (2.3)'te X kararsız ana çekirdeği, Y ise bozunma sonucunda oluşan kararlı ürün çekirdeğini temsil etmektedir. Beta bozunması sonucunda, ürün çekirdeğin atom numarası bir birim artarken, çekirdek içerisinde bir nötronun bir protona dönüşmesi nedeniyle kütle numarasında herhangi bir değişiklik olmaz (Oto, 2012).

b) β^+ Bozunumu

Proton fazlası olan çekirdeklerde, bir proton pozitron yayarak bir nötrona dönüşür, bu süreçte ayrıca bir nötrino salınır (Oto, 2012) (Şekil 2.4(b)):

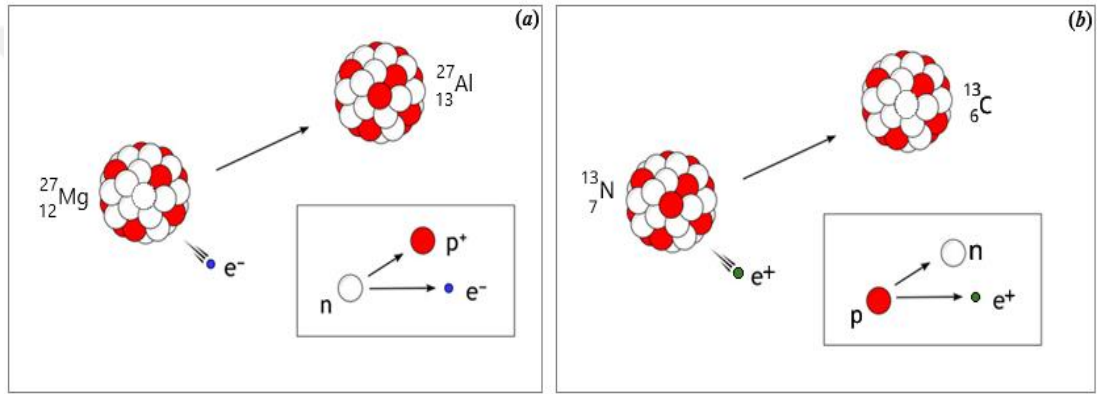
$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu \quad (2.4)$$

veya

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \beta^+ + \nu \quad (2.5)$$

β^+ bozunması sonucunda, ürün çekirdeğin atom numarası bir birim azalırken, çekirdek içerisinde bir protonun bir nötrona dönüşmesi nedeniyle kütle numarasında herhangi bir değişiklik olmaz.

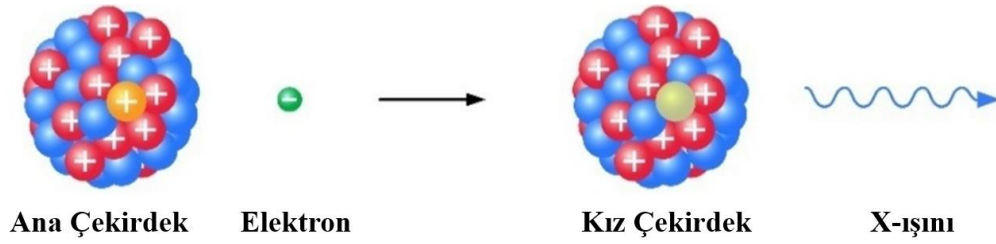
Pozitron, elektronun anti-parçacığdır. Çekirdekten yayıldıktan sonra çevresindeki ortamda bulunan atomlarla etkileşime girerek çeşitli çarpışmalar gerçekleştirir. Bir elektronla karşılaştığında her parçacık da kütlesini kaybederek tamamen enerjiye dönüşür ve yok olurlar. Bu olaya “yok olma” (anihilasyon) denir. Yok olma süreci sonucunda her biri 0,511 MeV enerjiye sahip iki gama fotonu birbirine zıt yönlerde yayılır. Sonuç olarak sistemin toplam enerjisi, elektron ve pozitronun kütle-enerjilerinin toplamı olan 1,022 MeV’dir (Oto, 2012).



Şekil 2.4. (a) ^{27}Mg çekirdeği β^- bozunması yaparak ^{27}Al çekirdeğine, **(b)** ^{13}N çekirdeği β^+ bozunması yaparak ^{13}C çekirdeğine dönüşüyor (Lilley, 2001).

c) Elektron Yakalanması

Elektron yakalanması olayında atom çekirdeği yörüngesinde bulunan bir elektronu yakalar ve bu elektron çekirdekteki bir proton ile birleşerek nötrona dönüşür. Bu süreç, atomun proton sayısının bir birim azalmasına neden olur. Çekirdek tarafından bir yörünge elektronunun yakalanması, atomun elektron düzeninde bir boşluk oluşmasına yol açar. Bu boşluğun doldurulması için yörüngeler arasında elektron geçişleri gerçekleşir ve bu geçişler sırasında x-ışınları yayılır. Böylece, birincil ürünler x-ışını salarak ikincil ürün hâline gelirler. Süreç, Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5. Elektron Yakalanması olayı (Krane, 2019).

Bu süreç, iki aşamalı bir olay olarak tanımlanır. Birinci aşamada, çekirdek bir elektronu yakalayarak atomu uyarılmış hâle getirir. İkinci aşamada ise bu uyarılmış hâl elektromanyetik radyasyon yayarak sonlanır. Yakalanan elektronlar genellikle iç yörüngede, özellikle K tabakasında bulundukları için, bu olaya “K yakalaması” da denilmektedir (Yülek, 1992).



B. Dalga tipi radyasyon

Dalga tipi radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalgalar şeklinde yayıldığı bir radyasyon türüdür. Bu radyasyon, elektrik ve manyetik alanların birbirine dik düzlemlerde ve sinüzoidal bir yapıda salınımı sonucunda meydana gelir. Elektromanyetik dalgalar, klasik elektromanyetizma kuramının temelini oluşturan Maxwell denklemleri ile tanımlanır ve vakum ortamında ışık hızıyla, yani yaklaşık 3×10^8 m/s hızla yayılabilirler (Tanır, 2013).

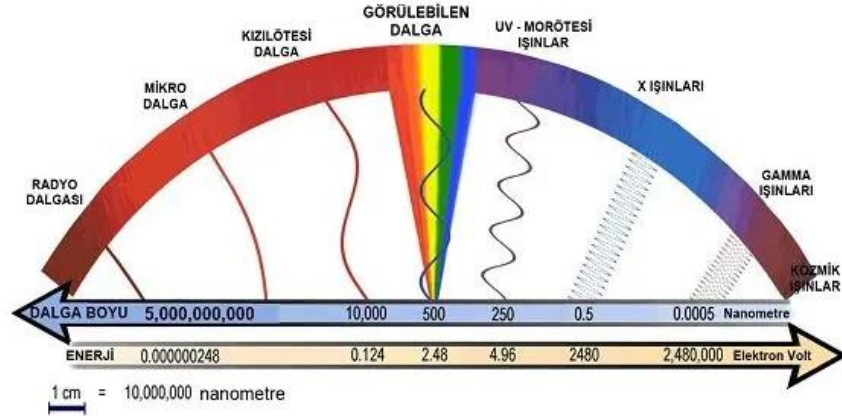
Elektromanyetik radyasyon, enerji taşımaya rağmen kütesiz bir yapıya sahiptir ve yayılabilmek için herhangi bir ortama ihtiyaç duymaz. Bu özelliği sayesinde, vakum ortamında bile yayılabilir. Elektromanyetik dalgaları tanımlayan temel parametreler dalga boyu (λ) ve frekanstır (f). Bu iki parametre arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.7)$$

Burada c ışık hızıdır (Tanır, 2013).

Dalga tipi radyasyon, elektromanyetik spektrum içerisinde farklı enerji seviyelerine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.6). Bu spektrum, radyo dalgalarından başlayarak gama ışınlarına kadar uzanan geniş bir dalga boyu ve enerji aralığını kapsar. Şekil 2.6’da elektromanyetik spektrumun farklı bölgeleri dalga boyu (nanometre) ve enerji (elektron volt) karşılıklarıyla birlikte gösterilmiştir. Dalga boyu

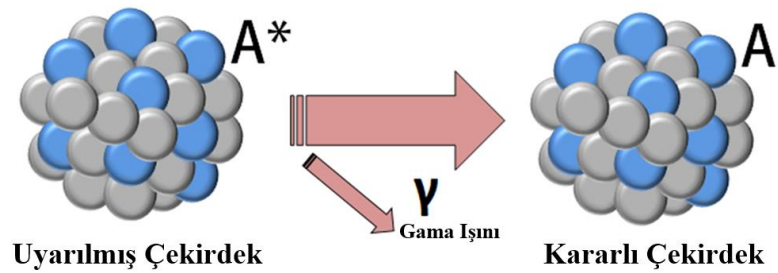
azaldıkça foton enerjisi artar (Tanır, 2013). Görülebilir bölge yaklaşık 400-700 nm aralığında yer almakta ve renk tayfı olarak temsil edilmektedir.



Şekil 2.6. Elektromanyetik spektrumun dalga boyu ve enerji aralığı.

C. Gama ışıması

Gama ışınları (γ), tanecik yapısında olmayan, kısa dalga boyuna ve yüksek enerjiye sahip elektromanyetik ışımalardır. Radyoaktif bir çekirdek, bir bozunma gerçekleştirdikten sonra kararlı enerji seviyesine ulaşmak zorundadır. Bazı radyoaktif izotoplarda, çekirdek bir alfa veya beta bozunması gerçekleştirdikten sonra hâlâ uyarılmış durumda kalabilir. Bu durumda çekirdek, temel enerji seviyesine geçerken aradaki enerji farkını gama ışını şeklinde dışarıya salar (Şekil 2.7). Gama ışıması sonucunda çekirdeğin atom numarası ve kütle numarası değişmez (Tanır, 2013) (Tanır, 2013).



Şekil 2.7. Gama Bozunumu (Lilley, 2001).

Radyoaktif maddelerden yayılan gama fotonlarının enerji aralığı yaklaşık 0,03 MeV ile 7 MeV arasında değişmektedir. Ancak, fisyon olayları sırasında oluşan ani gama ışınlarının enerjisi 7 MeV'in üzerine çıkarak çok daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Radyasyon dozimetresi ve radyasyondan korunma alanlarında

dikkate alınan enerji aralığı ise 10 keV ile 7 MeV arasında olup, bu enerji aralığına karşılık gelen dalga boyları yaklaşık 0,25 Å ile 0,025 Å arasındadır (Oto, 2012).

Gama ışınları elektriksel olarak yüksüz oldukları için malzeme içerisinde uzun mesafeler kat edebilirler ve güçlü penetrasyon (giricilik) özelliklerine sahiptir. Gama ışınlarının nüfuz etme yeteneği, beta ışınlarının yaklaşık 100 katı, alfa parçacıklarının ise 10.000 katı kadar daha fazladır. Bu nedenle, gama ışınları insan vücudundan kolaylıkla geçebilir ve bu geçiş sırasında biyolojik dokularda ciddi hasarlara yol açabilir. Bununla birlikte, uygun radyasyon zırhlaması ve güvenlik protokolleriyle bu zararlı etkiler büyük ölçüde engellenebilir (Oto, 2012).

D. X-Işınları

X-ışınları, yüksek enerjili elektronların yavaşlaması ya da atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleri sonucu oluşan, dalga boyu 0.1-100 Å arasında değişen elektromanyetik dalgalardır. Kristalografi çalışmalarında genellikle 0.5-2.5 Å aralığındaki yumuşak x-ışınları tercih edilirken, tıbbi radyoloji uygulamalarında daha kısa dalga boyuna ve yüksek penetrasyon yeteneğine sahip olan 0.5-1 Å aralığındaki sert x-ışınları kullanılmaktadır (Uyanık, 2011).

X-ışınları;

a) Doğal

b) Yapay X-ışınları olmak üzere iki şekilde meydana gelir (Uyanık, 2011).

a) Doğal X-ışınları

X-ışınları, atom çekirdeğinde gerçekleşen K kabuğundan elektron yakalanması, alfa bozunması, iç dönüşüm ve beta bozunması gibi nükleer olaylar sonucunda meydana gelir (Uyanık, 2011).

Bir atoma dışarıdan yüksek enerjili elektronlar ulaştığında veya gönderildiğinde, bu elektronlar atomun iç kabuklarındaki elektronları yerlerinden koparabilir. Bu kopan elektronların oluşturduğu boşluk, daha yüksek enerji seviyelerinde bulunan elektronların alt seviyelere geçişiyle doldurulur. Bu geçiş sırasında ortaya çıkan fazla enerji x-ışını şeklinde dışarıya yayılır (Uyanık, 2011)

Ayrıca, çekirdek içerisindeki bir proton hareketi sırasında atomun iç kabuklarındaki bir elektronu yakalayarak nötrona dönüşebilir. Bu olay sonucunda yakalanan elektronun bulunduğu enerji seviyesinde oluşan boşluk daha yüksek seviyedeki bir

elektronun bu boşluğu doldurmasıyla tamamlanır ve bu süreçte de x-ışını yayılımı gerçekleşir (Uyanık, 2011).

b) Yapay X-ışınları

Yapay x-ışınları, maddenin proton, elektron gibi temel parçacıklarla ya da hızlandırılmış iyonlarla etkileşmesi veya x-ışını tüpleri ve uygun radyoaktif kaynaklardan yayılan fotonlarla etkileşime girmesi sonucu oluşur. Maddenin fotonlarla etkileşmesiyle karakteristik (çizgi) x-ışınları, yüklü parçacıklarla etkileşmesiyle ise karakteristik ve sürekli x-ışınları meydana gelebilir (Uyanık, 2011).

Sürekli (Frenleme) X-ışınları: Frenleme radyasyonu (Bremsstrahlung radyasyonu), yüklü bir parçacığın başka bir yüklü parçacığın yakınında aniden yavaşlaması veya sapması sonucu oluşan elektromanyetik radyasyondur. Hedefe çarpan yüksek enerjili elektronlar, tamamen durmadan önce hedef atomlarıyla çeşitli etkileşimlere girer. Bu etkileşimler sırasında elektronların enerjisinin bir kısmı radyasyon şeklinde dışarıya yayılır (Uyanık, 2011).

Karakteristik X-ışınları: Yüksek enerjili elektronların, hedef materyalin iç yörüngesindeki elektronları koparacak kadar yeterli enerjiye sahip olması durumunda gerçekleşir. Bu çarpışmalar sonucunda, atomun iç kabuklarında elektron boşlukları meydana gelir ve bu boşluklar, daha dış yörüngelerde bulunan zayıf bağlı elektronlar tarafından doldurulur. Bu geçiş sırasında, elektronlar daha düşük enerji seviyesine inerken aradaki enerji farkını elektromanyetik radyasyon şeklinde yayarlar. Yayınlanan bu radyasyon, ilgili atomun karakteristik özelliklerini taşıdığından bu tür x-ışınlarına “karakteristik x-ışınları” adı verilir (Uyanık, 2011).

2.2.1.2. İyonlaştırıcı olmayan radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon maddenin yapısında iyonizasyon oluşturmeyen daha düşük enerjili radyasyon türüdür. Ultraviyole ışık, güneşten gelen ışınlar, radyo dalgaları, cep telefonları ve elektrikli ev aletlerinden yayılan elektromanyetik dalgalar bu gruba dahildir (Oto, 2012).

İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar, iyonlaştırıcı radyasyonlara kıyasla daha düşük enerji seviyelerine sahiptir ve madde ile etkileşimleri sırasında molekül ve atomların dönme, titreşim veya elektronik enerji seviyelerinde değişikliklere neden olurlar (Kumaş, 2006).

2.3. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

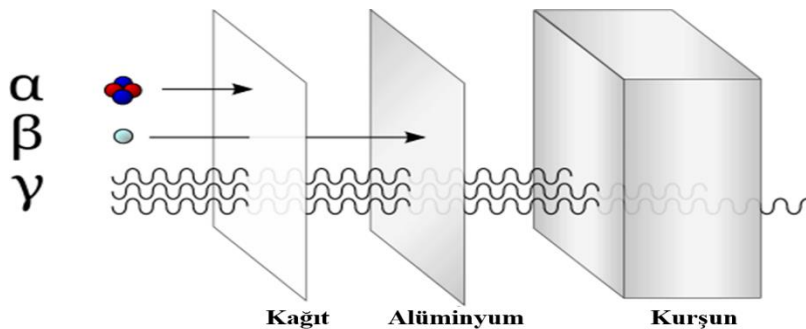
Radyasyonun madde ile etkileşimi ve bu süreçte gerçekleşen enerji kaybı radyasyonun tespiti, korunma stratejilerinin geliştirilmesi, biyolojik etkilerinin araştırılması ve nükleer teknolojilerin çeşitli alanlarda uygulanması açısından temel bir öneme sahiptir (Oto, 2012).

Radyasyonun madde ile etkileşiminde ana rolü atomların yörünge elektronları üstlenir. Bu etkileşim mekanizması, gelen radyasyonun yükü, kütlesi ve enerjisi ile etkileşime girdiği ortamın atom numarası ve yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Oto, 2012).

2.3.1. Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

X ve gama ışınları, elektromanyetik dalgalar (fotonlar) olup, madde ile çeşitli etkileşimler gerçekleştirebilirler. Gama ışınları, kararsız atom çekirdeklerinden yayılan yüksek enerjili fotonlardır. X-ışınları ise, hızlandırılmış elektronların yüksek atom numarasına sahip hedef atomların çekirdeklerine yaklaşıp çarpması sonucu oluşur. Elektromanyetik radyasyonun soğurulması, farklı fiziksel olaylar sonucunda gerçekleşebilir. Bunlar arasında en baskın olanları Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşumu süreçleridir. Bunların gerçekleşme olasılığı fotonların enerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Oto, 2012).

Bu etkileşim mekanizmaları, fotonların iki önemli fiziksel özelliğini açıklar. Birincisi, fotonların madde içerisindeki yüklü parçacıklara kıyasla çok daha uzun mesafeleri kat edebilme (yüksek penetrasyon) yeteneğine sahip olmasıdır. İkincisi ise fotonların belirli bir kalınlıktaki materyali geçtikten sonra enerji kaybetmemesi, sadece şiddetlerinde bir azalma meydana gelmesidir (Oto, 2012). Şekil 2.8’de alfa (α -), beta (β -) ve gama (γ -) ışınlarının farklı malzemeler üzerindeki geçirgenlikleri verilmiştir.



Şekil 2.8. Alfa (α -), beta (β -) ve gama (γ -) ışınlarının farklı malzemeler üzerindeki geçirgenlikleri (Knoll, 2010).

Fotonların şiddetinde meydana gelen bu azalma, kalınlığa (x) bağlı olarak aşağıdaki sırayla eksponansiyel bir şekilde gerçekleşir (Oto,2012);

$$dI = I dx \quad (2.8)$$

$$dI = -\mu I dx \quad (2.9)$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.10)$$

Bu denklemi sonlu bir x kalınlığı üzerinden integralini alırsak;

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu dx \quad (2.11)$$

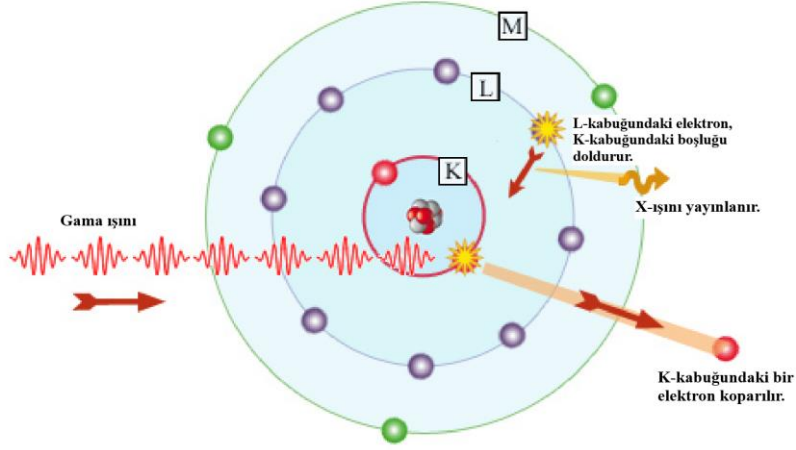
$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x \quad (2.12)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.13)$$

Burada, I_0 gelen fotonların başlangıçtaki şiddetini, x soğurucu ortamın kalınlığını ve μ ise lineer azalma katsayısını ifade eder. Soğurma katsayısı, radyasyonun geçtiği malzemenin özelliklerine ve foton enerjisine bağlı olarak değişir ve etkileşmenin toplam tesir kesitini temsil eder. Bu ilişki, literatürde *Lambert-Beer Yasası* olarak bilinmektedir (Oto, 2012)

2.3.1.1. Fotoelektrik olay

Bu etkileşimde, fotonun enerjisi bir elektrona aktarılır. Elektron, fotondan aldığı enerjinin atomdaki bağlanma enerjisi farkına eşit olan kısmını kullanarak atomdan uzaklaştırılır. Geri tepme enerjisi genellikle birkaç eV düzeyinde olup, bu enerji ortam tarafından soğurulur. Atomdan kopan bu elektronlara *fotoelektron* adı verilir. Elektronun atomdan ayrılmasıyla oluşan boşluk, daha yüksek bir yörüngeden gelen bir başka elektron tarafından doldurulur ve bu süreçte *karakteristik x-ışını* yayımlanır. Bu olaya *Auger olayı* denir ve bu süreç sonucunda yayılan elektrona ise *Auger elektronu* adı verilmektedir (Tanır, 2013). Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Fotoelektrik olay.

