



**BAZALT—KARBON ELYAF —ANTİMON TRİOKSİT
KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN RADYASYON
SOĞURMA ETKİLERİNİN VE MEKANİK
DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

Kader GÜLEN

Danışman: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**BAZALT—KARBON ELYAF —ANTİMON TRİOKSİT KATKILI EPOKSİ
KOMPOZİTLERİN RADYASYON SOĞURMA ETKİLERİNİN VE MEKANİK
DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

(Investigation of Radiation Absorption Effects and Mechanical Strength of Basalt–Carbon
Fiber –Antimony Trioxide Doped Epoxy Composites)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kader GÜLEN

Danışman: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET

Erzurum
Ekim, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kader GÜLEN tarafından hazırlanan “Bazalt—Karbon Elyaf —Antimon Trioksit Katkılı Epoksi Kompozitlerin Radyasyon Soğurma Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 22 / 09 / 2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Fizik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Demet YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Elif BOYDAŞ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Mehmet BÜYÜKYILDIZ <i>Üniversite Adı</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 12931

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Elif BOYDAŞ danışmanlığında sunulan “Bazalt—Karbon Elyaf —Antimon Trioksit Katkılı Epoksi Kompozitlerin Radyasyon Soğurma Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Metot	11	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Kader GÜLEN	Prof. Dr. Elif BOYDAŞ
10.10.2025	10.10.2025
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun /.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun /.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında akademik bilgi, rehberlik ve desteğiyle katkı sağlayan, tez sürecinde önerileri, fikirleri ve yol gösterici yorumlarıyla çalışmama katkılar sağlayan danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Elif BOYDAŞ' a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET'e teşekkür ederim.

Sağladığı imkânlarla bu çalışmayı yapmama vesile olan Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümüne, değerli hocalarıma ve çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

Ayrıca hayatım her alanında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve arkadaşım Sevim SOYKAN'a gönülden teşekkür ederim.

Kader GÜLEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAZALT—KARBON ELYAF —ANTİMON TRIOKSİT KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN RADYASYON SOĞURMA ETKİLERİNİN VE MEKANİK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

KADER GÜLEN

Danışman: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET

Amaç: Bu çalışma, radyasyonun yoğun olarak kullanıldığı uygulamalarda yüksek enerjili radyasyona karşı üstün kalkanlama özelliği gösteren epoksi bazlı kompozit malzemelerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, kompozit yapıya güçlendirici faz olarak Bazalt–Karbon Elyaf –Antimon trioksit katkılanmasıyla, yüksek enerjili gama fotonlarına karşı zırhlama performansı geliştirilmiş yenilikçi kompozit malzemeler tasarlanmıştır.

Yöntem: Kompozit numunelerin hazırlanması için kullanılan karbon elyaf, antimon trioksit (Sb_2O_3) ve bazalt elyaf farklı oranlarda ilave edilmesiyle homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmış ve kuruması için kalıplara dökülerek kompozit malzemeler elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ve antimon trioksit içeren yedi farklı kompozit formülasyonu (RT1, RT2, RT3, RT4, RT5, RT6 ve RT7) hazırlanmıştır. Kompozit numunelerin radyasyon zırhlama parametrelerini teorik olarak hesaplamak için WinXCOM yazılımı kullanılmıştır. Gama radyasyonu ile yapılan deneysel ölçümler için HPGe dedektörlü gama spektroskopisi kullanılmıştır. Ayrıca basınç dayanımı, eğilme dayanımı, iletim süresi ve ultrason darbe hızı (UPV) gibi mekanik testler uygulanarak numunelerin yapısal özellikleri incelenmiştir.

Bulgular: Kütle azaltma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) gibi radyasyon zırhlama parametrelerini gelen foton enerjisine bağlı değerleri WinXCOM yazılımı yardımıyla teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, saf epoksi (RT1) en düşük radyasyon zırhlama kapasitesine sahip olurken, %5 Sb_2O_3 katkı RT4 numunesi en yüksek zırhlama performansını göstermiştir. Mekanik testler sonucunda ise Sb_2O_3 katkısının radyasyon zırhlama performansına güçlü katkı sağladığı, ancak mekanik dayanımda kısmi bir düşüşe yol açtığı tespit edilmiştir. Karbon elyaf katkısının kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımlarını bazalta göre daha belirgin şekilde artırdığı görülmüştür. UPV testleri ise katkı oranının darbe hızını ve iletim sürelerini olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

Sonuç: Araştırma sonucunda, Bazalt–Karbon elyaf –Antimon trioksit katkı epoksi kompozitlerin hem mekanik hem de radyasyon zırhlama açısından dengeli performans sergilediği ortaya konmuştur. Özellikle RT4 numunesi, zırhlama verimliliği ile birlikte yeterli mekanik dayanımı koruyarak en uygun formülasyon olarak öne çıkmıştır. Bu özellikleriyle geliştirilen kompozitler, kurşun gibi ağır ve toksik malzemelerin yerine kullanılabilecek hafif, taşınabilir ve çok işlevli bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama, Epoksi esaslı kompozitler, Antimon trioksit, Bazalt, Karbon elyaf, Mekanik dayanım

Ekim 2025, 105 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF RADIATION ABSORPTION EFFECTS AND MECHANICAL STRENGTH OF BASALT—CARBON FIBER —ANTIMONY TRIOXIDE DOPED EPOXY COMPOSITES

Kader GÜLEN

Supervisor: Prof. Dr. Elif BOYDAŞ

Co-supervisor: Assist. Prof. Dr. Aytaç LEVET

Purpose: This study aims to develop epoxy-based composite materials that provide superior shielding against high-energy radiation in applications where radiation is intense. In this context, innovative composite materials with improved shielding performance against high-energy gamma photons were designed by incorporating basalt-carbon fiber-antimony trioxide as a reinforcing phase into the composite structure.

Method: To prepare the composite samples, carbon fiber, antimony trioxide (Sb_2O_3), and powdered basalt were mixed at different ratios until a homogeneous mixture was obtained. The composite materials were poured into molds to dry. Seven different composite formulations containing basalt, carbon, and antimony trioxide (RT1, RT2, RT3, RT4, RT5, RT6, and RT7) were prepared. WinXCOM software was used to theoretically calculate the radiation shielding parameters of the composite samples. Gamma spectroscopy with an HPGe detector was used for experimental measurements with gamma radiation. Additionally, the structural properties of the samples were investigated by applying mechanical tests such as compressive strength, flexural strength, transmission time, and ultrasound pulse velocity (UPV).

Findings: Radiation absorption parameters such as mass attenuation coefficient (MAC), half-value layer (HVL), mean free path (MFP), effective atomic number (Z_{eff}), and effective electron density (N_{eff}) as a function of incident photon energy were theoretically calculated using WinXCOM software and compared with experimental results. According to the research results, pure epoxy (RT1) had the lowest radiation absorption capacity, while the RT4 sample with 5% Sb_2O_3 exhibited the highest shielding performance. Mechanical tests revealed that the Sb_2O_3 addition significantly contributed to radiation shielding performance but caused a partial decrease in mechanical strength. It was observed that the carbon fiber addition increased the compressive and flexural strengths of the composites more significantly than basalt. UPV tests revealed that the additive ratio negatively affected the impact velocity and transmission times.

Results: The research showed that epoxy composites with added Basalt–Carbon fiber – Antimony trioxide offer a balanced performance in both mechanical strength and radiation shielding. Specimen RT4, in particular, proved to be the most suitable formulation, providing adequate mechanical strength while also maintaining shielding efficiency. These composites present a lightweight, portable, and multifunctional alternative to heavy, toxic materials like lead.

Keywords: Radiation shielding, epoxy-based composites, antimony trioxide, basalt, carbon fiber, mechanical strength

October 2025, 105 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	4
Radyasyon Türleri ve Etkileri.....	4
İyonlaştırıcı Radyasyon.....	4
İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	9
Radyasyonun İnsan Sağlığına ve Çevreye Etkileri	11
Radyasyondan Korunmanın Önemi ve Gerekliliği	12
Radyasyondan Korunma Yöntemleri	15
Radyasyon-Madde Etkileşimi.....	17
Fotoelektrik Etki	18
Compton Saçılması	19
Çift Oluşum	20
Soğurma Katsayıları	20
Lineer Azaltma Katsayısı (μ).....	20
Kütle Azaltma Katsayısı (μ_m).....	21
Atomik Tesir Kesiti	21
Elektronik Tesir Kesiti	22
Etkin Atom Numarası (Zeff)	22
Etkin Elektron Yoğunluğu (Neff).....	23
Ortalama Serbest Yol (Mean free path, MFP).....	24
Yarı Değer Kalınlığı (Half Value Layer, HVL)	24
Onda Bir Kalınlık Değeri (Tenth Value Layers, TVL).....	25

Radyasyon Doz Kavramları ve Ölçüm Birimleri	25
Temel Doz Kavramları.....	25
Zırhlama Malzemeleri	26
Kurşun ve Diğer Yoğun Malzemeler	27
Hafif Malzemeler	29
Seramik Malzemeler	32
Kompozit Malzemeler.....	33
Epoksi Esaslı Kompozitler.....	33
Nanomalzemeler ve Yeni Gelişmeler	34
MATERYAL VE YÖNTEM	36
Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	36
Epoksi Reçine	36
Antimon Trİoksit (Sb_2O_3).....	36
Karbon Elyaf (CF).....	37
Bazalt.....	38
Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi	39
Spektroskopi Ölçüm Sistemi	41
Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	41
Enerji Dağılımlı X-Işını (EDX).....	43
Gama Spektrometreleri	47
HPGe Dedektör Çalışma Prensibi	49
Sayma Sistemi	52
Yüksek Voltaj Kaynağı.....	53
Ön Yükseltici	53
Yükseltici	53
Analog Dijital Dönüştürücü (ADC)	54
Çok Kanallı Analizör	54
Mekanik Testler	55
Başlıca Mekanik Test Türleri	55
Basınç Dayanım Testi	56
Eğilme Dayanımı Testi	56
Ultrason Darbe Hızı (UPV) testi	57
ARAŞTIRMA BULGULARI	58
Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri.....	58
Mekanik Test Sonuçları	70

X-ışını Difraksiyonu (XRD), Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) ve Taramalı	
Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	75
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	90



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. İyonlaştırıcı Olamayan Radyasyonun Tür ve Özellikleri	9
Tablo 2. Görünür Bölge Dalga Boyu Aralıkları	10
Tablo 3. Morötesi (UV) Işınlaraın Dalga Boyu Aralıkları ve Özelliklerine.....	11
Tablo 4. Müsaade Edilen Maksimum Doz	15
Tablo 5. Radyasyon Ölçüm Birimleri	26
Tablo 6. Kompozit Çeşitleri.....	41
Tablo 7. Kompozit Numunelerin Teorik MAC Değerleri (cm ² /g).....	59
Tablo 8. Kompozit Numunelerin Deneysel MAC Değerleri (cm ² /g)	59
Tablo 9. Kompozit Numunelerin Teorik Etkin Atom Numarası (Z _{eff}) Değerleri.....	61
Tablo 10. Kompozit Numunelerin Deneysel Etkin Atom Numarası (Z _{eff}) Değerleri	61
Tablo 11. Kompozit Numunelerin Teorik Etkin Elektron Yoğunluğu (N _{eff}) Değerleri.....	64
Tablo 12. Kompozit Numunelerin Deneysel Etkin Elektron Yoğunluğu (N _{eff}) Değerleri	64
Tablo 13. Kompozit Numunelerin Teorik Yarı Değer Kalınlığı (HVL) Değerleri	66
Tablo 14. Kompozit Numunelerin Deneysel Yarı Değer Kalınlığı (HVL) değerleri	66
Tablo 15. Kompozit Numunelerin Teorik Ortalama Serbest Yol (MFP) Değerleri	68
Tablo 16. Kompozit Numunelerin Deneysel Ortalama Serbest Yol (MFP) Değerleri	68
Tablo 17. Kompozit Numunelere Ait Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları	71
Tablo 18. Kompozit Numunelere Ait İletim Süresi ve Darbe Hızı Sonuçları	73
Tablo 19. Kompozit Numunelere Ait EDX Analiz Sonuçları	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Alfa bozunumu gösterimini	6
Şekil 2. Gama bozunumu gösterimi.....	8
Şekil 3. Elektromanyetik radyasyonun enerji ve dalga boyu spektrumu	9
Şekil 4. Elektromanyetik spekturumda görünür ışık.....	11
Şekil 5. Radyasyondan korunmanın üç temel yolu şematik gösterimi	16
Şekil 6. Radyasyon tipine göre uygulanan zırhlar	17
Şekil 7. Fotoelektrik olay gösterimi.....	18
Şekil 8. Compton saçılması gösterimi	19
Şekil 9. Çift oluşum gösterimi	20
Şekil 10. Numune üretimine kadar üretim sürecinin şematik bir gösterimi.....	40
Şekil 11. Hazırlanan kompozit numuneler	41
Şekil 12. SEM cihazının temel birimler	43
Şekil 13. EDX dedektörü (Si (Li) dedektörünün içyapısı)	45
Şekil 14. EDX dedektörü (SDD dedektör ve bağlı donanım)	46
Şekil 15. Gama spektrometresinin şematik gösterimi	48
Şekil 16. Ge dedektör gösterimi.....	50
Şekil 17. HPGe dedektörünün düzlemsel yapılandırması	51
Şekil 18. Eş merkezli yapılandırılması	52
Şekil 19. Kuyu tipi yapılandırılması	52
Şekil 20. Sayma sistemi gösterimi	52
Şekil 21. Gama ışını deney düzeneği gösterimi	54
Şekil 22. Basınç dayanımı test cihazı	56
Şekil 23. Eğilme dayanımı deney sistemi ve cihazı.....	57
Şekil 24. UPV cihazı.....	57
Şekil 25. Deneysel ölçüm spektrumu	58
Şekil 26. Kompozit numuneler için kütle azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi.....	60
Şekil 27. Kompozit numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi.....	62
Şekil 28. Kompozit numuneler için etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi.....	65
Şekil 29. Kompozit numuneler için yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimi	67
Şekil 30. Kompozit numuneler için ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimi	69
Şekil 31. Kompozit numuneler için basınç ve eğilme dayanımı sonuçları	72

Şekil 32. Kompozit numuneler için iletim süresi ve darbe hızı değerleri	73
Şekil 33. Kompozit numuneler için XRD deseni.....	75
Şekil 34. Kompozit numuneler için XRD deseni.....	76
Şekil 35. Kompozit numuneler için SEM görüntüleri	78



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

α	: Alfa parçacığı
λ	: Dalga boyu
γ	: Gama Parçacığı
θ	: Kütle merkezi sistemindeki saçılma açısı
μ	: Lineer azaltma katsayısı
μ_m	: Kütle azaltma Katsayısı
σ_t	: Toplam tesir kesiti
$\bar{\nu}_e$	: Antinötrino
ν_e	: Elektron nötrinosu.
σ_a	: Atomik tesir kesitini
$B^+ - B^-$	: Beta Parçacığı
c	: Işık hızı
e	: Elektron
E	: Enerji
e^+	: Pozitron
EMI	: Elektromanyetik dalga
eV	: Elektron volt
f	: Frekans
h	: Planck sabiti
HVL	: Yarı Kalınlık Değeri
I	: Şiddet
IAEA	: Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
ICNIRP	: Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Koruma Komisyonu
ICRP	: Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
keV	: Kilo elektron volt
LAC	: Lineer azaltma katsayısı
m_0	: Elektronun durgun kütlesi
MAC	: Kütle azaltma katsayısı
m_e	: Elektron kütlesi

MeV	: Mega elektron volt
MFP	: Ortalama Serbest Yol
N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu
Pb	: Kurşun
R	: Röntgen, radyasyon şiddet birimi
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
Sv	: Sievert, eşdeğer doz birimi
TAEK	: Türkiye Atom Enerji Kurumu
TENMAK	: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TVL	: Onda bir kalınlık değeri
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
UV	: Ultraviyole ışınları
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
Z	: Atom numarası
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası

GİRİŞ

Radyoaktivitenin keşfiyle beraber radyasyon kullanımı günlük hayatımızda yaygınlaşmış ve yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Radyasyon, hayatımızda hem faydalı hem de potansiyel olarak tehlikeli olabilecek çok çeşitli alanlarda kendini gösterir. Sağlık, enerji üretimi, endüstri, bilimsel araştırmalar ve çevre gibi birçok alanda hayatımızı iyileştiren radyasyon, doğru kullanıldığında büyük faydalar sağlarken, yanlış kullanımı veya aşırı maruz kalma ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu nedenle, insan ve çevre sağlığı için radyasyonun doğru kullanımı ve korunma önlemlerinin alınması büyük önem taşır. Bu yüzden zırhlamada birçok farklı malzeme kullanılarak önlem alınabilir. Radyasyona maruz kalma ihtimali yüksek olan durumlarda, bu tür malzemelerin dikkatli ve güvenli bir şekilde kullanılması gerekmektedir (Simon & Linet, 2014).

Nükleer enerji, tıbbi görüntüleme, havacılık mühendisliği ve savunma gibi çeşitli sektörlerde radyasyona dayalı teknolojilere artan bağımlılık, etkili radyasyon koruması sunabilen malzemelere olan talebin artmasına yol açmıştır. Gama ışınları ve X ışınları da dahil olmak üzere iyonlaştırıcı radyasyon, önemli sağlık tehlikeleri ve ekipman bozulma riskleri oluşturur ve bu tür radyasyonun yaygın olduğu ortamlarda kalkanlamayı kritik bir husus haline getirir. Tarihsel olarak, kurşun gibi yoğun malzemeler, yüksek atom numaraları ve etkili zayıflatma yetenekleri nedeniyle radyasyon kalkanı için standart olarak hizmet etmiştir. Ancak, kurşun bazlı malzemelerin çevresel toksisitesi, ağır ağırlığı ve sınırlı mekanik çok yönlülüğü, araştırmacıları ve mühendisleri yalnızca verimli değil, aynı zamanda daha güvenli ve modern uygulamalar için daha uyarlanabilir alternatif çözümler aramaya yöneltmiştir.