2.3.1.2. Compton saçılması

Bu olay, bir foton ile atomun yörünge elektronları arasında gerçekleşen bir etkileşimdir. Fotonun enerjisi yeterince yüksek olduğunda, yörünge elektronu ile çarpışarak saçılma yoluyla etkileşir. Foton, enerjisinin bir kısmını atomik yörünge elektronuna aktarır ve kalan enerjisi ile daha düşük enerjili olarak saçılır. Bu etkileşim sonucunda geri tepen elektron, kazandığı kinetik enerjiye bağlı olarak hareket eder ve bu enerji fotonun saçılma açısına doğrudan bağlıdır (Tanır, 2013).

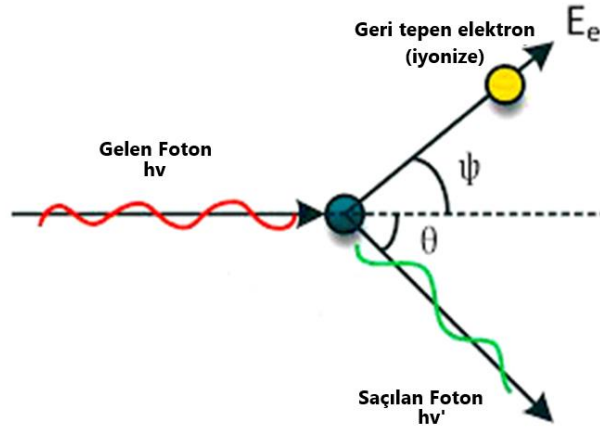
Serbest bir elektron üzerine, enerjisi $h\nu$ ve momentumu $h\nu/c$ olan bir foton geldiğinde, foton θ açısı altında daha düşük bir frekansta saçılırken, momentum kazanan elektron ϕ açısı altında ortamdaki yayılır (Şekil 2.10). Fotonun saçılma açısı, fotondan elektrona aktarılan enerji miktarını belirler. Compton saçılması olayına enerji ve momentum korunumu yasaları uygulandığında, saçılan foton ve yayılan elektronun enerjileri için aşağıdaki bağıntılar elde edilir (Şengül, 2022).

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad (2.14)$$

Burada $\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$, $h\nu$ gelen foton enerjisi, $h\nu'$ saçılan fotonun enerjisi, θ ise fotonun saçılma açısıdır. Saçılan elektronun enerjisi ise,

$$K_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \quad (2.15)$$

ile verilir (Şengül, 2022).

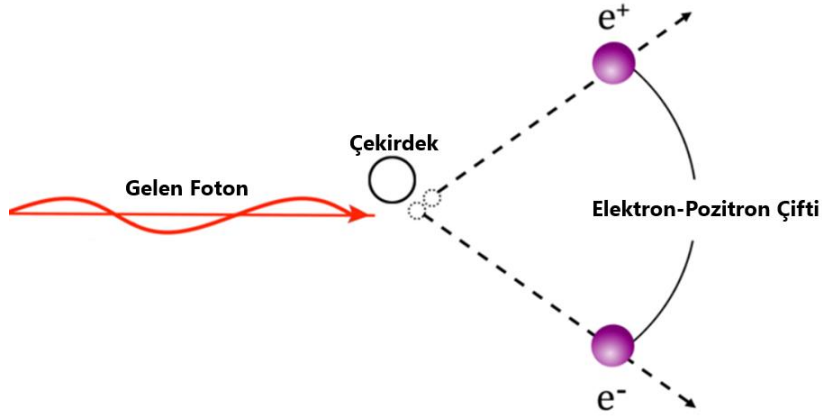


Şekil 2.10. Compton Saçılması (Beiser, 2003).

2.3.1.3. Çift oluşumu

Gelen fotonun enerjisi $h\nu \geq 1.022$ MeV olduğunda, foton çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşime girerek yok olur ve bir elektron (e^-) ile bir pozitron (e^+) oluşur. Bu sürece çift oluşumu (pair production- PP) denir. Oluşan pozitron, Coulomb etkileşimleri yoluyla yavaşlar ve enerjisinin tamamını kaybettiğinde ortamda bulunan bir elektron ile birleşerek pozitronyum yapısını oluşturur. Pozitronyum yaklaşık 10^{-10} saniye içerisinde yok olur ve bu yok olma süreci sonucunda birbirine zıt yönlerde hareket eden iki adet 0,511 MeV enerjili anihilasyon fotonu yayımlanır (Tanır, 2013) (Şekil 2.11).

Her çift oluşumu sırasında, aynı zamanda fotoelektrik etki ve Compton saçılması gibi olaylar da meydana gelebilir. Çift oluşumu için gerekli minimum enerji kullanıldığında foton enerjisinden geriye kalan kısım, oluşan elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Bu süreçte, oluşan elektron serbest bir elektron gibi hareket ederken pozitron ortamda bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlerde hareket eden iki gama fotonu yayarak yok olur. Bu gama fotonları da ortamda fotoelektrik etki yoluyla soğurulabilir.

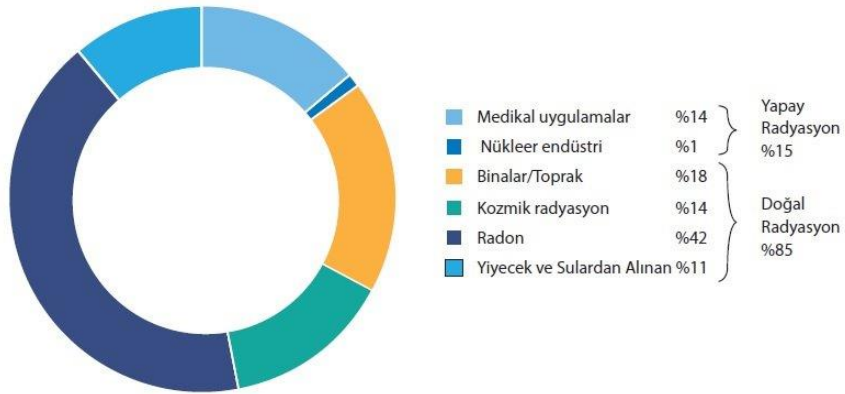


Şekil 2.11. Çift oluşumu (Knoll, 2010).

Çift oluşumu olayında foton çekirdeğin elektromanyetik alanı ile etkileşime girdiğinden bu olayın gerçekleşme olasılığı ortamın atom numarası (Z) arttıkça hızlı bir şekilde artar (Tanır, 2013).

2.4. Radyasyon Kaynakları

Yeryüzündeki canlılar, varoluşlarından beri sürekli olarak radyasyonla iç içe bir yaşam sürdürmektedir. Doğal radyasyon kaynakları; suda, toprakta ve havada bulunan radyoaktif maddelerin yanı sıra güneşten ve dış uzaydan gelen kozmik ışınları kapsarken, insan faaliyetleri sonucu oluşan yapay radyasyon kaynakları ise çevredeki radyasyon seviyesini artırmaktadır. Bu çerçevede radyasyon kaynakları doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Oto, 2012) (Şekil 2.11).



Şekil 2.12. Radyasyon kaynakları (Afad, 2025).

2.4.1. Doğal radyasyon

Büyük Patlama'dan bu yana tüm canlı organizmalar sürekli olarak kozmik ışınlarla, atmosferde kozmik ışın etkileşimleri sonucu oluşan radyonüklidlere ve çevrede doğal

olarak bulunan radyoaktif maddelerden yayılan radyasyona maruz kalmıştır (TAEK, 2009).

Yüksek seviyelerde radyasyon, organizmalar için zararlı olsa da çevresel radyasyonun belirli düzeylerde var olmasının yaşamın oluşumu ve devamlılığı açısından önemli olduğu kabul edilmektedir. Örneğin, arka plan (background) radyasyonunun kimyasal ve biyolojik evrim süreçlerine ne ölçüde katkıda bulunduğu tam olarak bilinmemekle birlikte, bu sürece katkı sağladığı düşünülmektedir. Daha somut bir öneme sahip olan bir diğer durum ise yerkürenin ısısının büyük ölçüde ilkel dönemden kalma ve doğal olarak oluşan radyonüklidlerin bozunmasıyla ortaya çıkan ısı sayesinde korunuyor olmasıdır (TAEK, 2009).

Her radyasyon kaynağının iki temel özelliği vardır. Bunlardan ilki, insana verdiği radyasyon dozu, ikincisi ise bu dozun azaltılmasına yönelik alınabilecek önlemlerdir. Kozmik radyasyon, karasal radyasyon ve insan vücudundaki iç radyasyon gibi doğal radyasyon kaynakları dünya genelinde her bir bireyin yılda ortalama 1 mSv veya daha yüksek dozda radyasyona maruz kalmasına neden olmaktadır (TAEK, 2009). Tablo 2.3'te bazı doğal kaynaklardan alınan yıllık doz miktarları verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı doğal kaynaklardan alınan yıllık doz miktarı (Tanır, 2013).

Kaynak	Doz (mSv)
Kozmik	0,4
Gama	0,5
İç ışınlama	0,3
Radon	1,2

2.4.1.1. Kozmik radyasyon

Dünya atmosferi, her zaman uzaydan gelen radyasyonun etkisi altındadır. Güneş ve diğer yıldızlardan kaynaklanan yüklü parçacıklar, Dünya'nın atmosferi ve manyetik alanı ile etkileşime girerek bir radyasyon duşu oluşturabilir. Bu etkileşimler sonucunda genellikle beta ve gama radyasyonu türünde bir radyasyon akışı meydana gelir. Bu tür radyasyona kozmik ışınlar adı verilmektedir. Güneş ve yıldızlar sürekli olarak Dünya'ya kozmik radyasyon göndermektedir. Ancak bu radyasyonun şiddeti, rakım, hava koşulları ve Dünya'nın manyetik alanına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Tanır, 2013). Örneğin, dağ zirvelerinde yaşayan veya yüksek irtifalarda seyahat eden bireyler deniz seviyesinde yaşayanlara kıyasla kozmik radyasyondan daha yüksek düzeyde etkilenebilmektedir (Tanır, 2013).

2.4.1.2. Karasal radyasyon

Evrenin oluşumu sırasında meydana gelen radyasyon, varlığını radyonüklidlerin uzun yarı ömürleri sayesinde sürdürmektedir. Bu radyasyonların büyük bir bölümü Dünya üzerinde bulunmakta ve karasal radyasyon olarak adlandırılmaktadır. Radyoaktif elementler, özellikle uranyum, toryum ve radyum gibi maddeler toprakta ve kayalarda bulunmaktadır.

Bireyler arasındaki radyasyon dozu farklılıkları, kozmik ve karasal kaynaklara bağlı olarak büyük ölçüde benzerlik gösterirken maruz kalınan doğal radyasyon dozundaki esas değişiklik toprakta bulunan radyoaktif minerallerden kaynaklanan radyoaktif gazların solunmasından ileri gelmektedir. Atmosferde bulunan hava her yıl alınan doğal radyasyon dozunun önemli bir kısmından sorumlu olan radon gazını içermektedir. Uranyumun bozunması sonucu oluşan kokusuz ve renksiz bir radyoaktif gaz olan radon gazı solunum yoluyla kolaylıkla vücuda alınabilir ve bu özelliği nedeniyle insan sağlığı açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Su kaynaklarında ise az miktarda çözünmüş uranyum ve toryum bulunur. Bunun yanı sıra, bitkiler ve hayvanlar gibi tüm organik maddeler yapılarında doğal olarak radyoaktif atomlar ve potasyum elementi içermektedir. Bu radyoaktif maddelerden bir kısmı besin ve su yoluyla vücuda alınırken, bir kısmı ise solunum yoluyla insan organizmasına ulaşmaktadır (Tanır, 2013).

2.4.1.3. İç radyasyon

Tüm insanların vücudunda, doğumdan itibaren kozmik ve karasal radyasyon kaynaklarının yanı sıra radyoaktif potasyum-40 (^{40}K), karbon-14 (^{14}C), kurşun-210 (^{210}Pb) ve benzeri diğer izotoplar doğal olarak bulunmaktadır.

2.4.2. Yapay radyasyon

Nükleer teknolojiye hızlı gelişmelerle birlikte radyasyonun kullanım alanları da önemli ölçüde genişlemiştir. Özellikle tıp alanında hastalıkların teşhis ve tedavisinde yapay radyasyon kaynaklarından yaygın olarak yararlanılmaktadır. Tıbbi görüntüleme uygulamalarında x-ışınları kullanılırken, nükleer tıp alanında hastalara radyoaktif maddeler verilerek hücre içinde oluşturulan iç ışınlama yoluyla hasta hücrelerin tedavisi sağlanmaktadır.

Bu tür tedavi uygulamaları sırasında hastalarla birlikte sağlık personeli de belirli düzeyde radyasyona maruz kalmaktadır. Benzer şekilde bazı endüstriyel

uygulamalarda ve nükleer enerji santralleri gibi tesislerde de yapay radyasyon kaynaklarına maruziyet kaçınılmaz hâle gelmiştir. Bu nedenle, maruz kalan radyasyon dozlarının düzenli olarak izlenmesi ve gerekli koruyucu önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır (Krane, 2019).

2.5. Radyasyon Ölçümü

2.5.1. Radyasyon birimleri

Radyasyon ölçümlerinde kullanılan terimler, radyasyonun kaynağından yayılma miktarına, bir birey tarafından soğurulan doza ve bu dozun insan sağlığı üzerindeki biyolojik etkilerine göre farklılık göstermektedir. Uluslararası alanda bilim insanlarının büyük bir kısmı ölçümlerde Uluslararası Birim Sistemi (SI)'ni kullanarak standart bir ağırlık ve ölçü sistemi benimsemiştir.

Radyasyonun hangi özelliğinin ölçüldüğüne bağlı olarak farklı birimler kullanılmaktadır. Radyoaktif bir kaynaktan yayılan radyasyon miktarının birimi geleneksel sistemde Curie (Ci), SI sisteminde ise Becquerel (Bq)'dir. Curie (Ci) ve Becquerel (Bq) birimleri, radyoaktif bir maddenin belirli bir zaman aralığında gerçekleştirdiği parçalanma sayısını belirtmek için kullanılır. Örneğin 1 Ci, saniyede 37 milyar (37×10^9) parçalanmaya karşılık gelir. 1 Bq ise saniyede bir parçalanmayı ifade eder.

Bir kişi radyasyona maruz kaldığında açığa çıkan enerji vücut dokularında depolanır. İnsan dokusunun birim kütlesi başına biriken enerji miktarı, soğurulan doz olarak tanımlanır ve birimi geleneksel sistemde rad, SI sisteminde ise Gray (Gy)'dir. Radyasyona maruz kalmanın insan sağlığı üzerindeki biyolojik etkisi ise geleneksel olarak REM, SI birim sisteminde ise Sievert (Sv) ile ölçülmektedir (Tanır, 2013). Bu birimler, çevreye salınan radyoaktif madde miktarını belirlemek ve karşılaştırmak için kullanılmaktadır (Abdlhamed, 2018). Tablo 2.4'te radyasyon dozu birimleri ve dönüşümleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Radyasyon dozu birimleri dönüşüm tablosu (Tanır, 2013).

Terim	Klasik Sistem	SI Sistemi	Dönüşüm
Aktivite	Curie, Ci	Becquerel, Bq	1 Ci = $3,7 \times 10^4$
Işınlanma Düzeyi	Röntgen, R	Coulomb/kilogram	1C/kg=3876 R
Soğurulan Doz	Rad	Gray, Gy	1Gy = 100 Rad
Doz Eşdeğeri	Rem	Sievert, Sv	1Sv= 100 ram

2.5.2. Radyasyon ölçüm mekanizmaları

Radyasyonun ölçülebilmesi için öncelikle madde ile etkileşime girmesi gerekmektedir. Radyasyon, maddeye çarptığında kimyasal, fotokimyasal, iyonizasyon, fosforesans ve flüoresans gibi çeşitli etkilere neden olarak enerjisini kaybeder. Bu etkileşim özelliklerinden yararlanılarak radyasyonun ölçümü ve tespiti amacıyla çeşitli dedeksiyon cihazları geliştirilmiştir.

Dedeksiyon ve ölçüm cihazları genel olarak iki gruba ayrılır. Birinci grupta, parçacıkların elektriksel yüklerinden yararlanılarak çalışan cihazlar yer alır. Fotoğraf metodu, Wilson sis odası ve sintilasyon sayıcıları bu gruba örnektir (Demir, 2008). İkinci grupta ise iyonizasyon sonucu oluşan yüklerin toplanması prensibine dayalı cihazlar bulunmaktadır. Bu grupta yer alan cihazlara iyon odaları, orantılı sayıcılar ve Geiger-Müller sayıcıları örnek verilebilir (Tanır, 2013).

Dedeksiyon, gelen radyasyonun etkisinin ya da şiddetinin sayısal ve/veya görüntüsel olarak değerlendirilmesi işlemidir. Nükleer tıpta kullanılan dedeksiyon sistemleri de bu prensiplere dayanır ve iyonizasyon prensibi ile çalışan detektörler ve eksitasyon prensibi ile çalışan detektörler şeklinde iki ana grupta incelenir (Demir, 2008).

2.5.2.1. Gaz doldurulmuş dedektörler (iyonizasyon dedektörü)

İnsanlar, iyonlaştırıcı radyasyonu doğrudan hissedemez, koklayamaz, göremez veya tadamazlar. Bu nedenle radyasyonun tespiti ve ölçümü, tamamen özel cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilmek zorundadır. Radyasyonun gaz ortamlar üzerindeki iyonlaştırıcı etkisinden yararlanılarak geliştirilmiş çeşitli dedektör türleri bulunmaktadır. Bu dedektörlerde oluşan iyon çiftleri ayrı ayrı toplanarak ölçüm gerçekleştirilir. Gazla doldurulmuş bir iyon odasında, iki elektrot arasına bir potansiyel farkı uygulandığında, pozitif yüklü iyonlar katoda, negatif yüklü iyonlar (elektronlar) ise anoda doğru hızla hareket eder. Bu hareket sonucunda ölçülebilir bir elektrik darbesi oluşur. Elde edilen bu darbeler, ilgili cihazlar tarafından entegre akım şeklinde kolaylıkla ölçülebilir (Yücel, 2017).

Üç ana iyonizasyon dedektör türü vardır:

1. İyonizasyon Odası
2. Orantılı Sayacılar
3. Geiger-Müller Sayacı (Abdlhamed, 2018).

1. İyonizasyon Odası

İyon odası, radyasyonun neden olduğu iyonizasyonu gaz amplifikasyonu olmadan ölçebilen en basit dedektörlerden biridir. İyon odalı sayaçlar, iyon odası, elektronik devre ve gösterge ünitesi olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Bu cihazlar genellikle $500-1000 \text{ cm}^3$ hacminde metal bir oda ve yalıtılmış iki plaka içerir. Plakalar arasına birkaç yüz voltluk bir potansiyel farkı uygulanır (Demir, 2008).

İyon odasına giren iyonlaştırıcı radyasyon, gaz ortamını iyonlaştırır. Elektrotlar arasına uygulanan potansiyel farkı sayesinde oluşan iyonlar bir elektrik akımı meydana getirir. Bu akım, hassas bir elektrometre yardımıyla ölçülerek mikro-ampermetre ile kaydedilir (Demir, 2008). Mikro-ampermetre, genellikle mili-röntgen/saat birimine kalibre edilmiştir. Elektrotlar arasına uygulanan gerilim, doyumluk iyonizasyon akımının elde edilmesine olanak tanıyacak kadar yüksek olmalıdır. Bu sayede cihaz, ortamda bulunan radyasyon miktarını ve radyoaktif madde miktarını doğru bir şekilde belirleyebilir (Demir, 2008).

Bu tür cihazlar, radyasyon parçacıklarını tek tek saymaz. Bunun yerine detektör içerisindeki toplam iyonizasyon miktarını ölçer. Dedektör içindeki gaz basıncı genellikle atmosfer basıncına eşittir. Yüksek basınçlı iyon odaları, özellikle gama radyasyonunun ölçümünde kullanılır. Ayrıca, iyon odaları ile özgül iyonizasyonu yüksek olan alfa parçacıkları tek tek sayılabilir ve enerjileri ölçülebilir. Ancak, beta parçacıklarının enerjileri iyon odaları ile ölçülemez (Yücel, 2017).

2) Orantılı Sayıcılar

Orantılı sayıcılar, alfa ve beta ışınlarını tespit etmek, bu parçacıkların enerjilerini ölçmek ve farklı radyasyon türleri arasından belirli enerji seviyelerine sahip olanları seçip saymak için en uygun dedektörlerden biridir. Bu cihazlar arasında dipten pencereless ve penceresiz gaz akışlı orantılı sayıcılar en yaygın olarak kullanılan türlerdir.

Orantılı sayıcılar, genellikle 1500-4000 volt aralığında bir çalışma gerilimi ile çalışır ve gaz amplifikasyon faktörü 10^5 ile 10^6 seviyesindedir (Tanır, 2013).

3) Geiger-Müller Sayıcıları

Geiger-Müller sayacı, iyonlaştırıcı radyasyonu tespit etmek ve ölçmek amacıyla kullanılan bir dedektördür (Şekil 2.13). Cihaza adını veren Geiger-Müller tüpü, içerisindeki düşük basınçlı gaz ortamında meydana gelen iyonizasyon olayını

kullanarak alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınlarının neden olduğu nükleer ışımalara karşı duyarlılık sağlar (Krane, 1987).



Şekil 2.13. Geiger-Müller Sayacı.