Yenilik için umut vadeden bir yol, hafiflik, tasarım esnekliği ve üstün mekanik özelliklerin benzersiz bir kombinasyonunu sunan polimer matris kompozitler alanında yatmaktadır. Bunlar arasında, epoksi reçine bazlı kompozitler, mükemmel yapışma, kimyasal direnç, boyutsal kararlılık ve işleme kolaylığı nedeniyle oldukça tercih edilir hale gelmiştir. Bununla birlikte, epoksi matrisler kendi başlarına iyonlaştırıcı radyasyonu etkili bir şekilde zayıflatmak için gerekli yoğunluk ve atom numarasından yoksundur. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, hem yapısal hem de koruma gereksinimlerini karşılayan çok işlevli kompozit sistemlerin geliştirilmesini sağlayan takviye liflerinin ve yüksek Z dolgularının dahil edilmesi esastır.

Bazalt lif ve Karbon lif gibi lif takviyeleri, geleneksel takviyelere alternatif olarak ilgi görmektedir. Volkanik lavın hızla soğumasından üretilen bazalt lif, iyi termal direnç ve mekanik performansa sahip, toksik olmayan, doğal olarak bol bulunan ve uygun maliyetli bir çözüm sunar. Mükemmel elastiklik modülü ve yüksek sıcaklıklara direnci ile bilinir ve bu da onu zorlu mühendislik uygulamaları için uygun bir aday yapar. Olağanüstü çekme mukavemeti, sertliği ve hafif yapısıyla tanınan karbon lif, kompozitlerin yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini artırır. Tek bir kompozit içinde bazalt ve karbon liflerinin hibridizasyonu, mekanik mukavemeti, termal kararlılığı ve dayanıklılığı iyileştirmek için her iki malzemenin en iyi özelliklerini birleştirerek potansiyel olarak sinerjik etkiler sağlayabilir.

Radyasyon kalkanlamadaki sınırlamaları ele almak için, yüksek atom numaralı malzemelerin eklenmesi hayati önem taşır. Antimon Trioksit ($Sb_2 O_3$), antimonun yüksek atom numarası nedeniyle iyonlaştırıcı radyasyonu zayıflatmadaki etkinliğiyle yaygın olarak tanınan bu tür bir bileşiktir. Radyasyon kalkanlama özelliklerine ek olarak, $Sb_2 O_3$ alev geciktirici özellikler sergiler ve bu da onu kompozit malzemelerde çok işlevli bir katkı maddesi yapar. Bir epoksi matris içinde dağıtıldığında, $Sb_2 O_3$, kompozitin termal ve yangına dayanıklı özelliklerine katkıda bulunurken gama ve X-ışını zayıflamasını önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

Bazalt, karbon elyaf ve antimon trioksit katkılı bir epoksi matrisle bütünleştirilmesi, gelişmiş kalkanlama malzemeleri geliştirmek için yeni bir yaklaşım sunar. Bu tür hibrit kompozitler, hem mukavemetin hem de radyasyondan korumanın en önemli olduğu endüstrilerin performans gereksinimleriyle uyumlu olarak mekanik sağlamlık ve radyasyon zayıflatma verimliliği arasında bir denge sunar. Polimer matris içindeki bazalt, karbon elyaf takviyesi ve yüksek Z dolgusunun benzersiz kombinasyonunun, ağırlık, sürdürülebilirlik ve çok işlevlilik açısından geleneksel koruma seçeneklerinden daha iyi performans gösteren bir malzeme sistemi yaratması bekleniyor.

Radyasyon zırhlama mekanizması, radyasyonun çeşitli türlerinin (alfa, beta, gamma, nötron gibi) maddelerle etkileşime girerek enerjilerinin emilmesi, yayılması veya soğurulması yoluyla radyasyonun zararlı etkilerinin azaltılmasını sağlamaktadır. Radyasyonun şiddeti, türü ve enerjisi, hangi malzemenin veya yöntemin kullanılacağını belirlemektedir. Zırhlama, esasen radyasyonun insan vücuduna, çevreye ya da cihazlara zarar vermesini engellemeye yönelik yapılır (Belgin, 2017).

Son yıllarda, radyasyon zırhlama malzemeleri, teknoloji ve bilimdeki ilerlemelerle birlikte önemli bir gelişim göstermiştir. Radyasyonun zararlı etkilerinden korunmak için kullanılan bu malzemeler, özellikle nükleer enerji, tıbbi uygulamalar ve endüstriyel alanlarda

yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Zırhlama malzemeleri son yıllarda ciddi bir ilerleme göstermiştir. Yeni teknolojiler ve malzemeler, daha hafif, daha dayanıklı ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Özellikle epoksi reçineler, boron karbür, lityum bileşenleri ve grafen gibi yenilikçi malzemeler, zırhlamada etkili olacaktır.

Bu tez, bazalt ve karbon elyaf ile takviye edilmiş ve farklı oranlarda antimon trioksit kullanılarak epoksi kompozitlerin radyasyon emilim etkilerinin sistematik olarak incelenmesine odaklanmaktadır. Amaçlar arasında kompozit numunelerin imalatı, mikro yapısal ve mekanik özelliklerinin analizi ve standart test yöntemleri kullanılarak radyasyon koruma performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi yer almaktadır. Dolgu içeriği ve matris özellikleri arasındaki etkileşimi anlayarak, çalışma, yapısal performanstan ödün vermeden maksimum koruma verimliliği için kompozit yapılandırmalarını optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Bu araştırmanın sonuçlarının, geleneksel seçeneklerden daha hafif, daha güvenli ve daha uyarlanabilir olan yeni nesil koruma malzemelerinin ilerlemesine katkıda bulunması beklenmektedir. Bulgular, toksik ve ağır koruma malzemelerine alternatif arayan endüstriler için önemli sonuçlar doğurabilir ve nihayetinde daha güvenli çalışma ortamlarının ve daha verimli koruyucu teknolojilerin geliştirilmesini destekleyebilir.

KURAMSAL TEMELLER

Radyasyon Türleri ve Etkileri

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalgalar veya parçacıklar halinde enerji yayılımıdır. Radyasyon, bir enerji türü olarak hem doğal hem de yapay olarak doğada bulunabilir. Radyoaktif çekirdeklerin kararsız halden kararlı hale gelebilmek için dışarıya verdikleri enerjiye radyasyon denir

Parçacık radyasyonu; atom altı parçacıkların (alfa, beta ve nötron parçacıkları gibi) yayılması ile oluşan radyasyon türüdür. Bu tür radyasyonlar özellikle radyoaktif maddelerin bozunmasıyla ortaya çıkar. Belli bir kütlesi ve enerjisi vardır. Çok hızlı hareket eden radyasyondur. (Önen, 1993)

Elektromanyetik radyasyon; elektrik ve manyetik alanların dalgalar halinde yayıldığı bir enerji türüdür. Kütsüz ve belirli bir enerjiye sahiptir. Işık, X-ışınları, gamma ışınları, ultraviyole ışınları, mikrodalgalar ve radyo dalgaları elektromanyetik radyasyon çeşididir. Bu tür radyasyonların, yayılması için ortama ihtiyaçları yoktur ve ışık hızıyla hareket ederler.

Radyasyon, maddeyle etkileşime girdiğinde iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olarak iki gruba ayrılabilir.

İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, bir atom ya da molekülden bir veya daha fazla elektronu kopararak o yapının iyon haline gelmesine neden olabilecek kadar yüksek enerji taşıyan radyasyon türüdür. Nükleer mühendislik açısından değerlendirildiğinde, bu radyasyon türü yalnızca bir fiziksel olay değil, aynı zamanda enerji üretiminin temel taşı, reaktör fiziğinin kritik bileşeni ve aynı zamanda güvenlik yönetiminin odak noktasıdır.

İyonlaştırıcı radyasyon, nükleer fisyon ve füzyon gibi çekirdek reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan alfa (α), beta (β) ve gama (γ) ışınlarının yanı sıra, serbest nötronlar ve yüksek enerjili fotonları da kapsar. Bu radyasyon türleri, nükleer reaktörlerin çalışması sırasında hem kontrollü enerji üretimi hem de çevresel radyasyon güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Özellikle nötron radyasyonu, nükleer mühendislikte reaktör tasarımı, zırhlama hesapları ve yakıt döngüsü analizlerinde detaylı olarak ele alınması gereken bir parametredir.

Doğrudan çekirdek yapısındaki değişikliklerle ilişkili olduğu için, iyonlaştırıcı radyasyon nükleer enerji teknolojilerinde kaçınılmaz bir bileşendir. Nükleer reaktörlerin kalbinde gerçekleşen fisyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan parçacıklar, kontrollü koşullarda yönlendirilerek enerji üretimi sağlanırken; aynı zamanda bu parçacıkların çevreye yayılımı sınırlandırılmalı ve gerekli radyasyon koruma önlemleri alınmalıdır. Bu bağlamda iyonlaştırıcı radyasyon, yalnızca enerji üretiminin değil, aynı zamanda güvenliğin, malzeme dayanıklılığının, atık yönetiminin ve çevresel etki değerlendirmelerinin de ayrılmaz bir parçasıdır.