Geiger-Müller sayacı, Geiger-Müller tüpü ve işlemci ile ekran elektronik devreleri olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Radyasyonu algılayan temel eleman, genellikle helyum, neon veya halojen katkılı argon gibi âtıl gazlarla doldurulmuş Geiger-Müller tüpüdür. Bu tüp, iyonlaştırıcı parçacıklar veya foton radyasyonu gaz içerisindeki atomları iyonlaştırdığında iletken hale gelir ve elektrik yükü aktarımını sağlar. Geiger-Müller tüpü, her bir iyonizasyon olayını Townsend çığ etkisi ile yükselterek, kolaylıkla ölçülebilen ve elektronik devreler aracılığıyla kaydedilebilen bir elektriksel darbe üretir (Tanır, 2013).

2.5.2.2. Sintilasyon dedektörü

Sintilasyon sayacı, özellikle gama ışınlarının tespitinde yaygın olarak kullanılan, yüksek verimliliğe ve uygun enerji çözünürlüğüne sahip bir dedektördür. Bu dedektörün en önemli özelliklerinden biri, yayılan fotonların enerjisinin gelen radyasyonun enerjisiyle orantılı olmasıdır. Bu özellik sayesinde gelen radyasyonun türü ve enerjisi hakkında bilgi edinmek mümkündür (Knoll, 2010). İdeal bir sintilasyon malzemesinin sahip olması gereken özellikler şunlardır:

- Yüklü parçacıkların kinetik enerjisini, yüksek sintilasyon verimliliğiyle algılanabilir ışığa dönüştürebilmelidir.
- Üretilen ışığın miktarı, biriken enerjiyle mümkün olduğunca orantılı olmalıdır.

- Kullanılan ortam, iyi bir ışık toplama verimi sağlamak için emisyon dalga boyuna karşı şeffaf olmalıdır.
- Sintilasyonun bozunma süresi kısa olmalı ve hızlı sinyal darbeleri üretebilmelidir.
- Malzeme, yüksek optik kaliteye sahip olmalı ve endüstriyel ölçekte kullanılabilecek boyutlarda üretilebilmelidir.
- Sintilasyon ışığının bir foto-çoğaltıcı tüpe veya diğer ışık sensörlerine etkin bir şekilde iletilebilmesi için kırılma indisi caminkine (yaklaşık 1,5) yakın olmalıdır (Knoll, 2010).

Radyasyonun enerjisi, iletim bandındaki uyarılmış elektronlar aracılığıyla en az bir kez valans bandına dönüş yapar ve bu süreçte bir foton yayılır. Bu foton, foto-katoda ulaştığında fotoelektrik etki oluşturur ve foto-katottan elektronların salınmasına yol açar. Salınan bu elektronlar foto-çoğaltıcı tüp içerisindeki elektrotlar arasında hızlandırılıp çoğaltılarak çıkış sinyali oluşturur (Knoll, 2010).

Günümüzde en yaygın kullanılan sintilasyon dedektörleri arasında talyum katkılı sodyum iyodür (NaI) ve yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörleri yer almaktadır. NaI(Tl) sintilatörleri (Şekil 2.14), gama radyasyonunu tespit etmede yüksek verimlilik sağlaması ve soğutma gerektirmemesi nedeniyle en sık tercih edilen dedektörlerdir. Buna karşın, HPGe dedektörleri üstün enerji çözünürlüğü sunmaları sayesinde özellikle hassas enerji ölçümlerinin gerekli olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Tanır, 2013).

Farklı uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan sintilasyon dedektörleri üç gruba ayrılır:

- İnorganik sintilatörler (NaI (Tl), CsI (Tl), CsI (Na), LaBr₃ (Ce) vb.)
- Organik sintilatörler (Antrasen kristali, POPOP sıvısı, Stilben Kristali vb.)
- Plastik sintilatörler (NE102A, BC400, BC406, vb.). (Tanır, 2013)



Şekil 2.14. Sintilasyon Dedektörü (Tabar, 2025).

2.5.2.3. Yarı İletken dedektörleri

Yarı iletken dedektörleri, yoğunlukları ve mükemmel çözme güçleri ile hızlı pulslar (tipik olarak birkaç nanosaniye) üretmeleri sayesinde foton dedekte etmede yüksek verimliliğe sahip bir dedektör türüdür (Taner, 2013).

Gama ışını, yarı iletken dedektör malzemesine çarptığında enerjisini bırakarak yok olur ve çarpıştığı atomdan enerjisi yüksek bir fotoelektron koparır. Yarı iletkenlerde oluşan iyonizasyon sonucunda iki tip yük taşıyıcısı meydana gelir: negatif yüklü elektronlar ve pozitif yüklü holler. Bu yük taşıyıcılarının elektrotlara doğru yönlendirilmesi için bir elektriksel potansiyel uygulanır. Böylece, elektronlar pozitif elektrota, holler ise negatif elektrota doğru hareket eder. Bu işlem, yarı iletkeni çarpan her bir gama ışını için tekrarlanır ve gama ışını doğrudan ölçülebilir bir elektronik sinyale dönüştürülür (Krane, 2019).

Kullanılan başlıca yarı iletken malzemeler şunlardır:

- Silikon (Si)
- Germanyum (Ge)
- Civa İyodür (HgI_2)
- Kadmiyum Tellür (CdTe)
- Kadmiyum Çinko Tellür (CdZnTe) (Krane, 2019).

Günümüzde, yarı iletken dedektörlerin gama kameralarının yerini alması beklenmektedir. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans (MR) görüntüleme sistemlerinde sağlanan yüksek başarı düzeyinin, nükleer tıp uygulamalarında da yarı iletken dedektörlerle yakalanması hedeflenmektedir (Krane, 2019).

2.6. Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Radyasyonun neden olduğu biyolojik etkiler, akut etkiler ve kronik etkiler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. Akut etkiler, yüksek dozda radyasyona maruz kalınmasından kısa bir süre sonra ortaya çıkan ve ölümle sonuçlanabilen ciddi etkilerdir. Buna karşılık, kronik etkiler ise düşük dozlarda uzun süreli maruziyetin sonucunda yıllar sonra bile ortaya çıkabilir. Kronik etkiler, hücre hasarına yol açarak hücrelerin kendini yenileme yeteneğini engeller veya yavaşlatır. Bu durum kanser gibi ciddi hastalıkların gelişimine zemin hazırlar (Abdlhamed, 2018). Radyasyonun yol açtığı bu zararlı etkiler, deterministik ve stokastik etkiler olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.5) (TAEK, 2017).

Tablo 2.3. Radyasyonun deterministik ve stokastik etkileri (TAEK, 2017).

Deterministik Etkiler	Stokastik Etkiler
Ölüm, Cilt Yanıkları Katarakt, kısırlık	Kanser, genetik etkiler

Yüksek enerjili nükleer radyasyonlar, hücre içerisinde iyon çiftleri ve uyarılmış atomlar oluşturarak hücre yapısında önemli değişimlere yol açar. Bu iyon ve atomların oluşumu, radyasyonun hücre tarafından soğurulmasına neden olur, sonunda çeşitli biyokimyasal reaksiyonlar başlar. Bu süreç, hücrede yapısal ve işlevsel düzensizliklerin ortaya çıkmasına yol açar (TAEK, 2017). Hücrelerin kısa sürede çok yüksek dozda radyasyona maruz kalması, ciltte yanıklar ve kızarıklıklar gibi akut etkiler ile üreme organlarını etkileyerek kısırlığa da yol açabilir. Bu tür etkiler, radyasyonun deterministik etkileri olarak tanımlanır (TAEK, 2017). Deterministik etkilerin şiddeti, alınan dozun büyüklüğü ve maruziyet süresine bağlıdır. Buna karşılık, radyasyonun stokastik etkileri ise genetik mutasyonlara ve kalıtsal hastalıklara neden olabilen, uzun vadede ortaya çıkan ve nesiller boyunca aktarılabilen etkilerdir. Stokastik etkiler arasında en ciddi sonuçlardan biri de kanser gelişimidir. Ancak, bir hücrede gelişen kanserin doğrudan radyasyona bağlı olduğu kesin olarak söylenemez (TAEK, 2017).

Alfa (α) ve beta (β) parçacıkları, yüklü parçacıklar oldukları için doğrudan iyonlaştırıcı etkiler gösterirler. Bu parçacıklar genellikle üst dokularla etkileşime girer ve derin dokulara nüfuz edemezler. Üst dokuda birikerek deterministik etkilere, özellikle de cilt yanıklarına neden olurlar. Buna karşılık, gama (γ) ışınları ve nötronlar yüksüz

olduklarından, vücut dokularının daha derin katmanlarına ulaşabilir ve burada kalıcı genetik bozukluklar ile ciddi biyolojik hasarlara yol açabilirler (Akyıldırım, 2011).

2.7. Radyasyondan Korunma

Canlı organizmalar, günlük yaşamları boyunca sürekli olarak belirli düzeylerde radyasyona maruz kalmaktadır. Ancak bu maruziyet, doğrudan ve herhangi bir koruma olmaksızın uzun süre devam ederse, ciddi biyolojik riskler ortaya çıkabilir. Bu nedenle, radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak büyük önem taşımaktadır.

Radyasyondan korunmada temel alınan üç ana ilke bulunmaktadır: zaman, mesafe ve zırhlama. Maruz kalınan radyasyonun etkisini azaltmak için, radyasyon kaynağıyla temas süresi mümkün olduğunca kısa tutulmalı, kaynakla mesafe artırılmalı ve uygun zırhlama malzemeleri kullanılarak radyasyonun etkisi en aza indirilmelidir (Krane, 2019). Şekil 2.15'te radyasyondan korunma yolları görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2.15. Radyasyondan Korunma Yolları (Knoll,2010).

2.7.1. Zaman kuralı

Radyasyondan korunmada en temel ve en kolay uygulanabilir kural, maruziyet süresinin en aza indirilmesidir. Radyoaktif kaynakların kullanıldığı uygulamalarda, alınan dozun mümkün olan en düşük seviyede tutulması için “*ALARA (As Low As Reasonably Achievable)*” yani “*Makul Olarak Elde Edilebilecek En Düşük Düzey*” ilkesi esas alınmalıdır. Bu kapsamda, radyasyonla yapılan işlemler mümkün olan en kısa sürede tamamlanmalıdır (Turner, 2008).

Radyasyona maruz kalan bir maddenin soğurduğu doz, maruziyet süresine bağlı olarak değişiklik gösterir. **A** aktivitesine sahip bir kaynaktan **r** mesafesinde maruz kalma hızı (birim zamanda maruz kalınan doz) aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$\Delta x = \Gamma \frac{A}{r^2} \Delta t \quad (2.16)$$

2.7.2. Mesafe kuralı

Alfa ve beta gibi parçacık (partikül) radyasyonlarının serbest hareket mesafeleri havada dahi oldukça kısadır. Buna karşılık nötron ve gama radyasyonları daha uzun mesafeler kat edebilir. Ancak bu radyasyon türlerinin yoğunlukları mesafeyle birlikte azalır. Bu nedenle radyasyonun zararlı etkilerinden korunmanın en etkili yöntemlerinden biri radyasyon kaynağından mümkün olduğunca uzak durmaktır.

Maruz kalınan radyasyon miktarı, ters kare yasasına göre mesafeyle orantılı olarak azalır. Bu durumu açıklamak için kaynaktan aynı anda yayılan ışınların belirli bir zaman sonra r yarıçapında küresel bir dalga cephesi oluşturduğu varsayılabilir. Böylece küresel yüzey üzerinde birim alana düşen radyasyon yoğunluğu, kaynağın başlangıçtaki yoğunluğu I_0 ile küre yüzey alanı arasında ters orantı vardır. Yani, mesafe arttıkça birim alandaki radyasyon yoğunluğu hızla azalır (Krane, 1987).

$$I \propto \frac{I_0}{4\pi r^2} \quad (2.17)$$

Burada I , r mesafesindeki radyasyon yoğunluğudur. Ayrıca, bir d_2 mesafesindeki D_2 doz hızı başka bir d_1 mesafesindeki D_1 doz hızından d_1 mesafesindekinden daha küçüktür (Knoll, 2010)

($d_1 < d_2$).

$$D_2 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right) D_1 \quad (2.18)$$

2.7.3. Zırhlama kuralı

Zırhlama, radyasyonun etkilerini tamamen ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla radyasyon kaynağı ile korunması gereken sistem ya da birey arasında bir bariyer oluşturma yöntemidir. Zırhlamanın temel amacı yayılan radyasyonun zırh malzemesinin atomları ile etkileşime girerek enerjisinin tamamını veya bir kısmını kaybetmesini sağlamaktır. Bu etkileşim sayesinde radyasyonun zararlı etkileri azaltılır.

Zırhlama malzemesinin seçiminde radyasyonun türü ve enerjisi büyük önem taşır. Çünkü nükleer radyasyonun madde ile etkileşim mekanizmaları sahip oldukları yük, kütle ve enerjiye bağlı olarak farklılık gösterir. Dolayısıyla kullanılacak zırhlama malzemesi radyasyon türüne uygun olarak belirlenmelidir (Krane, 2019).



3. YÖNTEM VE TEKNİKLER

3.1. Toz Metalurjisi (PM)

Toz metalurjisi (powder metallurgy- PM), metal tozu kullanılarak yeni ürünler üretme sürecidir. Tozlar, alaşımları üretmek için sıkıştırılır ve ardından bir dizi ısıtma işlemi yapılır. Bu işlem yüksek üretkenlik sağlar ve karmaşık geometrilere sahip nesneler üretmek için idealdir (Ekici, 2024).

Toz metalurjisi üretim yönteminde karıştırma işlemi, prosesin temel ve kritik adımlarından biridir. Üretim sürecinde toz karışımları kullanıldığından, presleme öncesinde bu tozların homojen bir şekilde karıştırılması büyük önem taşır. Toz karışımının homojen olmaması, üretim sonrasında istenilen malzeme özelliklerinin elde edilmesini engelleyebilir. Bu nedenle, toz metalurjisi prosesi, karıştırma aşamasıyla başlamakta ve bu aşamada sağlanacak homojenlik, nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir (Ekici, 2010).

Toz karışımları hazırlanırken karışım içerisine tozların birbirine yapışmasını kolaylaştırmak ve presleme işlemi sırasında sürtünmeyi azaltmak amacıyla belirli oranlarda yağlayıcı ve bağlayıcı maddeler ilave edilir. Yağlayıcıların kullanılmasındaki temel amaç presleme esnasında toz partikülleri arasındaki ve toz ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltarak numunenin kalıptan kolayca çıkarılmasını sağlamaktır (Ekici, 2010). Yağlayıcı veya bağlayıcıların kullanılmaması durumunda tozların kalıp içinde homojen bir şekilde dağılması zorlaşır ve preslemeden sonra numunenin çıkarılması için daha yüksek kuvvet gerektirir. Ayrıca homojen dağılmayan tozlar nedeniyle numune içinde farklı bölgelerde farklı yoğunluklar oluşur ve bu durum sinterleme esnasında distorsiyon (şekil bozulması) gibi istenmeyen yapısal problemlere yol açar (Ekici, 2010). Bununla birlikte yağlayıcı ve bağlayıcıların fazla miktarda kullanılması da olumsuz etkilere sebep olabilir. Sinterleme sırasında bu katkı maddelerinin numuneden uzaklaşması sonucu yapıda boşluklar oluşabilir ve homojen bir yapı sağlanamayabilir. Bu durum malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin istenilen değerlere ulaşmasını engeller (Ekici, 2010). Bu nedenle, yağlayıcı ve bağlayıcıların kullanım oranlarının dikkatli bir şekilde

kontrol edilmesi gerekmektedir. Genel kanı bu oranın %0,5 ile %1,5 arasında tutulması gerektiği yönündedir (Alpugan, 1981; Ekici, 2010). Yağlayıcı kullanılmayan durumlarda ise kalıp yüzeyinin yağlanması suretiyle numunenin kalıptan daha kolay çıkarılması sağlanabilir.

3.1.1. FeB bazlı alaşımların toz metalurjisiyle üretimi

Bu çalışmada Demir tozu, Ferrobör tozu, Bakır ve Karbon tozları karıştırılmıştır. Kullanılan tozlar Demir tozu (~200 mesh, %99) Alfa Aesar, Bakır tozu (~150 mesh, %99,5) Thermo Scientific Chemicals, Ferrobör (~325 mesh, %94) BC teknoloji ve Karbon tozu (~200 mesh, %99,99) Merck teknoloji firmalarından temin edilmiştir. Malzemelerin yoğunluğu, daldırma sıvısı olarak saf su ($\rho=1,00 \text{ g/cm}^3$) kullanılarak Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Katı bir örneğin yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

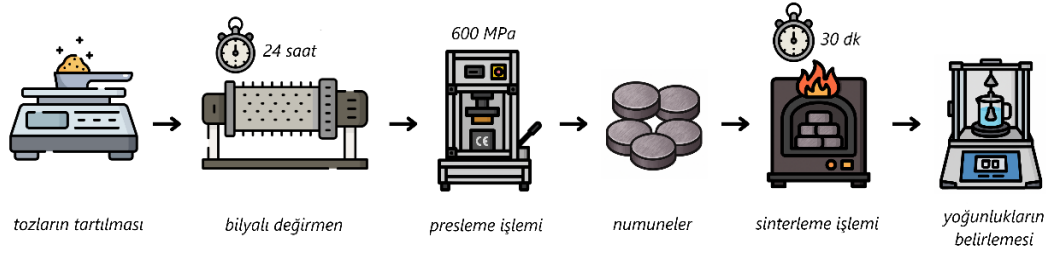
$$\rho = \frac{m_A}{m_A - m_L} \rho_L \quad (3.1)$$

Burada, m_A ve m_L sırasıyla numunelerin havada ve saf su içindeki kütlelerini, ρ_L ise daldırma sıvısı (saf su)'nın yoğunluğunu ifade etmektedir. Tablo 3.1' de bulunan yoğunluklar ve numunelerin içerikleri verilmektedir.

Tablo 3.1. Numunelerin içerikleri ve yoğunlukları.

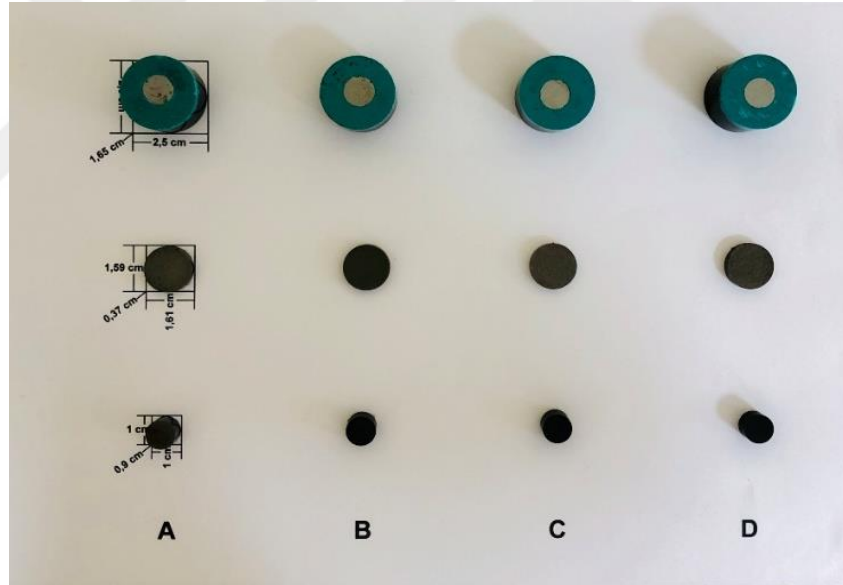
Numune	Fe	FeB	Cu	C	Yoğunluk (g/cm ³)
A	%100				6,707
B	%50	%50			6,715
C	%49	%49	%2		6,995
D	%48,75	%48,75	%2	%0,5	6,792

Numuneler Tablo 3.1'de verilen karıştırma oranlarına göre bilyalı değirmende seramik bilyeler kullanılarak 24 saat boyunca 200 rpm hızla karıştırılmıştır. Aşırı ısınmayı önlemek için her saatin sonunda 30 dakikalık bekleme süresi uygulanmıştır. Tozları karıştırmak için kullanılan bilye sayısı ile tozlar arasında 20:1 oranı vardır. Yani 20 g toz için 1 g bilye kullanılmıştır. Karışım homojen olabilmesi için kullanılan seramik bilyelerin boyutları farklı boyutlarda seçilmiştir. Karıştırma işlemi sonrasında numune üretimi için 600 MPa presleme basıncı kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Toz metalurjisi kullanarak numune üretimi.

Yoğunluk ölçümü, mikroyapı incelemeleri, XRD analizleri ve radyasyon zırhlama özellikleri incelenecek olan numuneler, farklı boyut ve yüksekliklerde silindirik formda hazırlanmıştır. Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için kalıp iç yüzeyleri aseton içeren çinko stearat ile yağlanmıştır. Presleme sonrasında numuneler azot atmosferinde 1200°C sıcaklıkta, 30 dakika süreyle sinterleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.1). Sinterleme sonucunda elde edilen numuneler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Üretilen Fe ve FeB katkılı malzemeler. En üstte (2,5x2,5x1,65) cm ölçülerde bakalit kaplı hali, ortada (1,61x1,59x0,37) cm ölçülerde soğuk presli hali, en altta (1,0x1,0x0,9)cm ölçülerde soğuk presli hali.