Nükleer mühendislik disiplininde iyonlaştırıcı radyasyonun anlaşılması; reaktör fiziği, termal-hidrolik analizler, yakıt çevrimi, aktif ve pasif güvenlik sistemleri gibi birçok temel konuya doğrudan katkı sağlar. Aynı zamanda bu radyasyonun etkili bir şekilde izlenmesi ve sınırlandırılması için kullanılan dozimetri teknikleri, koruyucu zırh malzemeleri ve radyolojik güvenlik protokolleri, mühendislik tasarım sürecinde büyük yer tutar.

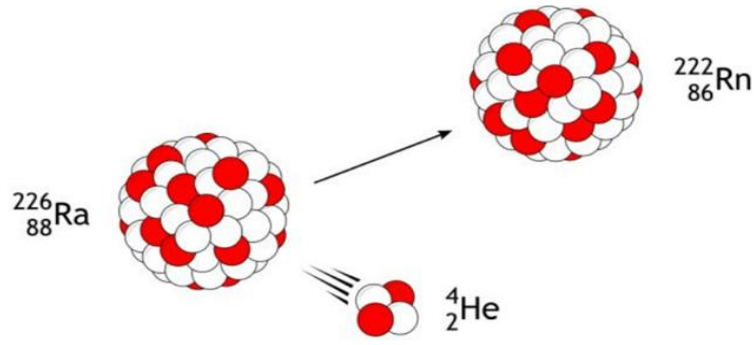
a) Alfa Bozunumu (α -Bozunumu); Alfa bozunumu, ağır ve kararsız atom çekirdeklerinin, iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı (helyum-4 çekirdeği) yayarak daha hafif ve kararlı bir çekirdeğe dönüşmesiyle gerçekleşen bir radyoaktif bozunma türüdür. Bu süreçte, ana çekirdeğin kütle numarası 4 birim, atom numarası ise 2 birim azalır. Alfa parçacıkları, yüksek kütleleri ve +2 elektrik yükleri nedeniyle maddeyle yoğun etkileşim halindedirler, bu da onları güçlü bir iyonlaştırıcı yapar ancak aynı zamanda nüfuz etme yeteneklerini sınırlar.

Alfa bozunumu ile açığa çıkan ürün çekirdek ana çekirdekten farklıdır. Bir elementin bu şekilde diğerine dönüşmesi olayına transmutasyon denir. Buna göre alfa bozunumu sembolik olarak şu şekilde gösterilir:



Burada N ana, N_i ürün, Z ve A ana çekirdeğin atom ve kütle numarasını temsil etmektedir. Alfa bozunumu, güçlü kuvvetlerin büyük çekirdekleri bir arada tutmasından ileri gelmektedir. α -parçacığı çekirdeğin bozunumu esnasında çekirdek içinde yaratılmaktadır.

Örneğin, ${}^{226}_{88}Ra$ bir alfa yayımlayıcıdır. $Z=88-2=86$ ve $A=226-4=222$ olan bir çekirdeğe dönüşür. $Z=86$ olan çekirdek radondur (${}^{222}_{86}Rn$). Böylece radyum bir alfa parçacığı yayımlayarak radona dönüşür. Alfa bozunumu Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Alfa bozunumu gösterimini

Alfa bozunumu, kuantum tünelleme fenomeniyle açıklanır. Çekirdek içindeki alfa parçacığı, nükleer kuvvetlerle tutulan bir potansiyel kuyusunda bulunur. Klasik fizik kurallarına göre, bu parçacığın çekirdekten kaçması mümkün değildir; ancak kuantum mekaniği, belirli bir olasılıkla bu parçacığın potansiyel bariyerini tünelleyerek çekirdekten çıkabileceğini öngörür. Bu süreç, George Gamow tarafından 1928 yılında teorik olarak açıklanmıştır.

b) Beta Bozunumu; Beta bozunumu, çekirdekteki bir nötronun protona dönüşmesi veya bir protonun nötrona dönüşmesiyle gerçekleşen radyoaktif bir bozunma türüdür. Bu süreçte, çekirdekten beta parçacığı (bir elektron veya pozitron) ve bir antinötrino (veya nötrino) salınır. Beta bozunumu, nükleer kararsızlık durumlarında çekirdeğin daha kararlı bir hale geçmesini sağlar. Beta bozunumu genelde beta eksi ve beta artı olmak üzere iki temel şekilde gerçekleşebilir. Ancak Elektron yakalama bazen bir beta bozunumu türü olarak dâhil edilir (Cottingham & Greenwood, 2001), çünkü zayıf kuvvet tarafından aracılık edilen temel nükleer süreç aynıdır. Aşağıda bu bozulma süreçleri tanımlanmıştır.

Beta Eksi (β^-) Bozunumu; genellikle nötron sayısı, proton sayısına göre daha yüksek olan atom çekirdeklerinde gerçekleşen bir radyoaktif dönüşüm sürecidir. Bu süreçte, çekirdekteki fazlalık gösteren nötronlar, zayıf etkileşim aracılığıyla proton ve elektron olarak ayrışır. Daha açık bir ifadeyle, nötronlar protona dönüşürken, beraberinde bir elektron (β^- parçacığı) ve bir antinötrino salınır. Oluşan elektron ise çekirdekten hızla ayrılarak ortama saçılır.

β^- bozunumunun en ilginç ve dikkat çekici özelliği, saçılan elektronların (beta parçacıkları) enerjilerinin sabit bir değer göstermemesi ve geniş bir enerji spektrumuna sahip olmasıdır. Bu durum, bozunum sürecine dâhil olan antinötrinonun enerjinin bir kısmını taşımasıyla açıklanır. Böylece, salınan elektronların enerjileri sıfır ile belirli bir maksimum değer arasında sürekli bir dağılım sergiler.

Nötronun proton ve elektrona dönüşümünü şu şekilde ifade edebiliriz:

$$^1_0n \rightarrow ^1_1p + ^0_{-1}e + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

e sembolü elektron içindir. $\bar{\nu}_e$ sembolü antinötrino için kullanılır.

Beta Artı (β^+) Bozunumu (Pozitron Yayımlı); Çekirdeğin kararlılığını sağlamak amacıyla gerçekleşen bozunmalardan biri de beta artı bozunumu veya diğer adıyla pozitron emisyonudur. Bu süreçte, proton bakımından zengin ve nötron sayısı nispeten düşük olan çekirdekler, nükleer kararlılık eğrisinin altında konumlanırlar. Bu çekirdekler, fazladan sahip oldukları protonları dengelemek için bir protonu bir nötron ve bir pozitron (e^+ parçacığı) ile bir nötrino (ν_e) oluşturarak bozunmaya uğrarlar.

Bu reaksiyon şu şekilde ifade edilir:



Bu denklemde:

p : proton

n : nötron

e^+ : pozitron (pozitif yüklü elektronun karşıt parçacığı)

ν_e : elektron nötrinosudur.

Pozitron, elektron ile aynı kütleye sahip olmasına rağmen, elektrik yükü pozitifdir. Bu nedenle pozitron, elektronun antiparçacığı olarak kabul edilir. Pozitronlar maddeye girerek elektronlarla karşılaştıklarında, birbirlerini yok ederek anihilasyon sürecine girer ve iki adet 511 keV'lik gama fotonu ortaya çıkarırlar. Bu anihilasyon olayı, pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi tıbbi görüntüleme uygulamalarında önemli bir yer tutar.

c) Elektron Yakalama (electron capture, EC); Elektron yakalama (EC), nükleer kararlılığın sağlanması amacıyla proton zengin olan çekirdeklerde meydana gelen bir radyoaktif bozunma sürecidir. Bu süreçte, çekirdek çevresindeki iç kabuk elektronlarından biri (genellikle K-kabuğundaki elektron) çekirdeğe doğru çekilir ve burada bir protonla birleşerek nötrona dönüşür. Böylece çekirdekteki proton sayısı bir azalırken, nötron sayısı bir artar. Bu olayda çekirdek bir nötrino salar. Elektron nötrinosu, çekirdekteki enerji fazlasını taşır ve çekirdeği terk eder.