3.2. Mikroyapı İnceleme Teknikleri

3.2.1. X-ışını difraktometresi

X-ışını kırınım (XRD) yöntemi, kristal yapı malzemelerin analizinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız bir karakterizasyon tekniğidir. Bu yöntem, her kristal fazın kendine özgü atomik dizilimine bağlı olarak x-ışınlarını belirli bir düzen içerisinde

kırması esasına dayanır. Her bir kristal faza özgü kırınım profilleri, o faz için karakteristik bir “parmak izi” niteliği taşır. XRD yöntemi, analiz sırasında numuneye herhangi bir zarar vermez ve çok az miktardaki numunelerle dahi hassas ölçümler yapılmasına olanak sağlar. Bu sayede kayaçlar, kristal yapıya sahip malzemeler, ince filmler ve polimerler gibi farklı türdeki malzemelerin nitel ve nicel analizleri gerçekleştirilebilir (Güler, 2022).

Kristal yapıyı oluşturan atomlar, gelen x-ışını demetini farklı yönlerde saçar. Bu saçılma sırasında bazı yönlerde x-ışınları birbirini yok ederek yıkıcı girişim, bazı yönlerde ise birbirini güçlendirerek yapıcı girişim (difraksiyon) meydana getirir. Difraksiyon yalnızca Bragg denkleminin sağlandığı geliş açılarında oluşur. Bragg denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$n.\lambda = 2.d.\sin \theta \quad (3.2.)$$

Burada, d düzlemler arası mesafeyi, θ düzleme gelen ve yansıyan ışınlarla düzlem arasındaki açıyı, λ x-ışınının dalga boyunu ve n yansıma mertebesini ifade etmektedir (Demirezen, 2014).

XRD tekniği, alaşımların yapısal özelliklerinin ve faz diyagramlarının incelenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kristal yapıları aynı ve birbirini tamamen eritebilen sistemlerde, alaşımın kristal yapısı bileşen oranlarından bağımsız olarak sabit kalır ve difraksiyon desenlerinin yalnızca pik şiddetleri değişir. Pik konumları ise örgü sabitindeki değişime bağlı olarak kayabilir. Öte yandan kristal yapıları farklı ve birbirini sınırlı oranda eriten sistemlerde, alaşımı oluşturan metallerin farklı bileşim oranlarında kristal yapı ve örgü parametreleri toz desenlerinden tayin edilebilmektedir (Demirezen, 2014).

Bu çalışmada gerçekleştirilen X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Rigaku D-Max 2100 PC model difraktometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Numunelerin kristal faz analizleri, MDI Jade yazılımı aracılığıyla yapılmıştır. X-ışını taramaları, 5-90° 2 θ aralığında ve 2°/dakika tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Rigaku D-Max 2100 PC Model Difraktometre Cihazı.

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Malzeme bilimi alanında malzemelerin mikro yapısal ve morfolojik özelliklerini anlamak çok önemlidir. Mikroskopi bu konuda önemli bir rol oynamış, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte çeşitli mikroskop tipleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) en yaygın kullanılan cihazlardan biridir.

SEM, katı malzemelerin yüzey özelliklerini yüksek çözünürlükte incelemek için yaygın olarak kullanılan bir görüntüleme yöntemidir. Numune üzerine odaklanan bir elektron demetinin numune ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan çeşitli sinyallerin algılanması prensibine dayanır. Odaklanan elektron demeti, elektromanyetik mercekle yardımcıyla ince bir nokta haline getirilerek numune yüzeyi üzerinde satır satır tarama yapacak şekilde yönlendirilir. Tarama sırasında numuneden yayılan elektronlar dedektörler aracılığıyla toplanır ve elde edilen sinyaller yoğunluklarına bağlı olarak görüntüye dönüştürülür. Bu sayede numune yüzeyine ait yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir (Goldstein, 2003; Egerton, 2005).

SEM cihazları genellikle yüksek vakum koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Elektronların numune üzerine doğru bir şekilde iletilmesi ve dedektörler tarafından sağlıklı bir şekilde algılanabilmesi için ortamda gaz moleküllerinin bulunmaması gerekmektedir. Bu nedenle iletken olmayan numuneler yüzeydeki yük birikimini önlemek ve görüntü kalitesini artırmak amacıyla altın, platin

veya karbon gibi iletken ince film tabakalarıyla kaplanmaktadır (Goldstein, 2003; Egerton, 2005).

SEM cihazlarındaki elektron demetinin enerjisi genellikle 5 ile 30 keV arasında değişmektedir. Daha yüksek enerjili elektron demetleri numuneye daha derinlemesine nüfuz ederek yalnızca yüzeyden değil alt tabakalardan da bilgi alınmasına olanak tanır. Ancak çözünürlük doğrudan elektron demetinin çapı ile ilişkili olduğundan yüksek çözünürlük elde etmek için genellikle daha düşük enerjiler tercih edilmektedir (Goldstein, 2003; Egerton, 2005).

SEM ile yapılan görüntüleme işlemi tahribatsızdır ve numunenin yapısal bütünlüğünü bozmaz. Bu avantajı sayesinde SEM, metaller, seramikler, polimerler ve biyolojik örnekler gibi çok çeşitli malzeme türlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Goldstein, 2003; Egerton, 2005).

SEM cihazlarının tipik çözünürlüğü 1 ile 20 nanometre aralığındadır. Çözünürlüğü etkileyen temel faktörler

- Elektron demetinin çapı,
- Elektron demetinin enerjisi,
- Numune yüzeyinin iletkenliği,
- Dedektör geometrisi şeklinde sıralanabilir (Goldstein, 2003; Egerton, 2005).

Bu faktörler SEM ile elde edilen görüntülerin kalitesini ve çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Uygun parametrelerin seçilmesi, yüksek çözünürlüklü ve yüzey detaylarının net bir şekilde görülebildiği görüntüler elde edilmesini sağlar.

Çalışmada numunelerin görüntüleri Şekil 3.4'de gösterilen Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan FEI/Quanta FEG 450 model FEG-SEM cihazı kullanılarak alınmıştır. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Field Emission Gun- Scanning Electron Microscopy, FEG-SEM) cihazları, klasik SEM'lere kıyasla alan emisyonlu elektron kaynağı sayesinde daha yüksek çözünürlük ve kontrast sunar. Bu özellikleri sayesinde, özellikle nano ölçekte yapısal analiz gerektiren çalışmalarda daha net ve detaylı görüntüler elde edilmesini sağlar. Numunelerin elementel analizleri ise enerji dağılımlı X ışınları spektroskopisi (EDS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM)’nde bulunan Quanta FEG-450 Model FEG-SEM cihazı.

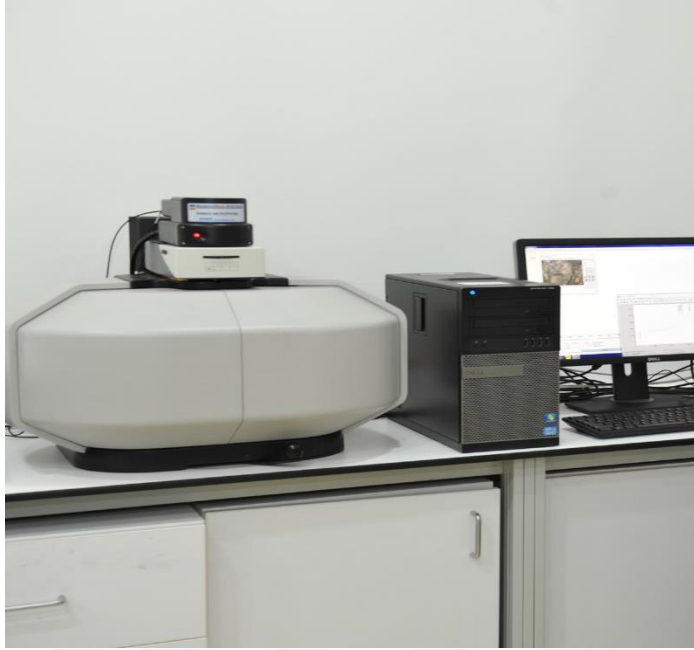
3.2.3. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, bir numunenin monokromatik bir ışık kaynağı (genellikle lazer) ile aydınlatılması ve saçılan ışığın analiz edilmesi prensibine dayanan bir karakterizasyon yöntemidir. Işık, numune ile etkileşime girdiğinde çoğunlukla elastik saçılım (Rayleigh saçılımı) meydana gelir. Ancak, ışığın çok küçük bir kısmı enerjisinde değişim göstererek esnek olmayan bir şekilde saçılır. Bu olaya Raman saçılımı denir ve moleküllerin titreşim, dönme ve diğer düşük frekanslı modlarına ilişkin önemli bilgiler sağlar. Bu özellik sayesinde, her molekül kendine özgü bir “parmak izi” spektrumu oluşturur ve bu spektrum, maddelerin tanımlanması ve kimyasal analizinde etkin bir şekilde kullanılır (Ferraro ve ark., 2003).

Raman mikroskobu, Raman spektrometresi ile optik bir mikroskobun entegre edilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı, numunenin yüksek büyütme görüntülenmesine ve mikroskobik bir lazer odağında Raman analizinin yapılmasına olanak sağlar. Böylece hem yüzey morfolojisi hem de kimyasal bileşim hakkında detaylı ve noktasal analizler gerçekleştirilebilir (Ferraro ve ark., 2003). Raman spektroskopisi, yaklaşık 0,5-1 μm düzeyinde mekansal çözünürlüğe sahip olmasıyla mikroskobik analizlerde de kullanılabilir (Ferraro ve ark., 2003).

Tez çalışmasında üretilen numunelerinin Raman spektroskopi analizleri Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma

Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan Kaiser RAMANRXN1 Mikroprob cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan RAMANRXN1 Mikroprob cihazı.

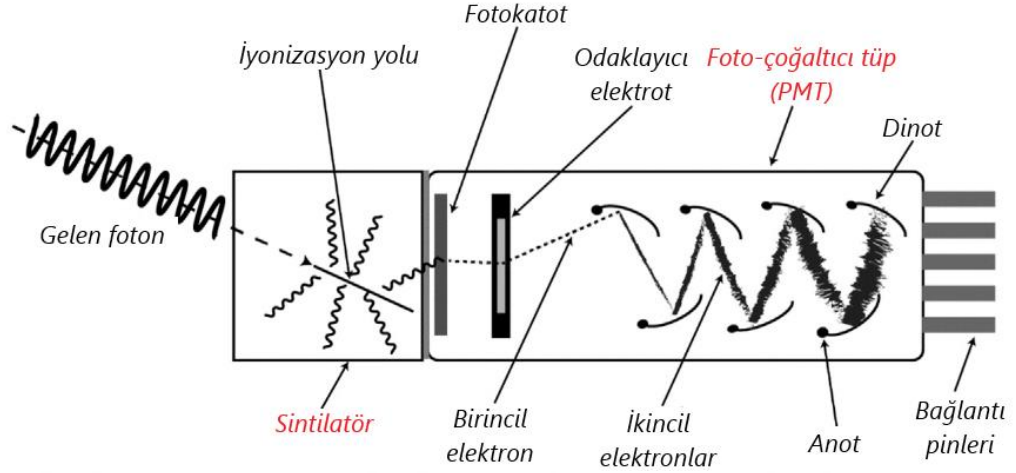
3.3. Gama Zırhlama Özellikleri

3.3.1. Talyum Katkılı Sodyum İyodür (NaI (Tl)) dedektörü

Talyum katkılı sodyum iyodür (NaI(Tl)) dedektörleri, gama fotonlarının dedeksiyonunda kullanılan sintilasyon kristallerine sahiptir. Bu kristaller gama fotonlarıyla etkileştiklerinde foton enerjisine bağlı olarak görünür bölge spektrumunda ışık (sintilasyon) üretir (Tanır, 2013). Oluşan bu ışık dedektöre entegre foto-çoğaltıcı tüpün (PMT) fotokatotuna ulaşır. Işığa duyarlı fotokatot yüzeyine çarpan fotonlar, enerjileriyle orantılı şekilde elektron salınımına neden olur. Bu fotoelektronlar, tüp içinde uygulanan yüksek gerilim farkı ile birinci dinota doğru ivmelenir. Her dinot, üzerine ulaşan birincil elektrona karşılık yaklaşık dört ikincil elektron üretir (Tanır, 2013).

Örneğin, 10 dinotlu bir foto-çoğaltıcı tüpte teorik çoğaltma katsayısı 4^{10} civarındadır. Onuncu dinottan çıkan her sinyal (puls), sintilasyon kristalinde soğurulan gama fotonunun enerjisiyle doğru orantılıdır. Bu pulslar çok kanallı analizör (MCA) tarafından genliklerine göre ayrıştırılarak enerji spektrumu oluşturulur. Spektrum

üzerindeki piklerin konumları gama kaynağının karakteristik enerji düzeylerini belirleyerek radyonüklid tanımlaması yapılmasına olanak tanır (Tanır, 2013).



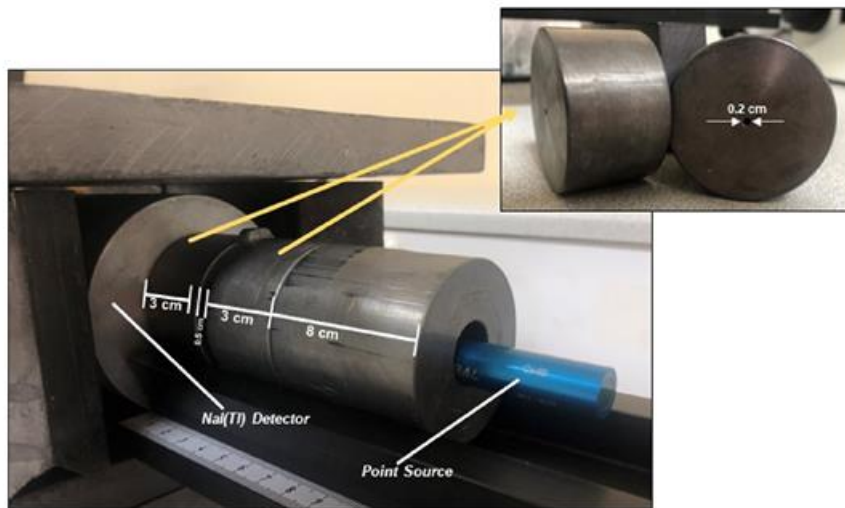
Şekil 3.6. Sintilatör ve foto-çoğaltıcı tüp (PMT) içeren dedeksiyon sisteminin şematik gösterimi (Kerlin ve Upadhyaya, 2019).

Sodyum iyodür kristalleri, yüksek yoğunlukları ve iyot elementinin yüksek atom numarası ($Z=53$) sayesinde gama ışınlarını yüksek dedeksiyon verimiyle soğurabilir. Etkili bir sintilasyon dedektörü tasarımı için kullanılan malzemenin bazı temel özelliklere sahip olması gerekir. Bunlar arasında yüksek optik şeffaflık, büyük hacimlerde üretilme kabiliyeti ve gama fotonlarının enerjisiyle orantılı olarak yüksek ışık çıktısı (ışık verimi) üretme kapasitesi yer almaktadır. Ancak bu kriterleri aynı anda karşılayabilen sintilasyon malzemesi sayısı oldukça sınırlıdır. Bu bağlamda NaI(Tl), uygulamalarda en yaygın tercih edilen malzeme olmuştur. Şekil 3.7’de NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ve foto-çoğaltıcı tüp tabanı (PMT base) gösterilmektedir. PMT tabanı, dinotlar arası voltaj farklarını sağlayarak foto-çoğaltıcı tüpün işlevsel hale gelmesini sağlar. Aynı zamanda anotta toplanan elektriksel sinyallerin analiz sistemine iletilmesine olanak tanır. Bu sayede dedekte edilen gama fotonlarının enerji spektrumu dijital ortamda işlenebilir hale gelir.



Şekil 3.7. NaI (Tl) dedektörü ve foto-çoğaltıcı tüp tabanı.

Bu çalışmada kullanılan gama dedektörü, Sakarya Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Laboratuvarı bünyesinde bulunan ORTEC Inc. marka ve 3"×3" boyutlarında NaI (Tl) kristal dedektörüdür. Tez kapsamında üretilen her bir numune 1,173 MeV ve 1,332 MeV foton yayan bir ^{60}Co radyoaktif nokta kaynağı ile ışınlanmıştır. Gama iletim ölçümü için kullanılan deneysel düzenek Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Çevreden gelmen ışınları önlemek için deneysel düzenek 3 cm kalınlığında kurşun bloklarla yalıtılmış ve ölçümler her bir malzeme için 20 dakika boyunca üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca kurşun bloklarından kaynaklanan olası radyasyonu gerçek ölçümlerden ayıklamak için arka plan çıkarımı da yapılmıştır.



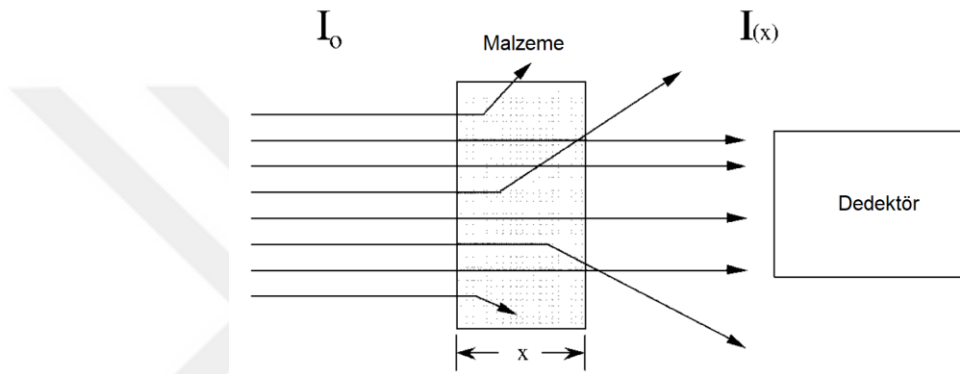
Şekil 3.8. Gama zırhlama özelliklerini belirlemek için kullanılan deneysel düzenek (Ekici, 2024).

3.3.2. Malzemelerin gama radyasyon zayıflama parametreleri

Fotonlar gibi elektromanyetik radyasyonlar belirli bir kalınlıktaki maddeden geçerken radyasyon şiddetinde üstel bir azalma meydana gelir. Bu azalma Lambert-Beer yasasına göre soğurucu maddenin kalınlığı (x) ile orantılıdır ve

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

ifadesi ile verilir (Şekil 3.9). Burada I_0 soğurucu maddeye girmeden önceki radyasyon şiddeti, I ise soğurucu maddeden geçtikten sonraki radyasyon şiddetidir. μ lineer azaltma katsayısıdır ve birimi cm^{-1} 'dir. (Tanır, 2013)



Şekil 3.9. Azalma işlemleri ile foton demetinin değişimi (Tanır, 2013).

Lineer azaltma katsayısının yoğunluğa (özkütleye) oranı kütle azaltma katsayısı (Mass Attenuation Coefficient- MAC)'sını verir:

$$MAC = \frac{\mu}{\rho} \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right) [cm^2 / g] \quad (3.4)$$

Burada ρ maddenin yoğunluğudur ve w_i incelenen elementlerin ağırlık kesridir. MAC ise gelen fotonlarının birim yoğunluktaki maddeyle etkileşime girme olasılığıdır ve birimi cm^2/g şeklindedir (Hoşgör ve Tabar, 2025).

Yarı değerli katman (Half-Value Layer- HVL), gama radyasyonunun yoğunluğunu başlangıç değerinden yarıya indirmek için gereken malzeme kalınlığı olarak tanımlanır ve birimi cm 'dir (Hoşgör ve Tabar, 2025).

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.5)$$

Onuncu değ er katmanı (Tenth-Value Layer- TVL), gama radyasyonunun yoğunluğunu başlangıç değ erinden onda birine indirmek için gereken malzeme kalınlığı olarak tanımlanır ve birimi cm'dir (Hoşgör ve Tabar, 2025):

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (3.6)$$

Ortalama serbest yol (Mean Free Path- MFP), bir fotonun etkileşime girmeden önce kat edebileceği mesafeyi belirtir ve birimi cm'dir (Hoşgör ve Tabar,2025):

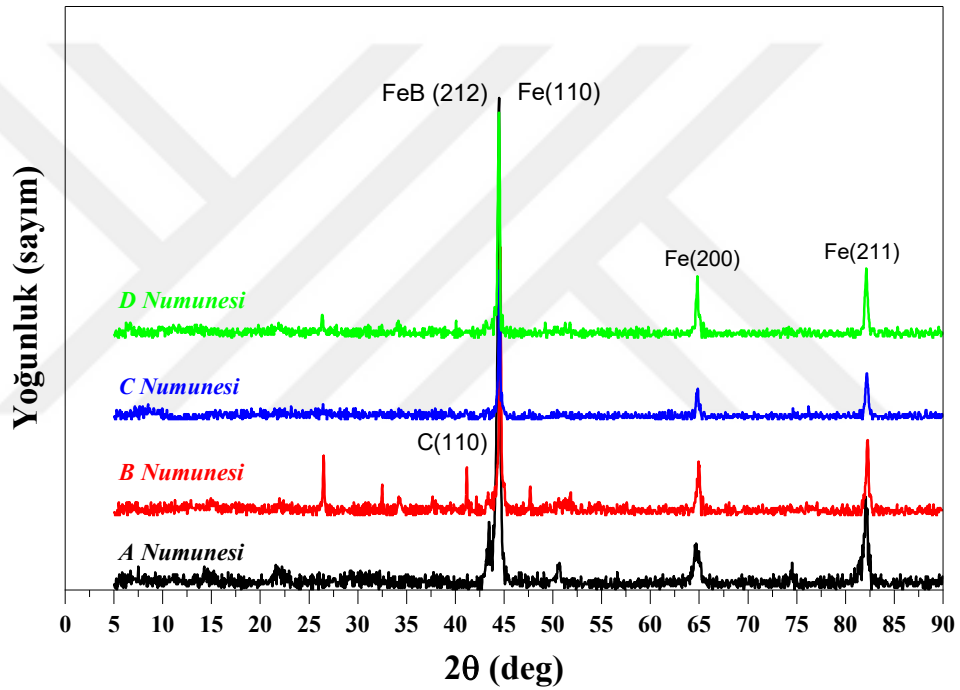
$$MFP = \frac{1}{LAC} \quad (3.7)$$



4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

4.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları

Şekil 4.1’de tez kapsamında üretilen numunelerin XRD analiz sonuçları verilmiştir. Ölçümler Cu-K α ışını ($\lambda=1,54059$ Å) kullanılarak, 5°-90° arası 2 θ tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen piklerin dağılımı ve şiddet değerleri, numunelerin iç yapısı, faz bileşimi ve kristallik özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 4.1. Tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin XRD analiz sonuçları.