Elektron yakalama sırasında çekirdeğin enerji seviyelerinde bir değişim olur. Ayrıca, çekirdeğin dışındaki elektron düzeni de etkilenir. Yakalanan elektronun yerinde bir boşluk (K-kabuğunda) oluşur. Üst enerji seviyelerinden elektronlar bu boşluğu doldurmak için aşağıya geçerler. Bu geçişler sırasında karakteristik X-ışınları veya Auger elektronları yayılır. Bu yayılmalar, çekirdeğin kimyasal elemente özgü “parmak izi” niteliğinde olduğu için malzeme analizinde de önemli rol oynar. Bu olay aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (4)$$

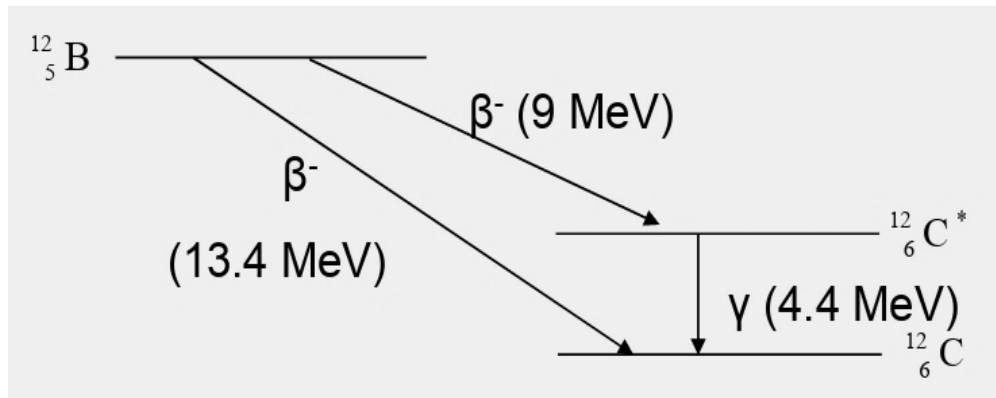
Örnek olarak Argon-37 çekirdeğinin bir elektron yakalayarak Klor-37'ye dönüşümü verilebilir.

$$^{37}_{18}\text{Ar} + e^- \rightarrow ^{37}_{17}\text{Cl} + \nu_e \quad (5)$$

d) Gama Bozunumu (γ -Bozunumu); Gama bozunumu, atom çekirdeğinin yüksek enerjili bir uyarılmış durumdan daha düşük enerjili bir duruma geçmesi sırasında elektromanyetik radyasyon şeklinde gama ışını (γ -fotonu) yaymasıdır. Bir γ -ışını hiçbir yük taşımadığından γ bozunumu sonucu olarak elementte herhangi bir değişiklik olmaz. Bu süreçte atom çekirdeğinin proton ve nötron sayısı değişmez; yalnızca çekirdeğin enerji düzeyi farklılaşır.

Gama bozunumu, genellikle alfa veya beta bozunmalarından sonra, geriye kalan çekirdeğin hâlâ fazla enerjili olduğu (uyarılmış halde bulunduğu) durumlarda ortaya çıkar. Gama fotonlarının enerjileri tipik olarak keV (kiloelektronvolt) ila MeV (megaelektronvolt) aralığındadır. Bir çekirdeğin uyarılmış durumu, nükleonlar arasındaki yeniden düzenlenmeler veya çekirdeğin deforme olmuş şekli gibi nedenlerle ortaya çıkar. Çekirdek, uyarılmış halinden temel duruma (veya daha düşük enerjili başka bir uyarılmış hale) geçerken elektromanyetik dipol veya kuadrupol geçişleri gerçekleştirir ve gama fotonu salar.

Bir çekirdek, başka bir parçacıkla şiddetli bir çarpışma yapması sonucu uyarılmış düzeye geçebilir. Ayrıca, çok yaygın olarak da bir çekirdek önceki bir radyoaktif bozunmadan sonra uyarılmış durumda kalabilir. Tipik bir örnek, aşağıdaki Şekil 2 ile verilen enerji seviye diyagramında görülmektedir.



Şekil 2. Gama bozunumu gösterimi

Genel olarak gamma bozunumu,

$$^A_Z\text{N}^* \rightarrow ^A_Z\text{N} + \gamma \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada * işareti çekirdeğin uyarılmış olduğunu gösterir. Birçok durumlarda, bir çekirdek bir γ -ışınını yaymadan evvel uyarılmış durumda kalır. Bu durumda çekirdek ara kararlı düzeydedir denir. Bu bir izomer olarak adlandırılır.

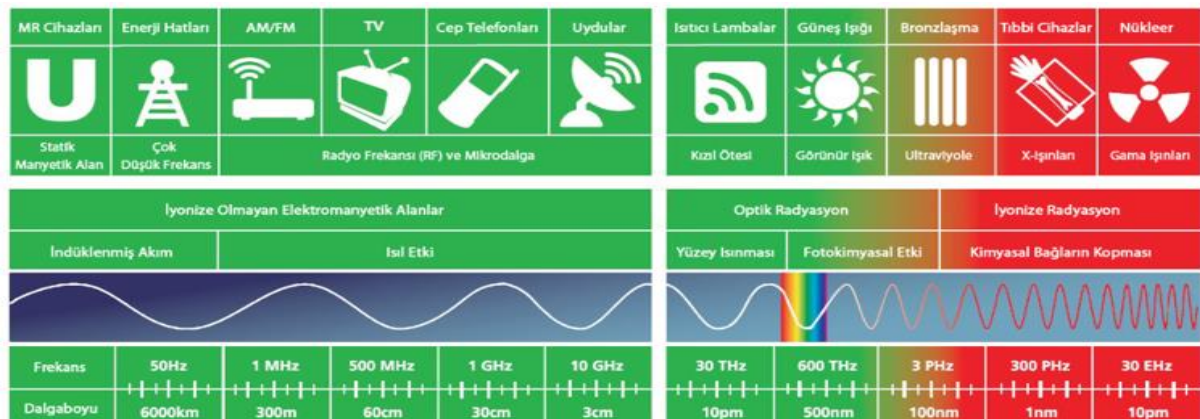
İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon atomlardan elektron koparmaya (iyonlaştırmaya) enerjisi yetmeyen elektromanyetik dalgalardır. Elektromanyetik spektrumda, iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar çoğunlukla düşük enerjili ve uzun dalga boylu bölgelerde yer alır. Bu tür radyasyonlar, atomları iyonlaştıramaz, ancak molekülleri uyarabilir veya ısıtabilirler. Şekil 3'te iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri gösterilmiştir ve bazıları şunlardır: Radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi (IR) görünür ışık, morötesi ışınlar bu radyasyon türlerine örnek verilebilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonun tür ve özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonun Tür ve Özellikleri

Radyasyon Türü	Dalga Boyu	Frekans Aralığı	Enerji (Ev)	Kaynaklar/ Kullanım alanları
Radyo dalgaları	>10m-1mm	<300MHz	$<10^{-5}$	Uzay kaynakları / TV, Radyo, mobil iletişim
Mikrodalgalar	1 mm – 1 m	300 MHz – 300 GHz	$10^{-5} - 10^{-3}$	Uydu sinyalleri, Güneş / Wi-Fi, mikrodalga fırınlar, radar sistemleri
Kızılötesi (IR)	700 nm – 1mm	300 GHz – 400 THz	$10^{-3} - 1.7$	Güneş, sıcak cisimler/ Termal Kamera, Gece Görüşü, Uzaktan Kumanda
Görünür Bölge	400 –700 nm	400 –790 THz	1.7 – 3.3	Güneş, yıldızlar / Görme, fotoğrafçılık, aydınlatma
Morötesi (UV-A,UV-B)	100 – 400 nm	790 THz – 3 PHz	3.3 – 12.4	Güneş, yıldızlar / Güneş Işığı, Sterilizasyon, Solaryum

Not. Yukarıdaki tabloda yer alan değerler literatürden derlenmiştir. (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection [ICNIRP], 2020; World Health Organization [WHO], 2014; Foster & Repocholi, 2004; National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2023)



Şekil 3. Elektromanyetik radyasyonun enerji ve dalga boyu spektrumu

Radyo Dalgaları: Elektromanyetik spektrumda dalga boyu en büyük, enerjisi ve frekansı en küçük olan iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüne örnektir. Termal etkilere sahiptir ancak iyonlaştırıcı hasara neden olmaz (ICNIRP, 2020; WHO, 2024). Uygulama alanları iletişim, tıp, radar, endüstri (IEEE Access,2023).

Mikrodalgalar: Dalga boyu radyo dalgalarının dalga boyuna göre daha küçük, enerji ve frekansı ise radyo dalgalarından daha büyük kızılötesi ve görünür ışıktan daha küçük olan iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüdür. Termal etkiler oluşturabilir ve iyonlaştırıcı özellikte olmadığı için doğrudan DNA da hasara neden olmaz (ICNIRP, 2020). Kullanım alanları iletişim (uydu, haberleşme, radar) ısıtma (mikrodalga fırınlar) (WHO, 2006), sağlık (fizyoterapide doku ısıtma) (Polk&Postow,1996), askeri ve bilimsel (radar teknolojisi, hava durumu tahmin sistemleri, astronomi)

Kızılötesi (IR): Dalga boyu mikrodalgalardan küçük, enerji ve frekansı mikrodalgalardan daha büyüktür. Boşlukta ışık hızıyla yayılırlar. Biyolojik olarak termal etkilere sahiptir. Uygulama alanları; tıbbi ve endüstriyel uygulamalar, savunma ve güvenlik, günlük yaşam ve tüketici elektroniği çevredir. Bunların yanı sıra gece görüş sistemleri, ısıtma sistemleri, uzaktan kumandalar, astronomi gibi pek çok alanda yer almaktadır.

Görünür Bölge: İnsan gözü tarafından algılanabilen görünür ışık dalgaları iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türüdür. Bu bölge sırasıyla kırmızından başlayarak mora doğru ilerler. Kırmızından mora doğru gidildikçe enerji artar ve dalga boyu azalır. Görünür bölge dalga boyu aralıkları Tablo 2’de yer verilmiştir. Dalga boyu en büyük enerjisi ve frekansı en küçük olan renk kırmızı iken mor ışığın dalga boyu en küçük, enerji ve frekansı en büyük olan renktir. Şekil 4’de Elektromanyetik spekturumda görünür ışık yer verilmiştir. Uygulama alanları aydınlatma sistemleri, tıp, tarım ve bitki yetiştiriciliği, optik ve görüntüleme sistemleri, sanat, görsel iletişim vb. uygulamalardır.