A numunesinin XRD deseninde (siyah çizgi) en yoğun pik, 2 $\theta= 44,48^\circ$ açısında ($d=2,0352$ Å) tespit edilmiştir. Bu pik, demir (Fe) matrisine ait karakteristik (110) düzlemine aittir. Ayrıca, 2 $\theta=64,83^\circ$ ve 82,14° açılarında gözlemlenen pikler ise sırasıyla (200) ve (211) düzlemleri ile eşleşmiş ve demirin karakteristik kristal yapısını teyit etmiştir. Bu güçlü ve keskin pikin varlığı malzemenin yüksek kristallik derecesine ve büyük tane boyutuna sahip olduğunu göstermektedir. Düşük açılı bölgelerde (2 $\theta<20^\circ$) tespit edilen düşük şiddetli pikler, yapının amorf faz içeriğine veya olası ara faz oluşumlarına işaret etmektedir.

Şekil 4.1’de B numunesinin XRD deseninde (kırmızı çizgi) en belirgin ve en yüksek yoğunluklu pik, $2\theta = 44,52^\circ$ açısında ($d = 2,0335 \text{ \AA}$) gözlemlenmiştir. Bu pik, demir (Fe) matrisine ait (110) düzlemi ile ilişkilendirilmiş ve yapının büyük oranda demir esaslı bir matris yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, $2\theta = 64,78^\circ$ ve $82,14^\circ$ açılarında sırasıyla (200) ve (211) düzlemlerine ait demir fazları da bulunmuştur. Bu üç yoğun pik, numunede yüksek kristallik derecesine ve demir esaslı fazların baskın olduğuna işaret etmektedir. Numunede ayrıca bor ve karbon katkılarıyla oluşan yeni faz yapılarının varlığı da görülmektedir. Özellikle $2\theta = 26,46^\circ, 42,37^\circ, 44,80^\circ$ ve $49,54^\circ$ açılarında FeB fazına ait karakteristik pikler tespit edilmiştir. Bu pikler sırasıyla (111), (004), (212) ve (114) düzlemleri ile eşleşmektedir. Bu sonuçlar numunede belirgin miktarda bor katkısının bulunduğunu ve bu katkının FeB fazlarının oluşumunu sağladığını göstermektedir. Yapıda karbon katkısının varlığı da XRD deseninde belirgin bir şekilde görülmektedir. $2\theta = 46,37^\circ, 49,20^\circ, 54,11^\circ, 59,01^\circ, 84,17^\circ$ ve $86,04^\circ$ açılarında karbon fazına ait karakteristik pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin düşük şiddette ve geniş tabanlı oluşu yapının kısmen amorf karbon içerdiğini ve kristal yapının homojen olmadığını göstermektedir.

Şekil 4.1’de C numunesinin XRD deseninde (mavi çizgi) en yoğun pik $2\theta = 44,46^\circ$ açısında ($d = 2,0360 \text{ \AA}$) gözlemlenmiş ve bu pik demir (Fe) matrisine ait (110) düzlemi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, $2\theta = 64,81^\circ$ ve $82,14^\circ$ açılarında demirin sırasıyla (200) ve (211) düzlemleri de tespit edilmiştir. Bu yüksek şiddetli ve keskin pikler numunenin büyük oranda demir esaslı kristal bir yapıya sahip olduğunu ve tane boyutunun büyük olduğunu göstermektedir. Numunede ayrıca karbon fazına ait karakteristik pikler de görülmektedir. Özellikle $2\theta = 26,09^\circ, 46,64^\circ, 49,22^\circ, 54,20^\circ, 59,84^\circ$ ve $84,08^\circ$ açılarında karbon fazının (111), (100), (110), (222), (211) ve (110) düzlemleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu piklerin göreceli olarak düşük şiddetli ve geniş tabanlı yapıda olması numunenin kısmen amorf karbon içerdiğini ve kristal yapının homojen olmadığını göstermektedir. Bor fazı ile ilgili herhangi bir spesifik faz doğrudan görülmemiş olsa da XRD deseninde düşük yoğunluklu ve geniş tabanlı piklerin varlığı bor elementinin yapıda amorf veya düşük kristal fazlar halinde bulunduğunu işaret etmektedir.

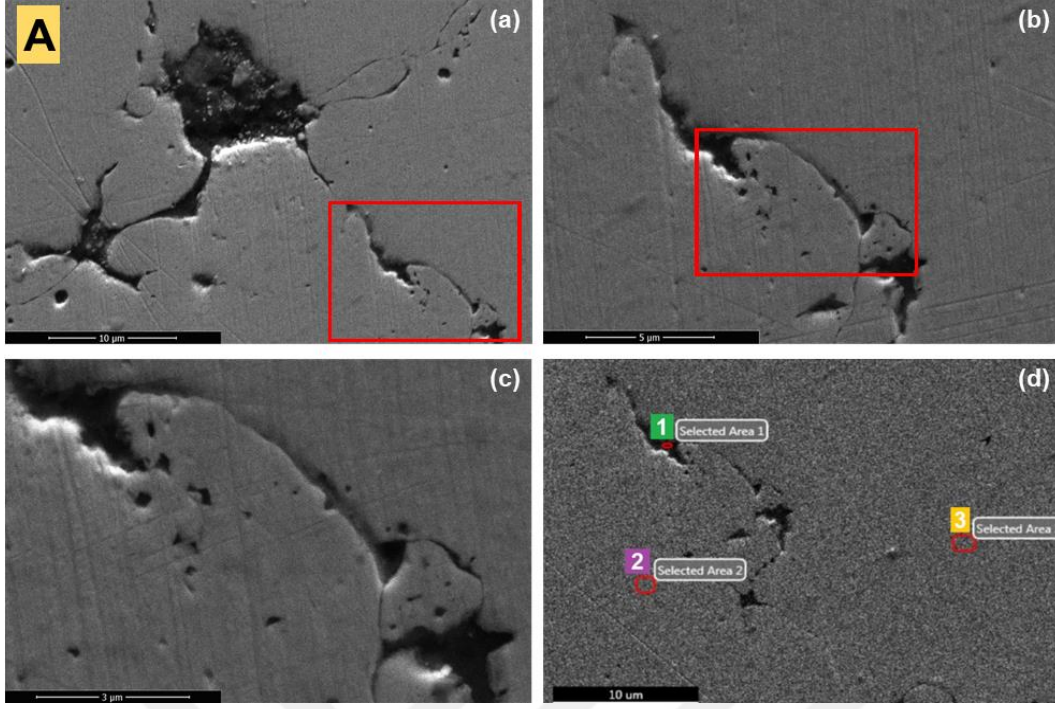
Şekil 4.1’de D numunesinin XRD deseninde (yeşil çizgi) en yüksek yoğunluklu pik $2\theta = 44,53^\circ$ açısında ($d = 2,0326 \text{ \AA}$) belirlenmiş ve bu pik demirin (110) düzlemi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca $2\theta = 64,84^\circ$ ve $82,20^\circ$ açılarında demirin sırasıyla (200) ve

(211) düzlemlerinin varlığı görülebilmektedir. Bu güçlü ve keskin pikler demir matris fazının kristallik oranının yüksek ve tane boyutlarının büyük olduğuna işarettir. Numunede demirin yanı sıra borun oluşturduğu ikincil fazlar da tespit edilmiştir. Özellikle $2\theta=20,81^\circ$, $24,34^\circ$, $26,42^\circ$, $34,64^\circ$, $42,13^\circ$ ve $50,16^\circ$ açılarında FeB fazına ait karakteristik piklerin varlığı görülebilir. Bu pikler sırasıyla (002), (110), (111), (200), (004) ve (220) düzlemleri ile eşleşmiştir. Ayrıca D numunesi için bakır (Cu)'ın (111) ve (200) düzlemlerine ait pikleri sırasıyla $2\theta=43,34^\circ$ ve $50,46^\circ$ açılarında mevcuttur. Elde edilen XRD deseninden bakırın yüzeyde faz ayrımı yaptığı ve segregasyon eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Numunede karbon fazına ait pikler ise $2\theta=46,42^\circ$, $54,28^\circ$, $59,14^\circ$, $65,90^\circ$, $84,51^\circ$ ve $86,20^\circ$ açılarında gözlemlenmiştir. Bu pikler sırasıyla karbonun (100), (222), (211), (221), (110) ve (333) düzlemleri ile ilişkilendirilmiştir. Karbon katkısının yapıda düzensiz bir şekilde dağılmış olduğu, piklerin geniş tabanlı ve düşük şiddetli olmasıyla anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak XRD analizlerinde elde edilen bilgilere göre numunelerin kristal yapısında demir esaslı bir yapı baskın olmakla birlikte bor, karbon ve bakır katkıları ile karmaşık bir faz yapısı oluşmuştur. XRD analizleri katkı elementlerinin mikroyapı üzerindeki etkilerini net bir şekilde göstermiş ve bu etkilerin malzeme performansı açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur.

4.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FEG-SEM) ve Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektroskopisi (EDS) Analiz Sonuçları

Tez kapsamında üretilen 4 farklı numunenin yüzey morfolojisi ve elementer dağılım analizleri Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan FEG-SEM ve EDS cihazları kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.2, Şekil 4.4, Şekil 4.6 ve Şekil 4.8'de dört numuneye ait FEG-SEM görüntüleri, Şekil 4.3, Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.9'da ise EDS sonuçları yer almaktadır.

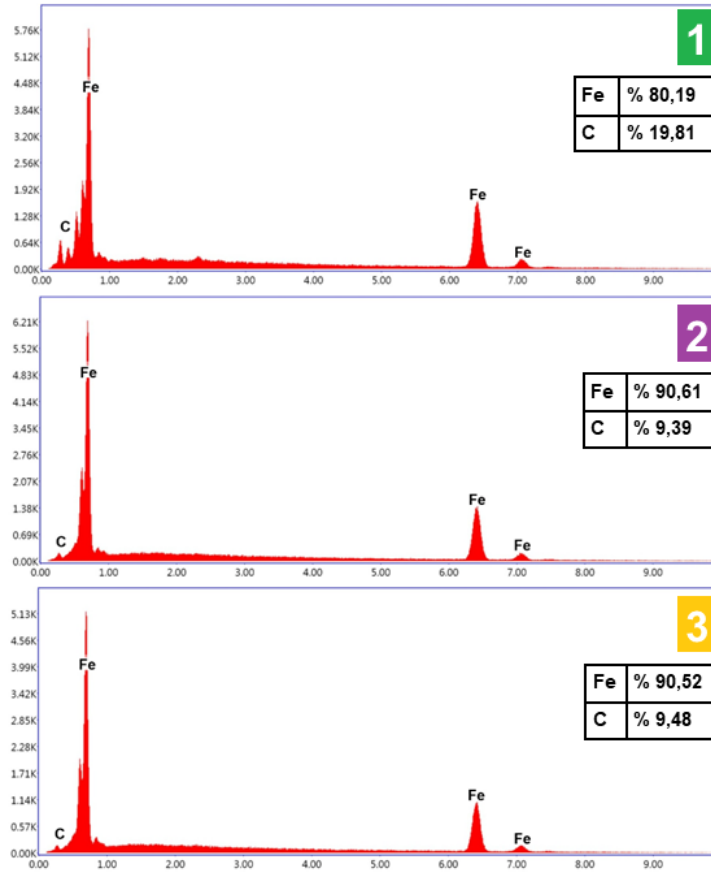


Şekil 4.2. A Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.

Şekil 4.2'de A numunesine ait FEG-SEM görüntüleri verilmiştir. Burada (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. Şekil 4.2 (a)'daki görüntüde geniş bir çatlak ve çevresinde oluşmuş kırılma bölgeleri dikkat çekmektedir. Kırılma yüzeyleri düzensiz bir morfoloji sergilemekte ve çatlak uçlarının keskin olduğu görülmektedir. Bu durum malzemenin gevrek bir kırılma davranışı sergilediğine işaret etmektedir. Şekil 4.2 (b) ve (c) görüntülerinde farklı ölçeklendirmelerle çatlak bölgeleri detaylandırılmış ve kenarlarında ayrılmış mikroyapı parçacıkları tespit edilmiştir. Bu mikroyapısal ayrışmalar muhtemelen termomekanik işlemler veya termal gerilmeler ve mekanik zorlanmalar sonucu oluşmuş olabilir.

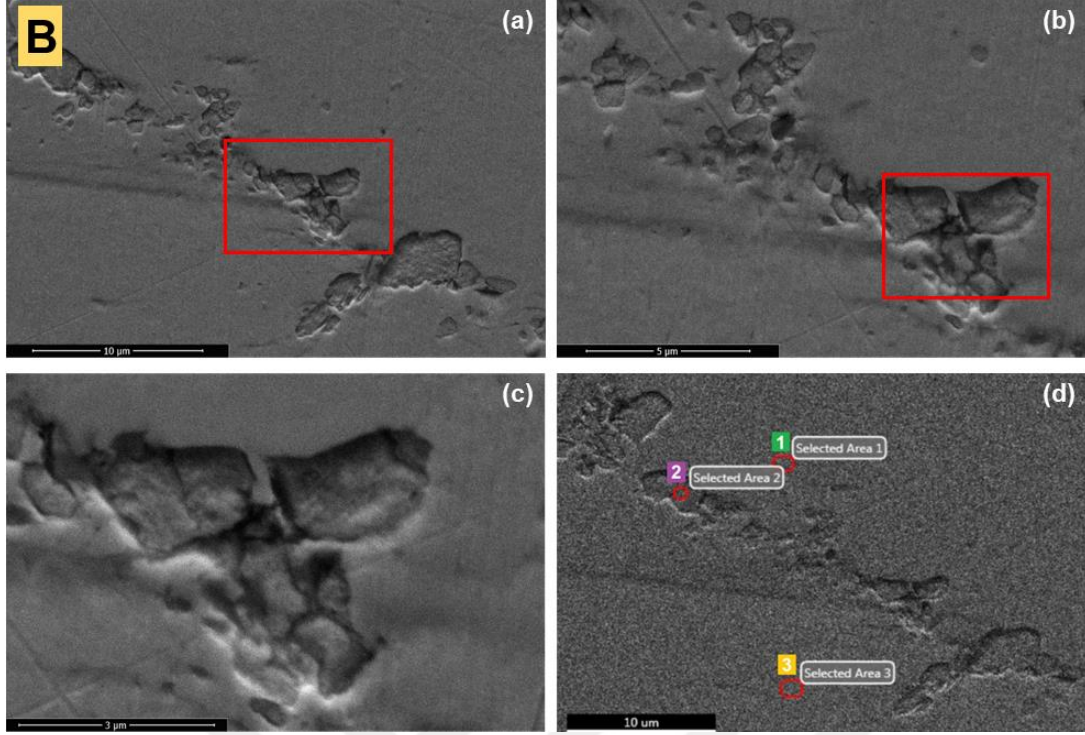
Şekil 4.2. (d)'de EDS analizi için 10 µm ölçek çubuğuna sahip FEG-SEM görüntüsünden seçilen üç farklı bölge (1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge) yer almaktadır. Bu bölgelerde gerçekleştirilen EDS analizlerinin spektrumları ise Şekil 4.3'de sunulmuştur. 1. Bölge'de yapılan EDS analizinde Fe oranının %80,19 ve C oranının ise %19,81 olduğu görülmektedir. Karbon oranının yüksekliği bu bölgede karbonun grafit benzeri bir fazda bulunduğu ihtimalini kuvvetlendirmektedir. Ayrıca bu durum çatlak başlatıcı bir fazın varlığına da işaret etmektedir. 2. ve 3. Bölgelerde ise Fe oranlarının sırasıyla %90,61 ve %90,52, C oranlarının ise %9,39 ve %9,48'dir. Bu

oranlar söz konusu bölgelerde özellikle 1. Bölgeye kıyasla karbon içeriğinin daha düşük olduğunu ve demir matris fazının daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. A numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.2.(d)'de gösterilmiştir.

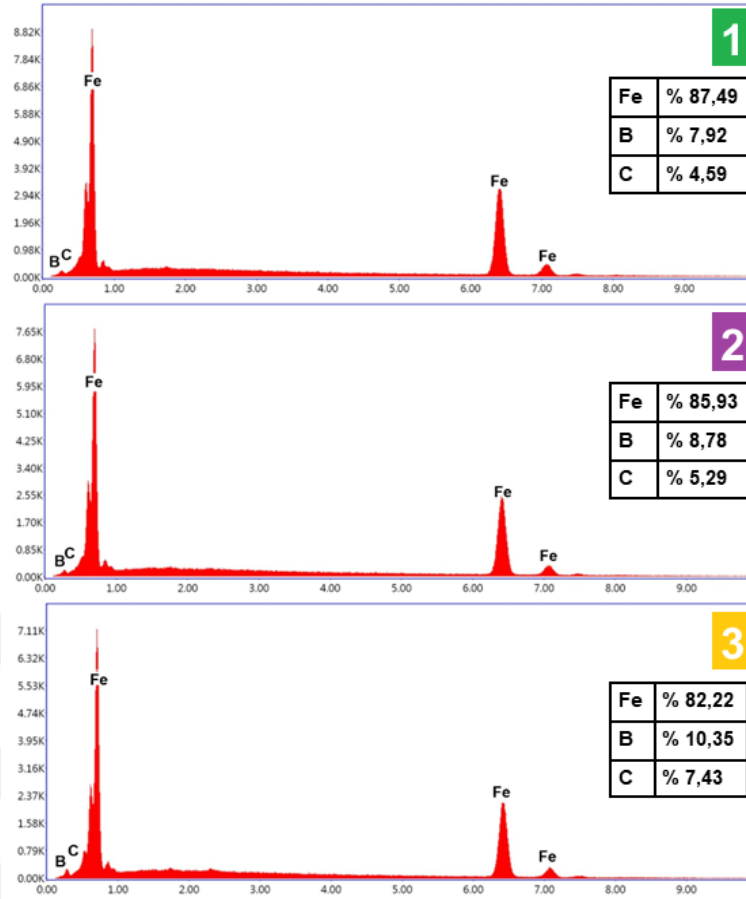
EDS analizleri sonucunda yapının yalnızca demir ve karbon elementlerinden oluştuğu tespit edilmiş ve herhangi bir üçüncü elemente rastlanmamıştır. Karbonun düzensiz dağılımı yapının homojen olmadığını ve belirli bölgelerde karbon zenginleşmesinin meydana geldiğini göstermektedir. Bu tür zenginleşmeler özellikle çatlak uçlarında gerilme yoğunlaşmasına neden olarak çatlak ilerlemesini hızlandırabilmektedir.



Şekil 4.4. B Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.

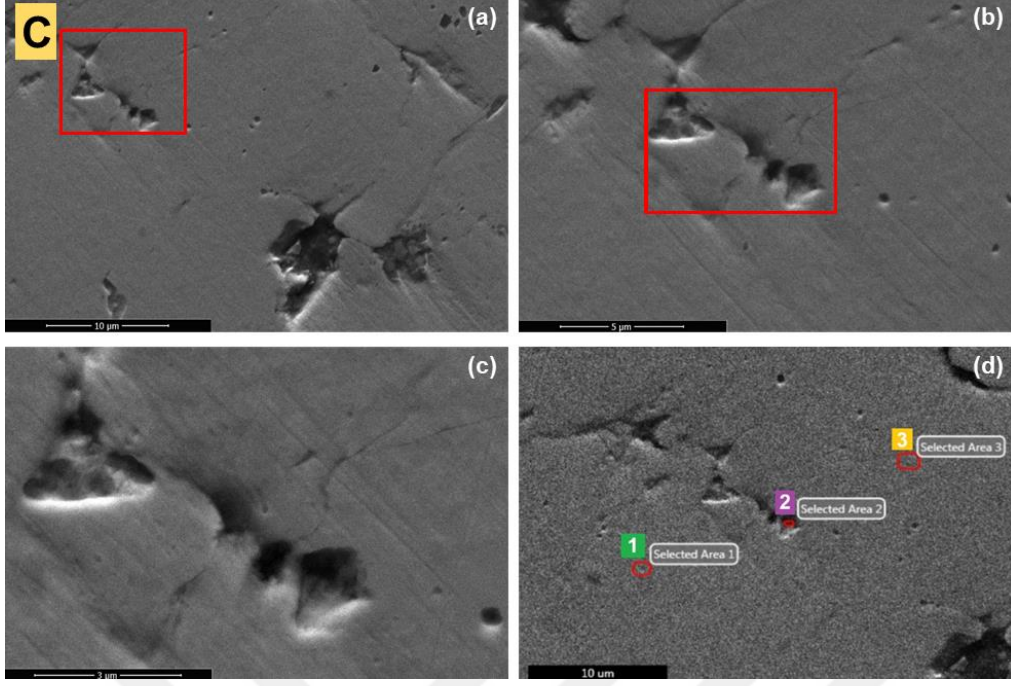
Şekil 4.4'de B numunesine ait FEG-SEM görüntüleri verilmiştir. Burada (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. Şekil 4.4 (a) görüntüsünde yüzeyde belirgin çatlak yapılar dikkat çekmektedir. Bu yapılar malzemenin mikroyapısal özelliklerinde düzensiz dağılım gösterdiğini ve mekanik yüklemelere karşı dirençsiz bölgeler içerdiğini göstermektedir. Şekil 4.4 (b) ve (c) görüntülerinde farklı ölçeklendirmelerle çatlak bölgeleri detaylandırılmış, kopmaların başladığı ve yüzeyde ayrışmaların olduğu tespit edilmiştir. Özellikle çatlak uçlarında ve çevresinde kırılabilirlik belirtileri açıkça gözlemlenmiştir.