Tablo 2. Görünür Bölge Dalga Boyu Aralıkları

Renk	Dalga boyu (nm)
Mor	380-450
Mavi	450-495
Yeşil	495-570
Sarı	570-590
Turuncu	590-620
Kırmızı	620-750

NOT. Veriler literatürden derlenmiştir. (Hecht,2002; Pedrotti *et al.* 2017)



Şekil 4. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık

Morötesi (UV): Elektromanyetik spektrumdan görünür bölgeden daha küçük dalga boyuna sahiptir. Dalga boyu azaldıkça frekansı artar. Enerjisi görünür ışıktan daha büyüktür bu durum (UV-A) atomları iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmadığı için biyolojik hasara neden olmaz ancak UV-B ve UV-C DNA üzerinde etkilere neden olabilir. Tablo 3’te morötesi (UV) ışınların dalga boyu aralıkları ve özelliklerine yer verilmiştir. Kullanım alanları: Sterilizasyon, gıda güvenirliliği, adli tıp, astronomi, endüstriyel uygulamalarda (kürleme).

Tablo 3. Morötesi (UV) Işınların Dalga Boyu Aralıkları ve Özelliklerine

Türü	Dalga Boyu(nm)	Özelliği
UV-A	315-400	En düşük enerjili; cilt yaşlanması bronzlaşma
UV-B	280-315	Güneş yanığı, D vitamin, DNA hasarı
UV-C	100-280	En yüksek enerjili; sterilizasyon, atmosfer tarafından tutulur

Not. Veriler NASA (2023), Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) ve ICNIRP (2020) kaynaklarından derlenmiştir.

Radyasyonun İnsan Sağlığına ve Çevreye Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyon, atom ve molekülleri iyonlaştırarak canlılardaki dokular veya hücrelere zarar verebilir. Bu durum DNA'yı bozabilir, genetik bozukluklar, doğum kusurları ve düşük gibi etkilere neden olabilir. Uzun vadede radyasyona maruz kalma, kanser gibi hastalıkların riskini artırabilir ve ani ölümlere sebebiyet verebilir. İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik dokulardaki etkileri radyasyonun türüne, enerjisine, maruz kalma süresine ve alınan doza bağlı olarak değişir. Bu etkiler somatik (deri yanıkları, kanser, tümör) veya kalıtsal (radyasyon üreme hücrelerinin mutasyona uğramasına neden olur bu durum gelecek nesillere aktarılır) olabilir.

Radyasyonun çevresel etkileri, sadece maruz kalan insanları değil; hava, su, toprak ve canlı yaşamı gibi doğal sistemleri de doğrudan etkilemektedir. Toprak üzerindeki etkisi toprakta bulunan mikroorganizmalar radyasyona karşı duyarlıdır. Bu mikroorganizmalar toprağın verimliliğinin artmasını sağlayan azot ve karbon döngüleri gibi olaylarda rol oynarlar. Radyasyon bu döngülerinin gerçekleşmesini engelleyerek bitkilerin büyümesini ve tarım ürünlerinin verimini azaltır.

Radyoaktif elementlerin toprağa karışmasıyla, yarı ömürleri uzun olan izotoplar (örneğin Sezyum-137, Stronsiyum-90) yüzeyde birikir. Bu maddeler uzun yıllar boyunca toprakta kalır ve çevresel radyasyon düzeyini artırır (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2006).

Su üzerinde etkisi özellikle nükleer santrallerde meydana gelen kazalar, nükleer silah testleri, nükleer santrallerden sızıntılar ve radyoaktif atıkların yanlış yönetimi sonucunda belirgin hale gelmektedir. Bunun sonucunda, radyasyon yer altı ve yer üstünde bulunan su kaynaklarını da olumsuz bir şekilde etkiler. Kirlenmiş suları kullanarak büyüyen bitkisel ürünler dolaylı olarak insan ve hayvanlar üzerinde de olumsuz etki oluşturabilir. Bir ekosistemdeki enerji akışını ve madde döngüsünü etkileyerek, tür çeşitliliğini azaltabilir (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [UNSCEAR], 2008).

Hava ve atmosfer üzerindeki etkisi ise iyonlaştırıcı radyasyonun genellikle radyoaktif parçacıkların atmosfere karışması sonucunda gerçekleşir. Bu olay nükleer santrallerde reaktör patlamaları ve nükleer kazaları sırasında ortaya çıkar. Atmosfere karışan parçacıklar, insan ve hayvanları solunum yoluyla doğrudan etkiler ve zarar görmesine yol açar. Asit yağmurları da aynı şekilde, radyonüklid taşıyan yağışlar olduğundan toprağı ve suyu kirletir (WHO, 2016).

Radyasyon elektronik sistemlerde zarara neden olabilir. İyonlaştırıcı radyasyon zamanla birikerek, yarı iletkenlerin içinde elektriksel yük fazlalığına neden olur. Bu birikim, Transistörlerde eşik voltajının değişmesine, sızıntı akımlarının artmasına ve cihazın kararsız bir yapıda çalışmasına neden olur. Yüksek enerjili parçacıklar, mikroçiplerle etkileştiğinde ani ve bölgesel etkiler oluşturur. Bunlar; hafızada veri bozulması, Transistörlerde kırılma, kalıcı hasardır (Schwank, *et al.* 2008).

Radyasyon, yarı iletkenlerde atom boşluklar (vacancy) ve yer değiştirmeler (displacement damage) yaratabilir meydana gelen bu durum taşıyıcı hareketliliğini ve devrenin performansını azaltabilir.

Radyasyonun neden olduğu enerjini soğurulması yarıiletkenin sıcaklığını artırarak verimini düşürür. Bu durumdan etkilenen sistemlere örnek vermek gerekirse hafıza birimleri, uydu ve uzay sistemleri, havacılık elektroniği, nükleer santral kontrol sistemleri, tıbbi cihazlardır (Messenger & Ash, 1992).

Radyasyondan Korunmanın Önemi ve Gerekliliği

Radyasyon, modern toplumların teknolojik gelişmişlik düzeyini artıran bir unsur olarak tıptan sanayiye, enerjiden araştırma-geliştirme faaliyetlerine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yaygınlık, beraberinde çeşitli sağlık ve güvenlik risklerini de

getirmektedir. Özellikle iyonlaştırıcı radyasyonun canlı dokular üzerinde meydana getirdiği biyolojik etkiler, insan sağlığını tehdit eden ciddi sonuçlara yol açabilmektedir (ICRP, 2007).

İyonlaştırıcı radyasyon, atom çekirdeğinden veya yüksek enerjili parçacıklardan yayılan enerjiyle canlı hücrelerin DNA yapısını bozabilir. Bu durum mutasyonlara, kanser gelişimine, üreme sistemi bozukluklarına ve çeşitli doku hasarlarına neden olabilir (Hall & Giaccia, 2018). Bu nedenle radyasyona maruziyetin, bilimsel olarak belirlenmiş sınırlar dâhilinde tutulması ve korunma önlemleriyle en aza indirilmesi gerekmektedir.

Radyasyondan korunma temel olarak üç ilkeye dayanır: zaman, mesafe ve zırlama. Bu ilkeler, hem radyasyonla çalışan personelin hem de halkın güvenliğini sağlamak için evrensel standartlar olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda, radyasyonla çalışan personelin kişisel doz takibi, periyodik sağlık kontrolleri, eğitim programlarına katılımı ve uygun kişisel koruyucu donanım kullanımı da korunma stratejileri arasında yer almaktadır (Türkiye Atom Enerji Kurumu [TAEK], 2010).

Uluslararası kuruluşlar, radyasyondan korunmayı düzenleyen temel çerçeveyi oluşturmuştur. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICRP), radyasyon güvenliği ilke ve standartlarını belirlerken; Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA), bu standartların uygulanmasını ve denetlenmesini teşvik etmektedir. Türkiye'de ise Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK), ulusal düzeyde radyasyondan korunma politikalarını yürütmektedir (TENMAK, 2023).

Tıbbi uygulamalarda radyasyonun yeri özel bir önem arz etmektedir. Tanısal görüntüleme ve radyoterapi gibi uygulamalarda hastaların radyasyona kontrollü biçimde maruz kalması gereklidir. Ancak, yanlış uygulamalar veya doz aşımı, beklenen faydadan çok zarara neden olabileceği için dikkatli planlama ve doz optimizasyonu zorunludur (Bushberg *et al.* 2012).

Radyasyondan korunma, yalnızca teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda etik, yasal ve çevresel bir sorumluluktur. Hem mesleki maruziyet hem de halk sağlığının korunması için geliştirilen uluslararası protokoller, riskin kaynağında azaltılmasını hedeflemektedir. Bu bağlamda, radyasyonla ilgili farkındalık oluşturmak, sürdürülebilir bir güvenlik kültürünün inşası açısından da büyük önem taşımaktadır. Radyasyondan korunmada üç temel ilke bulunur. Bunlar;

a) Gerekliklik (Justification) İlkesi: Radyasyonun zararlı etkileri dikkate alındığında, radyasyon içeren bir uygulamanın gerçekleştirilmesinin gerçekten gerekli ve bilimsel olarak gerekçelendirilebilir olup olmadığı mutlaka sorgulanmalıdır. Radyasyonun

uygulanması, sadece teknik olarak mümkün olmasıyla değil; amaçlanan faydanın, maruz kalınacak radyasyonun potansiyel biyolojik ve çevresel zararlarına kıyasla anlamlı derecede yüksek olması durumunda kabul edilebilir sayılmalıdır (ICRP, 2007).

Radyasyona dayalı herhangi bir uygulamanın yapılmasından önce, bu işlemin getireceği potansiyel faydaların, ortaya çıkabilecek zarar ve risklerden açık şekilde daha ağır basması gereklidir. Örnek olarak tıbbi bir görüntüleme yönteminin ya da tedavinin sadece var olan bir klinik gerekliliğe dayalı olarak uygulanması, bu ilkenin doğrudan yansımasıdır. Gereksiz tekrarlanan tetkikler, klinik gereklilikten yoksun X-ışını uygulamaları ya da radyasyon içeren yöntemlerin, radyasyonsuz alternatiflerle değiştirilebildiği durumlar bu ilkeye aykırıdır (UNSCEAR, 2010).

Uygulamanın sağladığı fayda ile radyasyonun yol açabileceği olası riskler arasında yapılacak fayda-zarar analizi, bu tür müdahalelerin meşruiyetini belirleyen en önemli ilkedir. Eğer aynı hedefe, radyasyon içermeyen alternatif bir yöntemle ulaşılabiliyorsa, bu alternatifin de analiz edilmesi ve tercih edilmesi etik ve bilimsel bir sorumluluktur. Dolayısıyla, yalnızca bireyleri korumaya yönelik teknik önlemler yeterli değildir. Radyasyon kullanımının gerekliliğini belirleyecek ilkesel ve normatif bir çerçevenin, yetkili otoriteler (örneğin sağlık otoriteleri, düzenleyici kurumlar) tarafından oluşturulması ve bu anlayışın uygulayıcılar tarafından benimsenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu durum, radyasyondan korunmanın yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda politik, etik ve kurumsal boyutlar da içeren çok katmanlı bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak kesin fayda sağlamayacak hiçbir radyasyon uygulaması yapılmamalıdır.

b) Optimizasyon İlkesi (ALARA – As Low As Reasonably Achievable): Optimizasyon ilkesi, onaylanmış ve gerekli görülen ışınlamalarda dahi maruziyetin sosyal ve ekonomik faktörler göz önüne alınarak makul ölçüde en düşük düzeyde tutulmasını ifade eder. Bu ilke, ALARA kavramı ile uluslararası literatürde yer almaktadır. Örneğin, sadece başparmak röntgeni istenen bir hastada, tüm elin görüntülenmesi, gereksiz doz artışına neden olur ve bu durum ALARA ilkesine aykırıdır (Bushberg *et al.* 2012).

Radyasyonla çalışan personel için çalışma alanlarının tasarımında, hasta görüntüleme protokollerinde ya da cihaz kalibrasyonlarında bu ilke temel alınmalıdır. Doz ölçüm cihazlarının etkin kullanımı, uygun kurşun kalkanlama, dijital görüntüleme teknikleriyle gereksiz tekrarlardan kaçınma gibi uygulamalar bu kapsamda yer alır. Ayrıca personelin eğitimi ve sürekli mesleki gelişim programları optimizasyon ilkesinin sürdürülebilirliğinde kritik rol oynar (Martin & Harbison, 2018).

c) **Doz Sınırlandırması İlkesi:** Sadece alınmasına izin verilen maksimum doz sınırları geçilmemelidir. Maruziyetin tamamen ortadan kaldırılamadığı durumlarda, bireylerin yıllık alabilecekleri maksimum doz sınırları ulusal ve uluslararası standartlarla belirlenmiştir. Bu sınırlar, özellikle mesleki maruz kalan çalışanlar ve genel halk için farklı kategorilerde düzenlenmektedir. Hasta dozları için ise sabit sınır yerine, rehber doz düzeyleri (Diagnostic Reference Levels – DRLs) önerilmektedir.

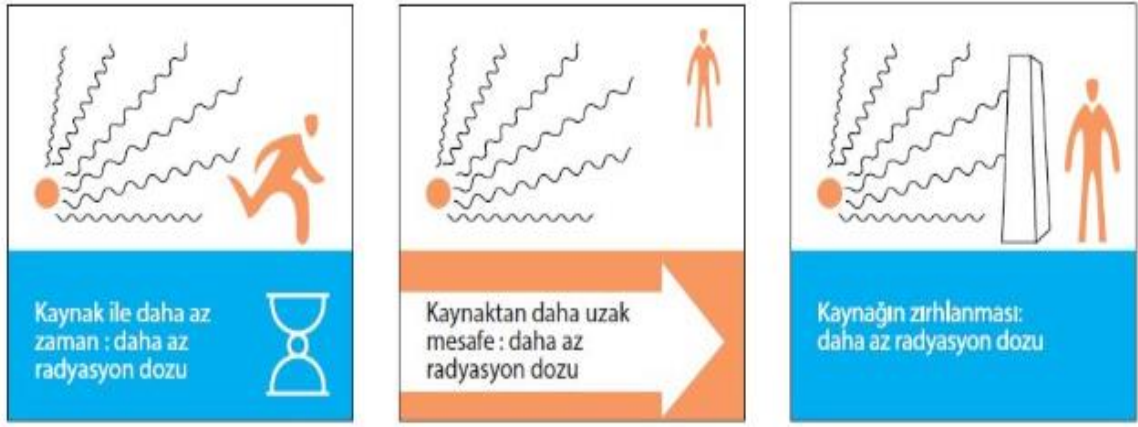
Bu ilkenin amacı, bireyin yaşam boyu toplam radyasyon yükünü sınırlamak ve maruz kalınan riskin kontrol altında tutulmasını sağlamaktır. Doz sınırları, iyonlaştırıcı radyasyonun stokastik etkilerinin (örneğin kanser riski) toplumsal düzeyde azaltılmasına katkıda bulunur (ICRP, 2007). Uluslararası radyasyon güvenliği standartları, kişilerin yıllık alabileceği radyasyon dozuna sınırlamalar getirmiştir. Müsaade edilen maksimum doz Tablo 4’te yer almaktadır. Zırlama yapılmazsa bu sınırların aşılması kolaylaşır.

Tablo 4. Müsaade Edilen Maksimum Doz

Müsaade Edilen Maksimum Doz			
		Görevli	Halk
YILLIK ETKİN DOZ		20 mSv	1 mSv
YILLIK EŞDEĞER DOZ	Göz	150 mSv	15 mSv
	Cilt	500 mSv	50 mSv
	Kol-Bacak	500 mSv	50 mSv

Radyasyondan Korunma Yöntemleri

İyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerine karşı bireyleri ve toplumu korumak amacıyla geliştirilen koruma stratejileri, yalnızca ilkesel yaklaşımlarla değil, uygulamaya dönük fiziksel yöntemlerle de desteklenmelidir. Şekil 5 ‘te Radyasyondan korunmanın üç temel yolu şematik olarak vermiştir. Bunlar zaman, mesafe ve zırlama (koruyucu engel). Bu üçlü prensip; hem medikal radyoloji uygulamalarında hem de endüstriyel ve nükleer enerji alanlarında yaygın olarak benimsenmiştir (Bushberg *et al.* 2012; Martin & Harbison, 2018).



Şekil 5. Radyasyondan korunmanın üç temel yolu şematik gösterimi

a) Zaman Kuralı: Radyasyondan korunmanın ilk ve en kolay olan yöntemi zaman kuralıdır. Radyoaktif kaynaklarla yapılan çalışmalarda gereksiz yere uzun süre radyasyona maruz kalmaktan kaçınılmalıdır. Radyasyon kaynağına maruz kalma süresi arttıkça alınan toplam doz miktarı da artar. Radyasyona maruz kalınan süre ile alınan doz doğru orantılıdır. Bu nedenle radyasyonla temas süresinin azaltılması, maruziyetin minimize edilmesi açısından en temel yaklaşımlardan biridir. Özellikle sağlık çalışanları için floroskopik işlemler sırasında gereksiz bekleme sürelerinden kaçınılması ve işlemlerin hızlı, planlı şekilde yürütülmesi büyük önem taşır. Aynı şekilde, hastalar için de çekim süresinin kısaltılması ve tekrarlayan görüntülemelerin en aza indirilmesi bu kapsamda değerlendirilmelidir.

b) Mesafe Kuralı: Radyasyon kaynağı ile kişi arasındaki mesafenin artırılması, alınan dozun azalmasını sağlar. Bu azalma, ters kare yasası (inverse square law) ile açıklanır; yani mesafe iki kat artırıldığında, maruz kalınan doz dörtte bire düşer. Bu nedenle, özellikle sabit radyasyon kaynaklarıyla çalışan alanlarda operatörlerin, kaynaklardan mümkün olduğunca uzak durmaları sağlanmalı, gerektiğinde uzaktan kumandalı sistemler kullanılmalıdır. Bu yaklaşım, hem sağlık hem de nükleer enerji sektörlerinde kritik bir koruma tekniğidir.