Şekil 4.4 (d)'de EDS analizi için 10 µm ölçek çubuğuna sahip FEG-SEM görüntüsünden seçilen üç farklı bölge (1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge) yer almaktadır. Bu bölgelerde gerçekleştirilen EDS analizlerinin spektrumları ise Şekil 4.5'de sunulmuştur.



Şekil 4.5. B Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.4.(d)'de gösterilmiştir.

1. Bölgede yapılan EDS analizinde, demir (Fe) oranı %87,49, bor (B) oranı %7,92 ve karbon (C) oranı %4,59 olarak belirlenmiştir. Bor elementi bu bölgede belirgin bir şekilde tespit edilmiştir ve yüzeyde birikme eğilimindedir. 2. Bölgede Fe oranı %85,93, B oranı %8,78 ve C oranı %5,29'dur. Bor katkısının arttığı bu bölgede karbon içeriği de artış göstermiştir. 3. Bölgede ise Fe oranı %82,22, bor oranı %10,35 ve karbon oranı %7,43 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, bor katkısının yüzeyde segregasyon eğiliminde olduğunu ve bazı bölgelerde yüksek konsantrasyonda toplandığını göstermektedir. B numunesinin yapısında demir matris fazına ek olarak belirgin miktarda bor ve karbon katkısı bulunduğu, bu katkıların malzemenin mekanik performansını ve kırılma davranışını doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır.

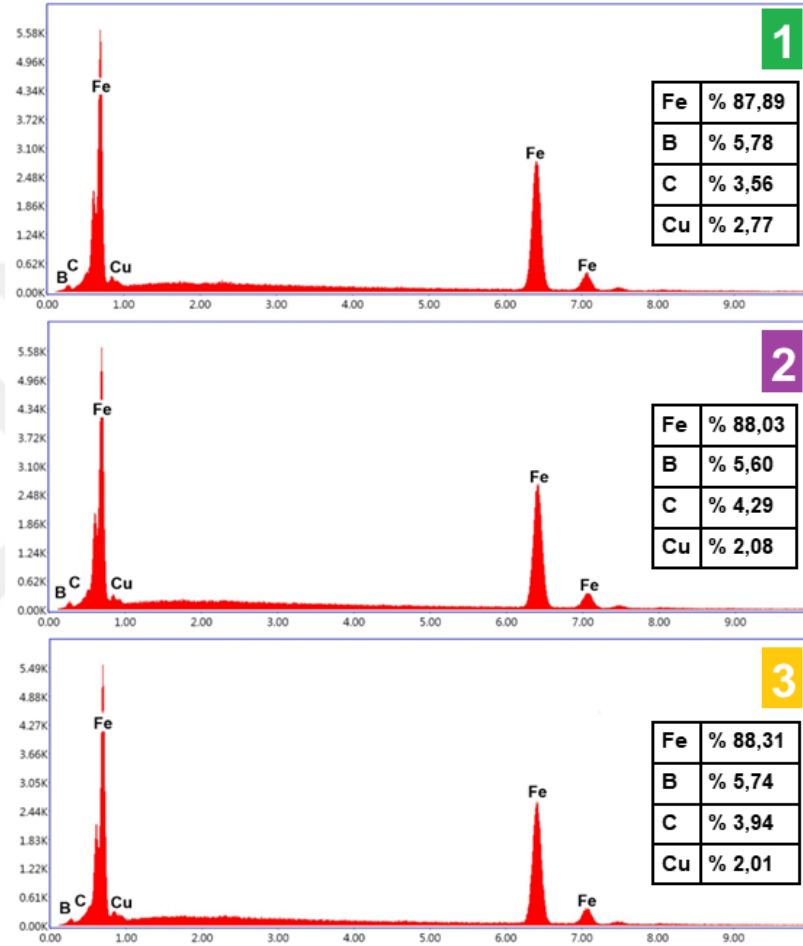


Şekil 4.6. C Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.

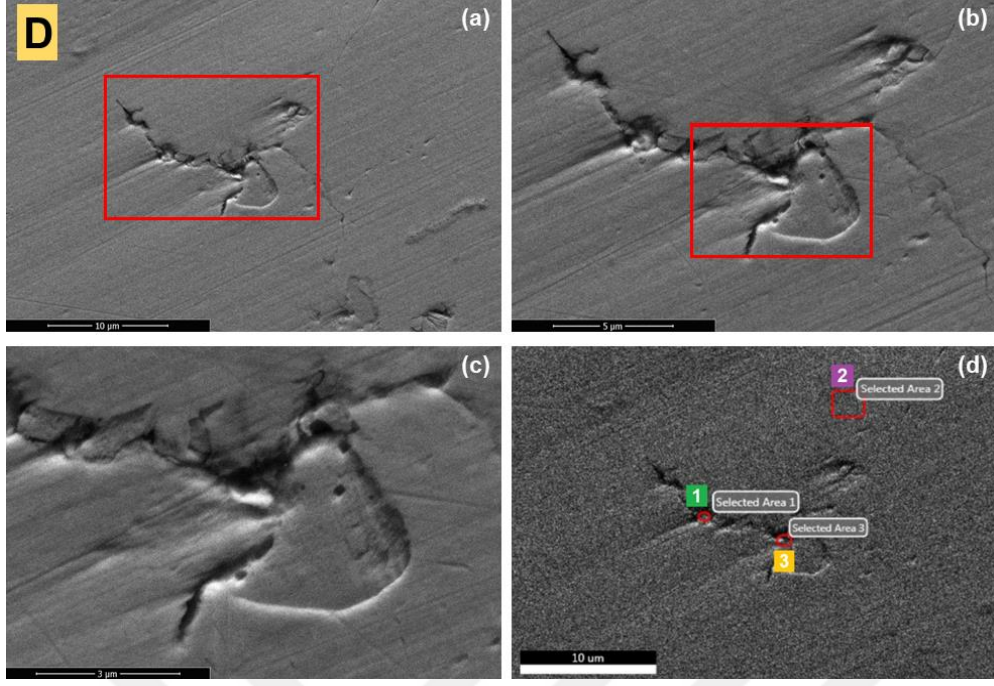
Şekil 4.6'da C numunesine ait FEG-SEM görüntüleri verilmiştir. Burada (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. Şekil 4.6 (a) görüntüsünde, yüzeyde belirgin çatlaklar ve çöküntü bölgeleri tespit edilmiştir. Çatlakların çevresinde keskin kenarlı boşluklar ve düzensiz yüzey topografyası gözlemlenmiştir. Şekil 4.6 (b) ve (c) görüntülerinde farklı ölçeklendirmelerle çatlak bölgeleri detaylandırılmış, çatlak kenarlarının çevresinde kısmi faz ayrışmaları ve malzeme deformasyonlarının yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Şekil 4.6 (d)'de EDS analizi için 10 µm ölçek çubuğuna sahip FEG-SEM görüntüsünden seçilen üç farklı bölge (1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge) yer almaktadır. Bu bölgelerde gerçekleştirilen EDS analizlerinin spektrumları ise Şekil 4.7'de sunulmuştur. C numunesinin Fe matris fazı ile birlikte önemli miktarda bor ve eser miktarda bakır katkısı içerdiği, bu katkıların yapısal özellikler üzerinde belirgin etkiler yarattığı görülmektedir. 1. Bölgedeki EDS analizleri söz konusu bölgede %87,89 oranında demir (Fe), %5,78 oranında bor (B), %3,56 oranında karbon (C) ve %2,77 oranında bakır (Cu) olduğu yönündedir. Elde edilen bu sonuçlar özellikle bakır katkısının belirgin bir seviyede olduğunu göstermektedir. 2. Bölgede ise Fe oranı %88,03, B oranı %5,60, C oranı %4,29 ve Cu oranı %2,08 olarak tespit edilmiştir. Bu bölgedeki analiz sonuçları bor ve bakır katkılarının yüzeyde daha dengeli bir şekilde

dağıldığını göstermektedir. 3. Bölgede ise Fe oranı %88,31, B oranı %5,74, C oranı %3,94 ve Cu oranı %2,01 olarak ölçülmüştür. Bakırın üç bölgede de düşük oranlarda tutarlı şekilde var olduğu ve yüzeyde hafif bir segregasyon eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bakırın segregasyon eğilimi ve borun yüzeyde birikimi yapının mekanik dayanımını olumsuz etkileyerek yüzey deformasyonlarına ve çatlak oluşumuna neden olmuş olabilir.



Şekil 4.7. C Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.6.(d)'de gösterilmiştir.

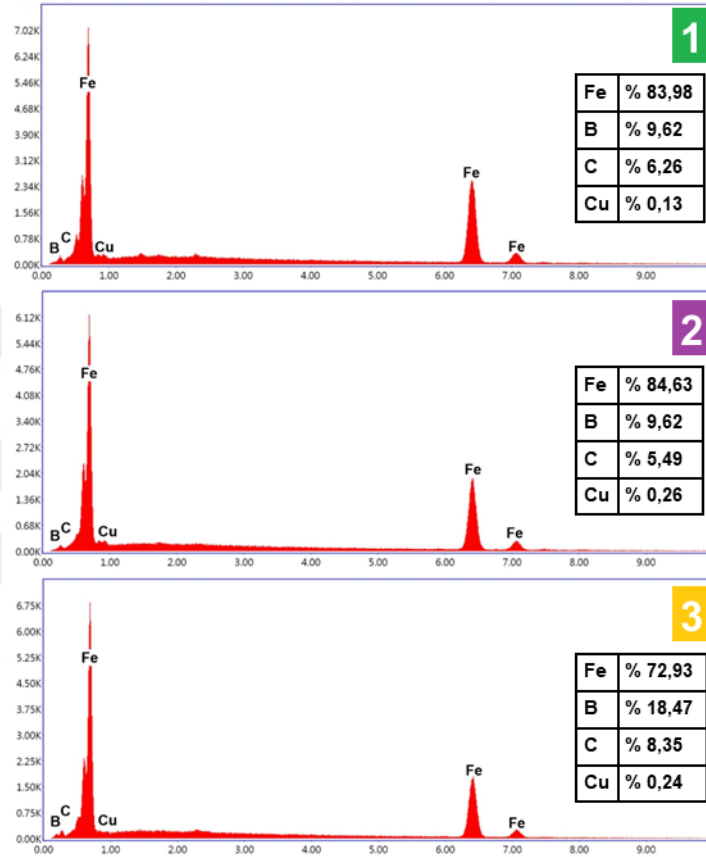


Şekil 4.8. D Numunesine ait FEG-SEM görüntüleri; (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. (d)'de 10 µm ölçek çubuğuna karşılık gelen büyütmede EDS alanları gösterilmektedir.

Şekil 4.8'de D numunesine ait FEG-SEM görüntüleri verilmiştir. Burada (a) 10 µm, (b) 5 µm ve (c) 3 µm ölçek çubuğuna sahiptir. Şekil 4.8 (a) görüntüsünde yüzeyde geniş bir çatlak bölgesi ve bu çatlağın çevresinde gelişen ikincil çatlak yapıları açıkça görülmektedir. Çatlakların ilerlediği yön ve yüzeyde meydana gelen deformasyonlar, malzemenin dış yüklemelere karşı kırılgan bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 4.8 (b) ve (c) görüntülerinde farklı ölçeklendirmelerle çatlakların detaylandırıldığı ve özellikle çatlak uçlarında malzeme ayrışmaları ile deformasyon belirtileri görüldüğü tespit edilmiştir. Bu bölgelerde çatlak uçlarının keskin ve ilerlemeye açık olduğu, çatlak ilerlemesinin kolaylıkla devam edebileceği yapısal zayıflıkların oluştuğu görülebilir.

Şekil 4.8 (d)'de EDS analizi için 10 µm ölçek çubuğuna sahip FEG-SEM görüntüsünden seçilen üç farklı bölge (1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge) yer almaktadır. Bu bölgelerde gerçekleştirilen EDS analizlerinin spektrumları ise Şekil 4.9'da sunulmuştur. D numunesinin yapısında demir matris fazı ile birlikte yüksek miktarda bor ve karbon içeren fazlar bulunduğu ve eser miktarda bakır katkısı ile kompleks bir yapının oluştuğu belirlenmiştir. 1. Bölgede yapılan EDS analizinde demir (Fe) oranı %83,98, bor (B) oranı %9,62, karbon (C) oranı %6,26 ve bakır (Cu) oranı %0,13 olarak tespit edilmiştir. 2. Bölgede ise Fe oranı %84,63, B oranı %9,62,

C oranı %5,49 ve Cu oranı %0,26 olarak belirlenmiştir. Söz konusu bölgede bakır katkısı düşük oranlarda da olsa varlığını göstermektedir. 3. Bölgede ise Fe oranı %72,93, B oranı %18,47, C oranı %8,35 ve Cu oranı %0,24 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle 3. Bölgede bor segregasyonunun belirgin şekilde arttığını ve yüzeyde yoğunlaştığını göstermektedir.



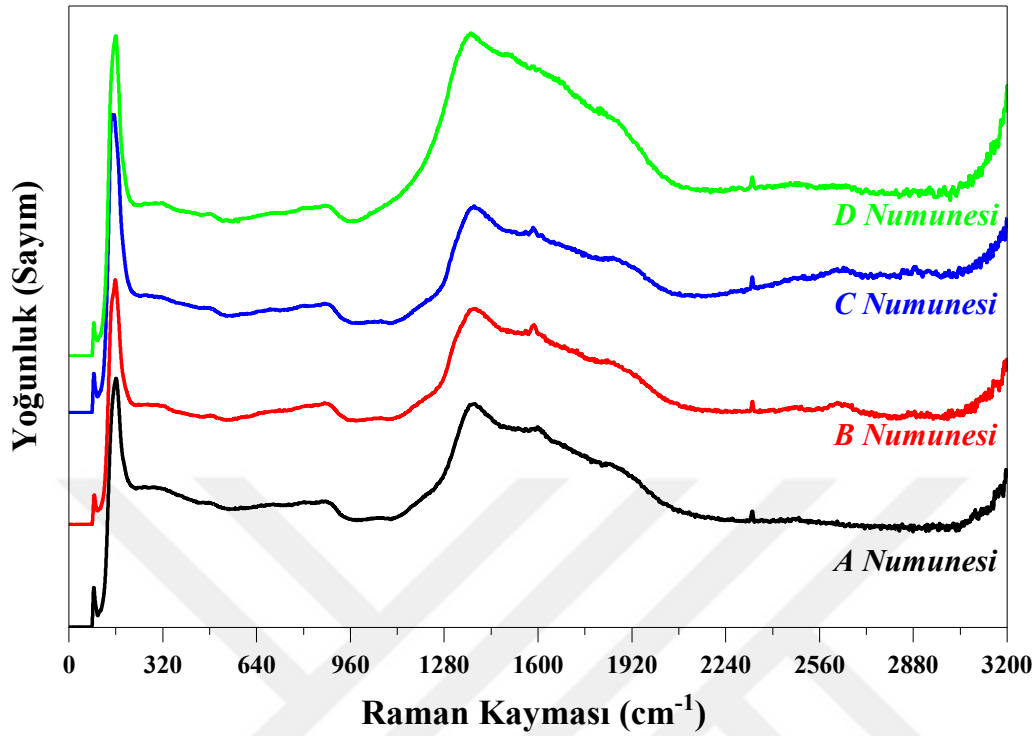
Şekil 4.9. D Numunesi için üç farklı noktadan alınan EDS sonuçlarının analizi. EDS alınan noktalar Şekil 4.8.(d)'de gösterilmiştir.

Yüksek bor oranı, yapının sertliğini artırarak aşınma direncini yükseltebilmekle birlikte, yapının kırılganlığını da önemli ölçüde artırmıştır. Elde edilen FEG-SEM görüntülerinde bu etkinin doğrudan sonucu olarak çatlakların oluştuğu ve ilerlediği tespit edilmiştir.

4.3. Raman Spektroskopisi Analiz Sonuçları

Şekil 4.10'da A, B, C ve D numunelerine ait Raman spektroskopisi analiz sonuçları sunulmuştur. Raman spektrumları, 0-3200 cm^{-1} Raman kayması aralığında yoğunluk (sayım) değişimi ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu analizler numunelerdeki yapısal

düzen, amorf/kristal oranı ve grafitik yapıların varlığı gibi önemli bilgileri ortaya koymaktadır.



Şekil 4.10. Raman spektroskopisi ile numunelerin yapısal incelemesi.

Numunelere ait spektrumlar incelendiğinde, 1350 cm^{-1} civarında D bandı ve 1580 cm^{-1} civarında G bandı olmak üzere iki belirgin pik tespit edilmiştir. D bandı, yapısal bozukluklar ve düzensiz karbon yapılarının (defektlerin) göstergesi iken, G bandı ise sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarının düzenli grafitik yapılarındaki karakteristik titreşim modunu temsil etmektedir. Numunelerde D bandının yüksekliğinin G bandına oranla daha baskın olması, numune yapılarının daha fazla amorf karbon içerdiğini ve kristal yapının düzensiz olduğunu göstermektedir. Bu durum, karbon yapısında yüksek seviyede defekt ve yapısal bozuklukların hâkim olduğunu düşündürmektedir.

Yapılan tüm morfolojik incelemeler numuneler arasında farklı fazların var olduğunu doğrulamıştır. Bununla birlikte tüm incelemeler özellikle karbonun ve borun varlığının yapısal bozukluklara sebep olduğunu göstermektedir. Yüzeylerde görülen birincil ve ikincil çatlaklar numunelerin mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

4.4. Gama Zırhlama Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada Fe, FeB, Cu ve C içeren dört farklı alaşımanın (A, B, C ve D) gama zırhlama özellikleri, Co-60 nokta kaynağından yayılan 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerinde incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, 3"x3" NaI (Tl) sintilasyon dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiş, tüm numunelerin lineer azaltma katsayısı (LAC), kütle azaltma katsayısı (MAC), yarı değer katmanı (HVL), onuncu değer katmanı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri 3. Bölümde verilen analitik ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.1’de dört farklı numune için elde edilen deneysel kütle azaltma katsayısı (MAC) değerleri, NIST’in XCOM veri tabanından elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmış ve hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Bu karşılaştırmalar yöntemin ve geometrinin doğruluğunu ve teorik modelle olan uyumunu değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

Tablo 4.1. Deneysel ve teorik MAC Değerleri.

Malzeme	Enerji (MeV)	MAC (cm ² /g)		% Hata
		Deney	XCOM	
A	1,173	0,057±0,002	0,0552	3,26
	1,332	0,059±0,003	0,0518	13,89
B	1173	0,054±0,002	0,0551	1,99
	1332	0,056±0,004	0,0517	8,31
C	1173	0,050±0,002	0,0551	9,25
	1332	0,051±0,002	0,0517	1,35
D	1173	0,054±0,001	0,0551	1,99
	1332	0,056±0,001	0,0517	8,31

A numunesi için 1,173 MeV’de deneysel MAC değeri 0,057±0,002 cm²/g olarak bulunmuştur. Bu değer teorik XCOM değeri ile karşılaştırıldığında (0,0552 cm²/g) hata payı %3,26 olarak bulunmuştur. Ancak 1,332 MeV’deki deneysel MAC değeri 0,059±0,003 cm²/g iken XCOM değeri 0,0518 cm²/g’dir. Bu durumda deneysel ve teorik sonuçlar arasında %13,89 oranında bir hata söz konusudur.

B numunesi için 1,173 MeV’de elde edilen deneysel MAC değeri 0,054±0,002 cm²/g iken teorik MAC değeri 0,0551 cm²/g’dir ve iki sonuç arasındaki %hata oranı %1,99’dur. 1,332 MeV’de ise deneysel MAC değeri 0,056±0,004 cm²/g, teorik MAC değeri ise 0,0517 cm²/g’dir. Bu durumda hata oranı %8,31’dir.

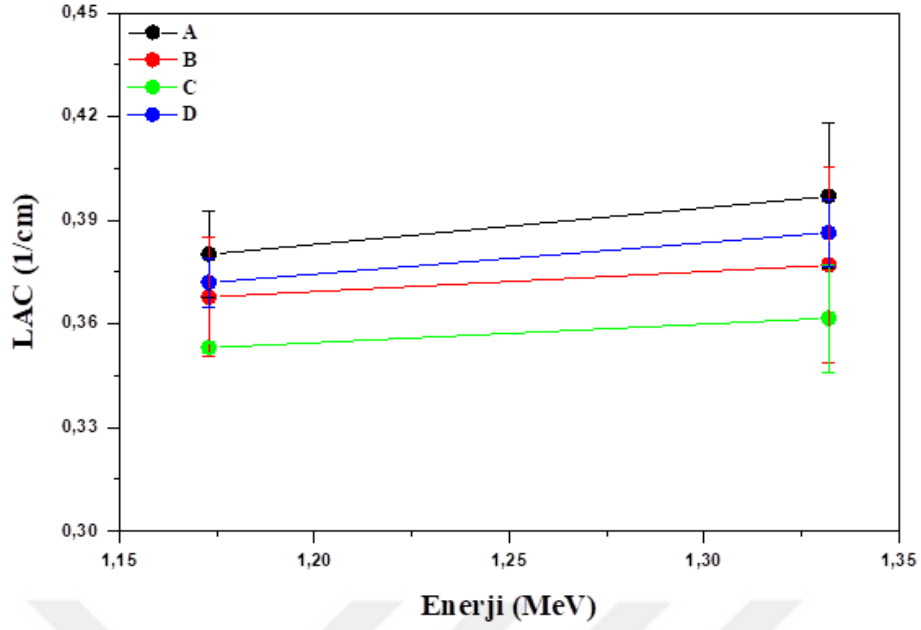
C numunesi için, 1,173 MeV’de belirlenen deneysel MAC değeri 0,050±0,002cm²/g, XCOM değeri ise 0,0551 cm²/g’dir. %9,25 oranında bir hata gözlenmiştir. 1,332

MeV'deki ölçümde deneysel MAC değeri $0,051 \pm 0,002 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken XCOM tarafından hesaplanan MAC değeri ise $0,0517 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dır. Bu enerji seviyesinde deney ve teorik arasındaki fark %1,35 kadardır.

Son olarak D numunesi için, 1,173 MeV'de deneysel MAC değeri $0,054 \pm 0,001 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenirken, XCOM'da hesaplanan teorik MAC değeri $0,0551 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir ve bu enerjide teori ve deney arasındaki hata payı %1,99'dur. 1,332 MeV'de deneysel MAC değeri $0,056 \pm 0,001 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken teorik MAC değeri $0,0517 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dır ve %hata payı %8,31 olarak bulunmuştur.

Yapılan deneysel ölçümler sonrasında tüm numuneler için elde edilen deneysel MAC değerleri ile XCOM veri tabanı kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar sonucu belirlenen MAC değerleri arasında en düşük hata oranı %1,35 ile C numunesinin 1,332 MeV gama enerjisinde, en yüksek hata ise %13,89 ile A numunesinin 1,332 MeV gama enerjisinde bulunmuştur. Bilindiği gibi XCOM veri tabanı tarafından yapılan hesaplamalarda numuneler kusursuz kabul edilirken, tez kapsamında yapılan morfolojik analizler üretilen malzemelerde hafif kusurların var olduğunu göstermiştir. Buna rağmen deneysel olarak belirlenen MAC değerleri ile XCOM teorik değerleri arasında makul bir uyum olduğu ve hata oranının %14'ün altında olduğu söylenebilir.

Şekil 4.11'de verilen grafik, dört farklı numunenin (A, B, C ve D) 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerinde ölçülen lineer azaltma katsayısı (LAC) değerlerinin enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Grafikte her numune farklı bir renk ile temsil edilmiş olup, hata çubukları deneysel ölçümlerdeki belirsizliği göstermektedir.



Şekil 4.11. Dört farklı malzemenin 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerindeki LAC değerleri.

Grafiğe göre enerji arttıkça tüm numunelerde LAC değerlerinde küçük bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum, genel olarak daha yüksek enerjili fotonların numunelerle daha az etkileşim gösterdiği beklentisine ters gibi görünse de bazı alaşımlarda atomik yapı, yoğunluk ve bileşenlerin çapraz etkisi nedeniyle LAC değerinde artış gözlemlenebilir.

A numunesi her iki enerji seviyesinde de en yüksek LAC değerine sahiptir. Bu sonuç A numunesinin gama ışınlarını en etkin zayıflatma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. B ve C numuneleri karşılaştırıldığında, C'nin LAC değeri en düşük seviyede kaldığı görülmektedir. D numunesi ise A'nın ardından ikinci en yüksek LAC değerine sahip olup, B ve C'ye göre daha iyi bir zayıflatma kapasitesi sunmaktadır. D numunesinin LAC değerinin yüksek olması alaşım içeriğindeki farkların zırhlama kabiliyeti üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Hata çubuklarının uzunlukları da değerlendirme açısından önemlidir. D ve B numunelerinde hata aralıkları nispeten dardır; bu da ölçümlerin daha güvenilir ve tekrarlanabilir olduğunu gösterir. C numunesinde ise hata çubuğu biraz daha uzundur, bu durum ölçümdeki belirsizliğin fazla olduğunu ve verilerin güven aralığının daha geniş olduğuna işaret eder.

Sonuç olarak, bu grafik, dört numunenin enerjiye bağlı zayıflatma özelliklerini doğrudan karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Yüksek LAC, daha yüksek zayıflatma kapasitesi anlamına geldiği için, özellikle A ve D numuneleri bu bağlamda ön plana çıkmaktadır.

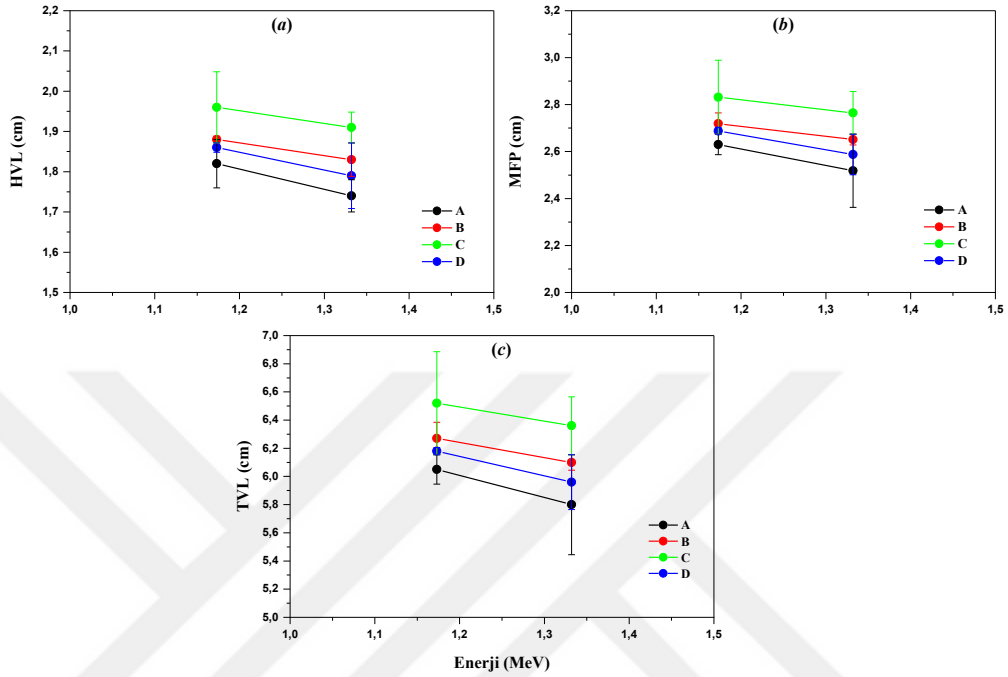
Tablo 4.2’de numunelerin 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerinde hesaplanan LAC, HVL, TVL ve MFP sonuçları sunulmuştur. Bu parametreler, gama fotonlarının malzemeye etkileşimini nicel olarak ifade eder ve zayıflatıcı performansın belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Tablo 4.2. Deneysel ölçümler sonucu belirlenen LAC, HVL, TVL ve MFP değerleri.

Malzeme	Enerji (MeV)	LAC (cm ⁻¹)	HVL (cm)	TVL (cm)	MFP (cm)
A	1173	0,380±0,012	1,82	6,05	2,630
	1332	0,397±0,021	1,74	5,80	2,518
B	1173	0,367±0,017	1,88	6,27	2,719
	1332	0,377±0,028	1,83	6,10	2,651
C	1173	0,353±0,001	1,96	6,52	2,832
	1332	0,361±0,015	1,91	6,30	2,765
D	1173	0,372±0,007	1,86	6,18	2,688
	1332	0,386±0,009	1,79	5,96	2,588

A numunesi 1,173 MeV enerji seviyesinde 0,380±0,012 cm⁻¹ LAC değerine sahiptir. Bu oldukça yüksek bir değerdir ve numunenin gama ışınlarını etkili şekilde zayıflattığını gösterir. Bu enerji düzeyinde A numunesi için HVL=1,82 cm, TVL=6,05 cm ve MFP=2,63 cm olarak belirlenmiştir. 1,332 MeV enerjide A numunesinin LAC değeri 0,397±0,021 cm⁻², HVL=1,74 cm, TVL=5,80 cm ve MFP=2,518 cm bulunmuştur. B numunesi için 1,173 MeV enerjide LAC=0,367±0,017 cm⁻¹, HVL=1,88 cm, TVL=6,27 cm ve MFP=2,7193 cm iken, 1,332 MeV enerjide ise LAC=0,377±0,028 cm⁻¹, HVL=1,83 cm, TVL=6,10 cm ve MFP=2,651 cm olarak bulunmuştur. C numunesi, 1,173 MeV enerjide 0,353±0,001 cm⁻¹ LAC değeri ile tüm numuneler arasında en düşük lineer azaltma katsayısına sahiptir. Bu enerji seviyesinde C numunesi için HVL=1,96 cm, TVL=6,52 cm ve MFP=2,8317 cm olarak belirlenmiştir. C numunesinin için 1,332 MeV enerjide LAC=0,361±0,015 cm⁻¹, HVL=1,91 cm, TVL=6,36 cm ve MFP=2,7651 cm olarak bulunmuştur. Son olarak D numunesinin 1,173 MeV enerjideki LAC değeri 0,372±0,007 cm⁻¹ iken HVL, TVL ve MFP değerleri sırasıyla 1,86 cm, 6,18 cm ve 2,6879 cm’dir. 1,332 MeV’de ise LAC=0,386±0,009 cm⁻¹, HVL=1,79 cm, TVL=5,96 cm ve MFP=2,5878 cm olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.12’de HVL, TVL ve MFP değerlerinin grafikleri verilmiştir. Burada A numunesi siyah nokta ile, B numunesi kırmızı nokta ile, C numunesi yeşil nokta ile ve D numunesi mavi nokta ile temsil edilmiştir. Parametreler hata oranları ile birlikte sunulmuştur.



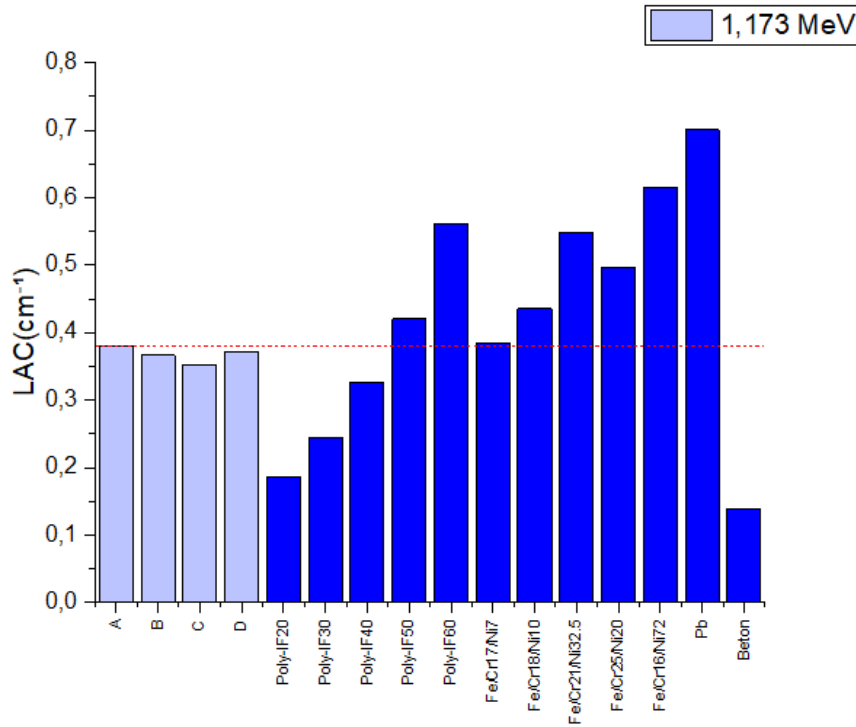
Şekil 4.12. DeneySEL HVL, TVL ve MFP grafikleri.

Şekil 4.12 (a)’da A, B, C ve D numuneleri için yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerinin farklı enerji seviyelerine (MeV) bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. C numunesi, tüm enerji seviyelerinde en yüksek HVL değerine sahip olup gama radyasyonunu zayıflatmada en düşük performansı sergilemektedir. Buna karşın A numunesi, en düşük HVL değerlerine sahip olup en iyi zırhlama özelliğini göstermektedir.

Şekil 4.12 (b)’de, numunelerin ortalama serbest yol (MFP) değerleri sunulmuştur. MFP, gama fotonlarının malzeme içinde ortalama olarak kaç cm yol katettiğini ifade eder. Grafik, enerji arttıkça MFP’nin azaldığını göstermektedir. C numunesi, en yüksek MFP değerlerine sahip olup fotonların malzeme içinde daha uzun mesafe katettiğini, dolayısıyla zayıf soğurucu özellik taşıdığını göstermektedir. A numunesi ise en düşük MFP değerine sahip olup fotonların daha kısa mesafede soğurulduğunu ve dolayısıyla daha etkin bir zırhlama sağladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, HVL grafiği ile örtüşmektedir.

Şekil 4.12 (c)'de, numunelerin onuncu değer kalınlıkları (TVL) verilmiştir. Bu grafikte En yüksek TVL değerleri C numunesine ait olup bu numunenin gama radyasyonuna karşı en düşük zayıflatma etkisini gösterdiği sonucunu desteklemektedir. A numunesi, en düşük TVL değerine sahiptir ve bu da gama radyasyonuna karşı en yüksek zırhlama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, önceki HVL ve MFP analizleriyle tutarlıdır ve A numunesinin en uygun zırhlama malzemesi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.13.'de tez kapsamında üretilen 4 farklı malzemenin 1,173 MeV enerjide elde edilen LAC değerleri, literatürde yer alan Fe bazlı farklı malzemelerin ve geleneksel malzemeler olan kurşun ile betonun LAC değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kırmızı kesikli çizgi ise A numunesi için elde edilen $LAC=0,380 \text{ cm}^{-1}$ değerini göstermektedir.

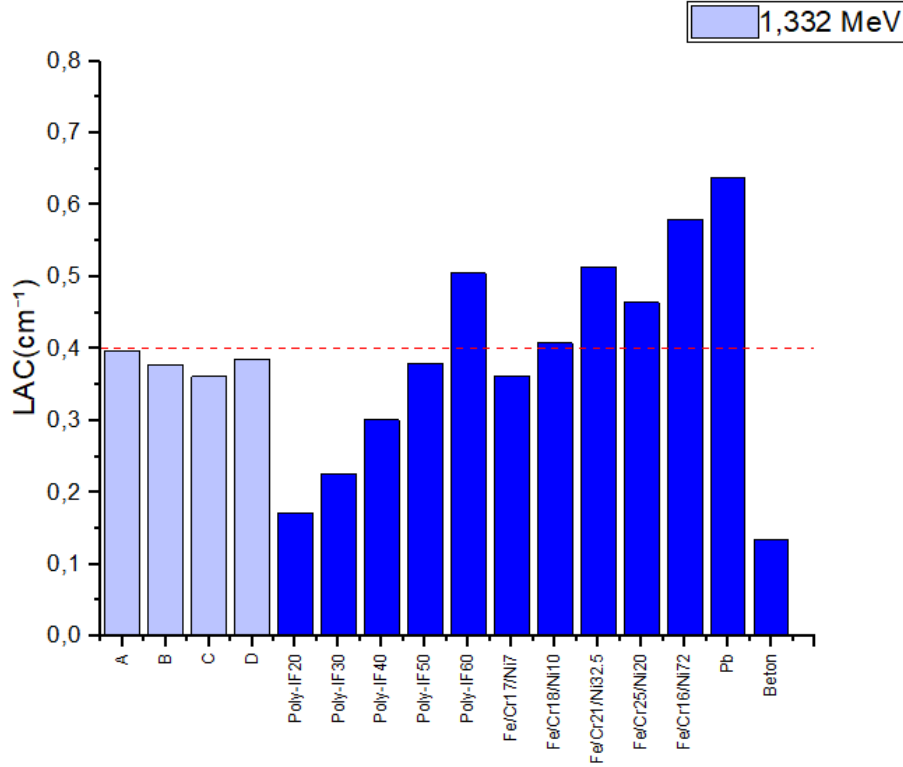


Şekil 4.13. 1,173 MeV için tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin deneysel olarak belirlenen LAC değerleri (açık mavi), farklı Fe bazlı alaşımların ve kurşun ile betonun LAC değerleriyle (koyu mavi) karşılaştırılması.

Şekil 4.13'den de görülebileceği gibi, tez kapsamında hazırlanan numunelerin LAC değerleri Poly-IF20 ($0,187 \text{ cm}^{-1}$), Poly-IF30 ($0,245 \text{ cm}^{-1}$), Poly-IF40 ($0,327 \text{ cm}^{-1}$), Fe/Cr17/Ni7 ($0,385 \text{ cm}^{-1}$) ve beton ($0,139 \text{ cm}^{-1}$) malzemelerine göre daha yüksektir. Bununla birlikte A, B, C ve D numuneleri Poly-IF50 ($0,420 \text{ cm}^{-1}$) ve Fe/Cr18/Ni10 ($0,435 \text{ cm}^{-1}$) malzemelerine oldukça yakın büyüklükte LAC performansı göstermiştir. Öte yandan Poly-IF60 ($0,561 \text{ cm}^{-1}$), Fe/Cr21/Ni32.5 ($0,549 \text{ cm}^{-1}$), Fe/Cr25/Ni20

(0,496 cm⁻¹), Fe/Cr16/Ni72 (0.615 cm⁻¹) ve kurşun (0,637 cm⁻¹) malzemesinden daha düşük bir gama zırhlama performansı göstermiştir.

Şekil 4.14.'de tez kapsamında üretilen 4 farklı malzemenin 1,332 MeV enerjide elde edilen LAC değerleri, literatürde yer alan Fe bazlı farklı malzemelerin ve geleneksel malzemeler olan kurşun ile betonun LAC değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kırmızı kesikli çizgi ise A numunesi için elde edilen LAC=0,397 cm⁻¹ değerini göstermektedir.



Şekil 4.14. 1,332 MeV için tez kapsamında üretilen dört farklı numunenin deneysel olarak belirlenen LAC değerleri (açık mavi), farklı Fe bazlı alaşımların ve kurşun ile betonun LAC değerleriyle (koyu mavi) karşılaştırılması.

Şekil 4.14'den de görülebileceği gibi, tez kapsamında hazırlanan numunelerin LAC değerleri Poly-IF20 (0,172 cm⁻¹), Poly-IF30 (0,226 cm⁻¹), Poly-IF40 (0,301 cm⁻¹), Poly-IF50 (0,380 cm⁻¹), Fe/Cr17/Ni7 (0,362 cm⁻¹), ve beton (0,135 cm⁻¹) malzemelerine göre daha yüksektir. Bununla birlikte A, B, C ve D numuneleri Fe/Cr8/Ni10 (0,408 cm⁻¹) malzemelerine oldukça yakın büyüklükte LAC performansı gösterirken, Poly-IF60 (0,505 cm⁻¹), Fe/Cr21/Ni32.5 (0,514 cm⁻¹), Fe/Cr25/Ni20 (0,464 cm⁻¹), Fe/Cr16/Ni72 (0,580 cm⁻¹) ve kurşun (0,637 cm⁻¹) malzemesinden daha düşük gama zırhlama performansı göstermiştir.



5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında saf Fe'den oluşan A numunesi, %50 oranında Fe ve %50 oranında FeB içeren B numunesi, %49 oranında Fe, %49 oranında FeB ve %2 oranında Cu içeren C numunesi ve %48,75 oranında Fe, %48,75 oranında FeB, %2 oranında Cu ve %0,5 oranında C içeren D numunesi toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Numuneler bu karıştırma oranlarına göre hazırlanarak bilyalı değirmende 24 saat boyunca karıştırılmış, sonrasında ise 600 MPa presleme basıncı ile preslenmiştir. Presleme sonrasında numuneler azot atmosferinde 1200°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle sinterleme işlemine tabi tutulmuş ve incelemeye hazır hale getirilmiştir.

Numunelerin morfolojik özellikleri x-ışını difraktometresi (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FEG-SEM), enerji dağılımlı x-ışınları spektrometresi (EDS) ve Raman spektrometresi kullanılarak incelenmiştir. Sonrasında ise NaI(Tl) detektörü kullanılarak numunelerin 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjilerde gama zırlama özellikleri (kütle azaltma katsayısı (MAC), lineer azaltma katsayısı (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), onuncu değer kalınlığı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP)) deneysel olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar XCOM teorik veri tabanında hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında üretilen numunelerin XRD analizleri, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Rigaku D-Max 2100 PC marka cihaz kullanılarak, 5-90° 2 θ aralığında ve 2°/dakika tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre tüm numunelerde en yüksek yoğunluklu pik 2 θ =44° civarında elde edilmiş ve bu piklerin tümü demirin (110) düzlemine aittir. Ayrıca 2 θ =64° ve 82° civarlarındaki açılarda demirin sırasıyla (200) ve (211) düzlemlerinin varlığı da görülebilmektedir. FeB katkılı B numunesinde 2 θ =26,46°, 42,37°, 44,80° ve 49,54° açılarındaki pikler FeB fazının (111), (004), (212) ve (114) düzlemleri ile eşleşmektedir. Düşük oranlarda bakır ve karbon, yüksek oranda FeB içeren D numunesinde ise 2 θ =20,81°, 24,34°, 26,42°, 34,64°, 42,13° ve 50,16° açılarında FeB fazına ait sırasıyla (002), (110), (111), (200), (004) ve (220) düzlemleri; 2 θ =43,34° ve 50,46° açılarında Cu fazına ait (111) ve (200) düzlemleri

gözlemlenmiştir. Ayrıca, $2\theta=46,42^\circ$, $54,28^\circ$, $59,14^\circ$, $65,90^\circ$, $84,51^\circ$ ve $86,20^\circ$ açılarında karbon fazına ait (100), (222), (211), (221), (110) ve (333) düzlemleri belirlenmiştir.

Tez kapsamında üretilen numunelerin FEG-SEM ve EDS analizleri, Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan FEI/Quanta FEG 450 model FEG-SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin görüntüleri $10\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$ ve $3\ \mu\text{m}$ ölçeklerde alınmış, EDS analizleri ise $10\ \mu\text{m}$ ölçekli görüntülerde 3 farklı bölgeden alınmıştır. Numunelerin FEG-SEM görüntüleri çeşitli bölgelerde belirgin çatlak yapılar dikkat çekmektedir. Bu yapılar malzemenin mikroyapısal özelliklerinde düzensiz dağılım gösterdiğini ve mekanik yüklemelere karşı dirençsiz bölgeler içerdiğini göstermektedir. Özellikle B, C ve D numunelerinde yüksek bor oranı bu numunelerin sertliğini artırarak aşınma direncini yükseltebilmekle birlikte yapının kırılganlığını da önemli ölçüde artırmıştır denilebilir. Elde edilen FEG-SEM görüntülerinde bu etkinin doğrudan sonucu olarak çatlakların oluştuğu ve ilerlediği görülebilmektedir. Farklı bölgelerden alınan EDS analizleri ise numunelerin yüksek oranda Fe ve FeB, dikkate değer oranda ise C ve Cu içerdiğini göstermektedir.

Tez kapsamında üretilen numunelerin Raman spektroskopisi analizleri, Sakarya Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) bünyesinde bulunan Kaiser RAMANRXN1 Mikroprob cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numunelere ait Raman spektrumlarında $1350\ \text{cm}^{-1}$ civarında D bandı ve $1580\ \text{cm}^{-1}$ civarında G bandı olmak üzere iki belirgin pik tespit edilmiştir. Numunelerde D bandının yüksekliğinin G bandına oranla daha baskın olması, numune yapılarının daha fazla amorf karbon içerdiğini ve kristal yapının düzensiz olduğunu göstermektedir.

Numunelerin gama zırlama özellikleri Sakarya Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Bilimler ve Teknolojiler Laboratuvarı bünyesinde bulunan ORTEC Inc. marka ve $3''\times 3''$ boyutlarında NaI (Tl) kristal dedektörü ve ^{60}Co radyoaktif nokta kaynağı kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler her bir numune için 20 dakika boyunca 3 kez tekrarlanmıştır. Tez kapsamında üretilen numunelerin lineer azaltma katsayısı (LAC), kütle azaltma katsayısı (MAC), yarı değer katmanı (HVL), onuncu değer katmanı (TVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri hesaplanmıştır.

Numunelerin deneysel olarak elde edilen kütle azaltma katsayısı (MAC) değerleri teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. 1,173 MeV enerji için A numunesinin MAC değeri $0,057 \pm 0,002$ cm²/g, B numunesinin MAC değeri $0,054 \pm 0,002$ cm²/g, C numunesinin MAC değeri $0,050 \pm 0,002$ cm²/g ve D numunesinin MAC değeri $0,054 \pm 0,001$ cm²/g olarak bulunmuştur. 1,173 MeV için deneysel sonuçlar teorik verilerle karşılaştırıldığını her bir numune için hata oranı sırasıyla %3,26, %1,99, %9,25 ve %1,99 olarak bulunmuştur. 1,332 MeV enerji için A numunesinin MAC değeri $0,059 \pm 0,003$ cm²/g, B numunesinin MAC değeri $0,056 \pm 0,004$ cm²/g, C numunesinin MAC değeri $0,051 \pm 0,002$ cm²/g ve D numunesinin MAC değeri $0,056 \pm 0,001$ cm²/g olarak bulunmuştur. 1,332 MeV için deneysel sonuçlar teorik verilerle karşılaştırıldığını her bir numune için hata oranı sırasıyla %13,89, %8,31, %9,25 ve %8,31 olarak bulunmuştur. Yapılan deneysel ölçümler sonrasında tüm numuneler için elde edilen deneysel MAC değerleri ile XCOM veri tabanı kullanılarak yapılan teorik hesaplamalar sonucu belirlenen MAC değerleri arasında en düşük hata oranı %1,35 ile C numunesinin 1,332 MeV gama enerjisinde, en yüksek hata ise %13,89 ile A numunesinin 1,332 MeV gama enerjisinde bulunmuştur. MAC değerleri ile XCOM teorik değerleri arasında makul bir uyum olduğu ve hata oranının %14'ün altındadır.

A numunesi her iki enerji seviyesinde de en yüksek MAC ve LAC değerine, en düşük HVL, TVL ve MFP değerlerine sahiptir. Bu sonuç A numunesinin gama ışınlarını en etkin zayıflatma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. B ve C numuneleri karşılaştırıldığında, C numunesinin MAC ve LAC değerlerinin en düşük seviyede, HVL, TVL ve MFP değerlerinin en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. D numunesi ise A'nın ardından ikinci en yüksek MAC ve LAC değerlerine, en düşük HVL, TVL ve MFP değerlerine sahip olup B ve C'ye göre daha iyi bir zayıflatma kapasitesi sunmaktadır. D numunesinin MAC ve LAC değerinin yüksek olması alaşım içeriğindeki farkların zırhlama kabiliyeti üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Tez kapsamında üretilen 4 farklı malzemenin 1,173 MeV ve 1,332 MeV enerjide elde edilen LAC değerleri literatürde yer alan Fe bazlı farklı malzemelerin ve geleneksel malzemeler olan kurşun ile betonun LAC değerleri ile karşılaştırılmıştır. A, B, C ve D numunelerinin 1,173 MeV'deki LAC değerleri Poly-IF20 (0,187 cm⁻¹), Poly-IF30 (0,245 cm⁻¹), Poly-IF40 (0,327 cm⁻¹), Fe/Cr17/Ni7 (0,385 cm⁻¹) ve beton (0,139 cm⁻¹) malzemelerine göre daha yüksektir. Bununla birlikte A, B, C ve D numuneleri Poly-

IF50 (0,420 cm⁻¹) ve Fe/Cr18/Ni10 (0,435 cm⁻¹) malzemelerine oldukça yakın büyüklükte LAC performansı göstermiştir. Öte yandan Poly-IF60 (0,561 cm⁻¹), Fe/Cr21/Ni32.5 (0,549 cm⁻¹), Fe/Cr25/Ni20 (0,496 cm⁻¹), Fe/Cr16/Ni72 (0,615 cm⁻¹) ve kurşun (0,637 cm⁻¹) malzemesinden daha düşük bir gama zırhlama performansı göstermiştir. 1,332 MeV'deki LAC değerleri ise Poly-IF20 (0,172 cm⁻¹), Poly-IF30 (0,226 cm⁻¹), Poly-IF40 (0,301 cm⁻¹), Poly-IF50 (0,380 cm⁻¹), Fe/Cr17/Ni7 (0,362 cm⁻¹), ve beton (0,135 cm⁻¹) malzemelerine göre daha yüksektir. Bununla birlikte A, B, C ve D numuneleri Fe/Cr8/Ni10 (0,408 cm⁻¹) malzemelerine oldukça yakın büyüklükte LAC performansı gösterirken, Poly-IF60 (0,505 cm⁻¹), Fe/Cr21/Ni32.5 (0,514 cm⁻¹), Fe/Cr25/Ni20 (0,464 cm⁻¹), Fe/Cr16/Ni72 (0,580 cm⁻¹) ve kurşun (0,637 cm⁻¹) malzemesinden daha düşük gama zırhlama performansı göstermiştir.

A, B, C ve D numunelerine yönelik morfolojik incelemeler, yapılarında farklı fazların bulunduğunu doğrulamıştır. Özellikle karbon ve bor katkılarının fazlar arası uyumsuzluk ve yapısal gerilim kaynaklı bozukluklara yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu katkılar yüzeylerde birincil ve ikincil çatlakların oluşmasına neden olarak numunelerin mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Gama zırhlama performanslarına ilişkin bulgular ise FeB, Cu ve C katkılarının bu özelliği sınırlı düzeyde azalttığını göstermektedir. Buna karşın FeB içeren alaşımlar yüksek aşınma ve korozyon direnci sağlamalarıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca borlu fazların yüksek sıcaklık stabilitesi termal dayanımı artırma potansiyeli taşımaktadır. Bununla birlikte FeB, Cu ve C katkıları faz dağılımının homojenliğini bozmakta ve çatlak oluşumu riskini (borür/karbür oluşumu nedeniyle) artırmaktadır. Bu durum, morfolojik gözlemlerle de açıkça ortaya konmuştur. Sonuç olarak, yüksek korozyon direnci ve yapısal kararlılığıyla söz konusu numuneler belirli mühendislik koşullarında gama zırhlama uygulamaları için potansiyel adaylar olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, M. A., Badawi, E. A., Abdel-Hady, Y. L., & Kamel, N. (2000). Effect of sample thickness on the measured mass attenuation coefficients. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 447(3), 432–436.
- Abdlhamed, A. (2018). *Radiation Units and Measurements*. Springer.
- Abojassim, A. A. (2017). Estimation of human radiation exposure from natural radioactivity and radon concentrations in soil samples at green zone in Al-Najaf, Iraq. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 8(3), 239–248.
- Abouhaswa, A. S., Sayyed, M. I., Altowyan, A. S., Al-Hadeethi, Y., & Mahmoud, K. A. (2020). Radiation shielding of tungsten trioxides doped borate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 543, 120134.
- AbuAlRoos, N. J., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2019). Lead-free shielding materials review. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108439.
- AFAD. (2025). Radyasyon kaynakları ve etkileri [Grafik]. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2010). Photon attenuation coefficients of concrete. *Annals of Nuclear Energy*, 37(7), 910–914. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.04.001>
- Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B., & Akkurt, A. (2006). Radiation shielding of concretes containing different aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 153–157.
- Akman, F., Şakar, E., Sayyed, M. I., & Di, Y. (2019). Experimental and theoretical results of gamma shielding features for Fe/Cr/Ni ternary alloys. *Journal of X-ray, Gamma and Neutron Shielding*. Advance online publication.
- Akyıldırım, H. (2011). Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması (Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Albumejrej, A. A. K. (2024). Gamma radiation shielding properties of epoxy matrix modified with tungsten oxide and natural minerals (Yüksek lisans tezi, Muş Alparslan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Alım, B. (2020). A comprehensive study on radiation shielding characteristics of Tin-Silver, Manganin-R, Hastelloy-B, Hastelloy-X and Dilver-P alloys. *Applied Physics A*, 126(262)
- Alorini, M. (2023). *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation*. Springer.
- Alpugan, D. (1981). *Toz Metalurjisi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.

- Al-Saleh, W. M., Dahi, M. R. H., Sayyed, M. I., Almutairi, H. M., Saleh, I. H., & Elsafi, M. (2023). Comprehensive study of the radiation shielding feature of polyester polymers impregnated with iron filings. *e-Polymers*, 23(1), 20230096.
- Alshahrani, B., Najam, L. A., Mahmoud, K. A., Namaq, B. F., Wais, T. Y., & Maghrbi, Y. (2021). Radiation shielding properties of high-Fe content amorphous alloys: Monte Carlo study. *Journal of Radiation Protection and Shielding*. Advance online publication.
- Al-Sulaiti, H., Alkhomashi, N., Al-Dahan, N., Al-Dosari, M., Bradley, D. A., Bukhari, S., Matthews, M., Regan, P. H., & Santawamaitre, T. (2011). Determination of the natural radioactivity in Qatari building materials using high-resolution gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 652(1), 915–919.
- Annex, D., & United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). Sources and effects of ionizing radiation.
- Annunziata, M. F. (2007). *Handbook of Radioactivity Analysis* (2nd ed.). Academic Press.
- Aygün, B. (2021). Gamma-ray and neutron shielding Ni-based new type super alloys: Monte Carlo Simulation approach. *Radiation Physics and Chemistry*, 188, Article 109630.
- Ayotte, J. D., Flanagan, S. M., & Morrow, W. S. (2007). Occurrence of uranium and 222radon in glacial and bedrock aquifers in the northern United States, 1993–2003 (Scientific Investigations Report 2007–5037). U.S. Geological Survey.
- Beiser, A. (2003). *Concepts of modern physics* (6th ed.). McGraw-Hill
- Berber, N. (2005). *Radyoaktivite ve Nükleer Enerji*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill Education.
- Demir, A. (2008). *Radyasyon Dedektörleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Demirezen, B. (2014). Polimerik azometin bileşikleri ve geçiş metal komplekslerinin XRF ve XRD ile incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Egerton, R. F. (2005). *Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM*. Springer
- Ekici, M. R., Tabar, E., Atasoy, A., Bulut, E., & Hoşgör, G. (2023). Effect of hydrochloric acid and hydrofluoric acid treatment on the morphology, structure and gamma permeability of 2D MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ electrodes. **Canadian Metallurgical Quarterly*, 62(4), 629–650.
- Ekici, M. R., Tabar, E., Hoşgör, G., Bulut, E., & Atasoy, A. (2024). The effect of zinc, iron and manganese content on gamma shielding properties of magnesium-based alloys produced using the powder metallurgy. **Nuclear Engineering and Technology*, 56(2024), 3872–3883.
- Ekici, M. R., Tabar, E., Yılmaz, R., Hoşgör, G., & Bulut, E. (2025). Investigation of the effects of magnesium, iron, and manganese on gamma permeability in zinc-based alloys produced by powder metallurgy. **Nuclear Technology*

- Ferraro, J. R., Nakamoto, K., & Brown, C. W. (2003). *Introductory Raman Spectroscopy* (2nd ed.). Academic Press
- Geidam, I. G., Matori, K. A., Halimah, M. K., Chan, K. T., Muhammad, F. D., Ishak, M., & Umar, S. A. (2022). Oxide ion polarizabilities and gamma radiation shielding features of $\text{TeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses containing Bi_2O_3 using Phy-X/PSD software. *Materials Today Communications*, 31, 103472.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. R. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (3rd ed.). Springer
- Güler, M. (2022). X-Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi ile Kristal Yapıların Analizi. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Dergisi*, 10(2), 45–58
- Henaish, A. M. A., Issa, S. A. M., Zakaly, H. M. H., Tekin, H. O., & Abouhaswa, A. (2021). Characterization of optical and radiation shielding behaviors of ferric oxide reinforced bismuth borate glass. *Physica Scripta*, 96(7), 075801.
- Hoşgör, G., & Tabar, E. (2025). The investigation of the radiation shielding features of boro-tellurite glasses containing bismuth and titanium via FLUKA code. **Physica Scripta*, 100, 015308.
- Hoşgör, G., Tabar, E., Kemah, E., & Yakut, H. (2025). Influence of TiO_2 content on the radiation shielding properties of the $\text{La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ glasses. **Radiation Physics and Chemistry*, 226*, 112281.
- Hoşgör, Z. R., Ünlütürk, M., Gülmez, S., Anıl, Ü. E., Yazan, S. B., Hoşgör, G., & Tabar, E. (2025, June 4). Effect of SnO_2 on materials and radiation shielding properties in $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-ZnO}$ glass system. *Ceramics International*. Advance online publication.
- Jawad, A. A. J. (2018). Investigation of radiation shielding properties for some ceramic materials (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics, Isparta, Turkey.
- Jewett, J. W., & Serway, R. A. (2013). *Physics for scientists and engineers*. Cengage Learning.
- Kerlin, T. W., & Upadhyaya, B. R. (Eds.). (2019). *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*. Academic Press. (Chapter 16). Nuclear plant instrumentation (ss. 213–235)
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). Wiley.
- Krane, K. S. (1987). *Introductory nuclear physics*. Wiley.
- Krane, K. S. (2019). *Modern physics* (3rd ed.). Wiley.
- Kumaş, A. (2006). *Radyasyon Fiziği ve Tıbbi Uygulamaları*. Palme Yayıncılık.
- Kurudirek, M., Özdemir, Y., & Akkurt, I. (2018). Radyasyonun hayatımızdaki yeri ve nükleer teknolojilerin günlük yaşamdaki uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 43–52
- Kuluöztürk, Z. N. (2023). Gamma-ray shielding properties of soda-lime glass and glass ceramic: An experimental and Monte Carlo simulation study. *Radiation Physics and Chemistry*, Article 111172.

- Lilley, J. S. (2001). Nuclear physics: Principles and applications. Wiley.
- Martin, J. E. (2013). Radyasyon ve radyasyondan korunma fiziği: Sağlık fiziği uygulamalı (A. G. Tanır, M. H. Bölükdemir & K. Koç, Eds., 2. basım). Palme Yayıncılık.
- Mavi, B. (2004). Radyoaktivite ve Radyasyon Güvenliği. Palme Yayıncılık.
- More, C., Sayyed, M. I., & Kumar, A. (2025, May). Experimental study on borosilicate glasses: Influence of Bi_2O_3 on gamma radiation shielding efficiency. Radiation Physics and Chemistry. Advance online publication.
- Oruc Ulas, E., Acikgoz, A., Aktas, B., & Kavun, Y. (2025). Influence of B_2O_3 incorporation on the structural, mechanical and radiation shielding properties of TeO_2 -based bioglasses. Applied Radiation and Isotopes. Advance online publication.
- Oto, B. (2012). Barit, manyetit, bazı bor mineralleri ve atıklarını içeren betonların gama ışınları ile zırhlama özellikleri (Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Önen, S. (1997). Radyasyon biyofiziği. Nobel Yayın Dağıtım.
- Sakarya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Nükleer fizik Anabilim Dalı, İleri Çekirdek Fiziği 2 ders notları, yüksek lisans dersi, Doç Dr. Emre Tabar (2022-2023)
- Saleh, A., Sayyed, M. I., Kumar, A., & Mansour, F. E. M. (2024, May 9). Synthesis and gamma-ray shielding efficiency of borosilicate glasses doped with zinc oxide: Comparative study. Silicon, 16, 4427–4435.
- Sayyed, M. I. (2017). Mass attenuation coefficients of human body organs using MCNPX Monte Carlo code. Iranian Journal of Medical Physics, 14, 229–240.
- Sayyed, M. I., Najam, L. A., Mahmoud, K. A., Namaq, B. F., Wais, T. Y., & Maghrbi, Y. (2025, February 5). Uncovering the potential of ZnO and CaO in shielding and density enhancement for borate glass systems. Annals of Nuclear Energy, 214, Article 111231
- Şahinaslan, Ö. (1997). Atom ve çekirdek fiziği. Nobel Yayın Dağıtım.
- Şeker, S., & Çerezci, O. (1997). Çevremizdeki Radyasyon ve Etkileri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Şengül, A. (2022). Bazı biyomalzemelerin radyasyon soğurma özelliklerinin araştırılması (Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Turhan, N. (2008). Modern üniversite kimyası problemleri. Çağlayan Kitabevi.
- Turhan, Ş. (2008). Radyasyonun madde ile etkileşimi ve korunma. Gazi Üniversitesi Yayınları.
- Turner, J. E. (2008). Atoms, radiation, and radiation protection (3rd ed.). Wiley-VCH.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2009). Radyasyon, İnsan ve Çevre: İyonlaştırıcı Radyasyon, Etkileri ve Kullanım Alanları, Güvenli Kullanımı İçin Uygulamada Olan Tedbirler. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları.

- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2017). Türkiye'de Radyasyon Kaynakları 2017 Raporu. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları.
- Uyanık, C. (2011). X-ışınları kristalografisi (Bitirme tezi, Trakya Üniversitesi). Edirne, Türkiye.
- Yabsantia, S., Wantana, N., Chusin, T., Kaewjaeng, S., Ornketphon, O., Chaiphaksa, W., ... Kaewkhao, J. (2025). Enhancement of gamma and X-ray shielding behaviors in ZnO–B₂O₃ glasses via La₂O₃ addition: Experimental and theoretical investigations. *Radiation Physics and Chemistry*, 237, Article 112959.
- Yücel, H. (2017, Aralık 17). Radyasyon Dedeksiyonu ve Ölçüm Temelleri: Radyasyon Dedektörleri [Sunum slaytları]. Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri.
- Yülek, G. G. (1992). Radyasyon fiziği ve radyasyondan korunma. SEK Yayıncılık.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad Tuana GEL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, Sakarya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

Tabar, E., Hoşgör, G., Ekici, M.R., Gel, T. (2025) “*Fe-FeB-Cu-C İçeren Maddelerin Gama Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması*”13. Balkan Kongresi, 25-27 Nisan 2025 Üsküp/Makedonya, (Sözlü sunum)