Radyasyon kaynağından mümkün oldukça hızlı uzaklaşarak, maruz kalınabilecek doz miktarı azaltılabilir. Kaynaktan uzaklaşıldıkça ışınımın şiddeti de azalır. Maruz kalınan doz hızı ise uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değişir.

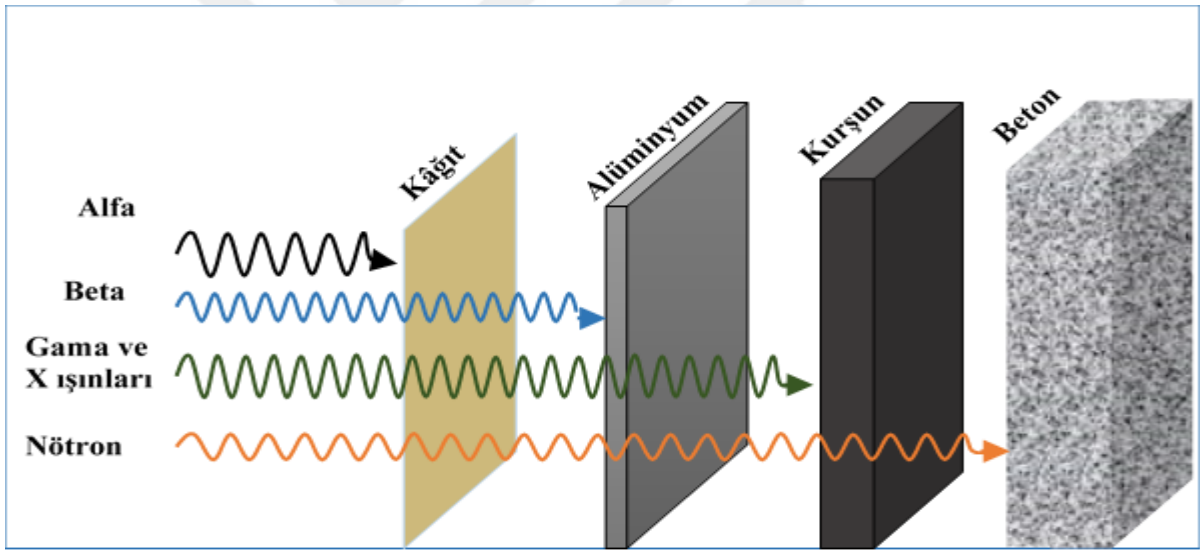
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (7)$$

I : doz hızını, d : radyasyon kaynağına olan uzaklığı ifade eder.

c) Zırhlama Kuralı: Radyasyon kaynağının etkisini azaltmak için önüne konan engele zırh denir. Kişi ile radyasyon kaynağı arasına konulan uygun bir koruyucu engele

zırhlama denir. Zırhlama malzemeleri, radyasyonun şiddetini azaltarak, kişilerin maruz kaldığı dozu minimuma indirmeye yardımcı olur. Diğer bir tanımlamada radyasyonun yayılmasını ve geçişini engelleyen ya da zayıflatan malzemelerin kullanılması "zırhlama" olarak tanımlanır. Zırhlama malzemesi, kullanılan radyasyon türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin:

- Kurşun (Pb): X-ışını ve gama ışınlarına karşı en yaygın kullanılan zırhlama malzemesidir. Kurşun bloklar, perdeleme panelleri ve duvar kaplamaları bu kapsamda kullanılır.
- Beton: Özellikle nükleer tesislerde nötron ve yüksek enerjili gama radyasyonuna karşı tercih edilir.
- Su ve parafin: Nötron radyasyonuna karşı etkili yavaşlatıcı ve soğurucu maddelerdir. Zırhlama uygulamaları, yalnızca fiziksel yapılarla sınırlı kalmamalı; aynı zamanda çalışanlar için kişisel koruyucu ekipman (kurşun önlük, tiroid koruyucu, kurşun gözlük vb.) kullanımı ile desteklenmelidir. Radyasyon tipine göre uygulanan zırhlar Şekil 6' da gösterilmiştir



Şekil 6. Radyasyon tipine göre uygulanan zırhlar

Radyasyon-Madde Etkileşimi

İyonlaştırıcı radyasyonun maddeyle etkileşimi, radyasyonun enerjisini kaybederek yavaşlaması veya tamamen durması ile sonuçlanır. Bu etkileşimler üç ana mekanizma ile gerçekleşir:

- Fotoelektrik Etki
- Compton Saçılması
- Çift Oluşumu

Bu etkileşimler sayesinde radyasyonun azaltma Olasılıkları hesaplanabilir ve uygun zırhlama sistemleri tasarlanabilir.

Fotoelektrik Etki

Yeterli enerjiye sahip bir foton içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L kabuklarındaki bir elektrona bütün enerjisini aktararak onu çekirdeğin etkisinden kurtarır, bu olaya fotoelektrik etki denir. Serbest kalan elektrona ise fotoelektron denir. Koparılan elektronun oluşturduğu boşluğu daha yüksek enerji seviyesindeki diğer elektron tarafından doldurulur ve açığa çıkan fazla enerji karakteristik X ışını olarak salınır. Şekil 7’de fotoelektrik olay gösterilmiştir. Fotoelektrik etki, 0,5 MeV ‘den daha düşük enerjili fotonlar tarafından gerçekleşir.

Bir fotonun enerjisi:

$$E = h \cdot f \quad (8)$$

E : Fotonun Enerjisi (J veya eV)

h : Planck sabiti (6.626×10^{-34} j. s)

f : Fotonun frekansı (Hz)

Bu olay sırasında gelen fotonun enerjisinin bir miktarı elektronu atomdan koparabilmek için harcanır ve geri kalan kısmı ise kopan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır (Şahin,1999).

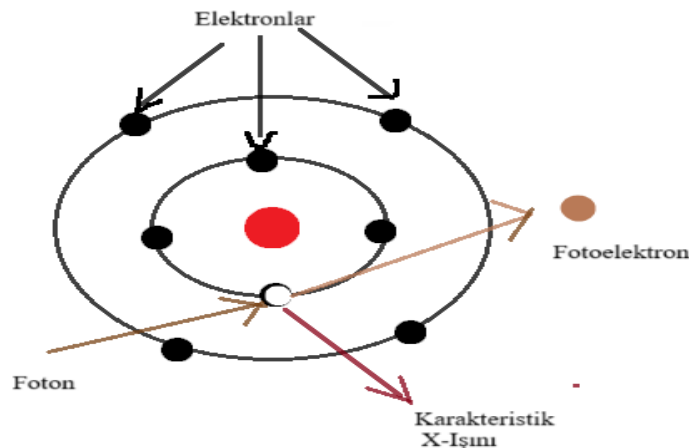
Bu olayda fotona aktarılan enerji:

$E_{\text{Bağlanma}}$: Elektronun atomdaki bağlanma enerjisi

E_{Kinetik} : Elektronun kinetik enerjisi

$$E_{\text{Foton}} = E_{\text{Bağlanma}} + E_{\text{Kinetik enerji}} \quad (9)$$

$$h \cdot f = E_B + E_K \quad (10)$$

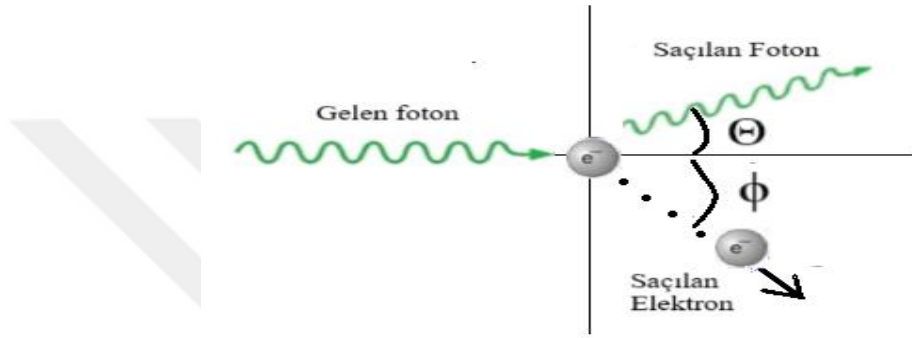


Şekil 7. Fotoelektrik olay gösterimi

Foton-elektron etkileşimleri düşük enerjiler seviyelerinde dış yörüngelerde meydana gelirken yüksek enerji seviyelerinde iç yörüngelerde meydana gelir (Dağlı, 2002; Kaplan, 1969).

Compton Saçılması

Compton saçılması, yüksek enerjili bir fotonun atoma zayıf bağlanmış veya serbest halde bulunan bir dış yörünge elektronuyla etkileşmesi sonucunda oluşur. Momentumun korunumu gereği elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun tüm enerjisini soğuramaz. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır saçılmaya uğrayarak yoluna devam eder. Compton Saçılması Şekil 8’ de gösterimştir.



Şekil 8. Compton saçılması gösterimi

Compton saçılması sonucu fotonun dalga boyundaki değişim aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (11)$$

$\Delta\lambda$: fotonun dalga boyundaki değişim

λ' : Saçılan fotonun dalga boyu

λ : Gelen fotonun dalga boyu

h : Planck sabiti(6.626×10^{-34} j. s)

m_e : Elektronun durgun kütlesi (9.1×10^{-31} kg)

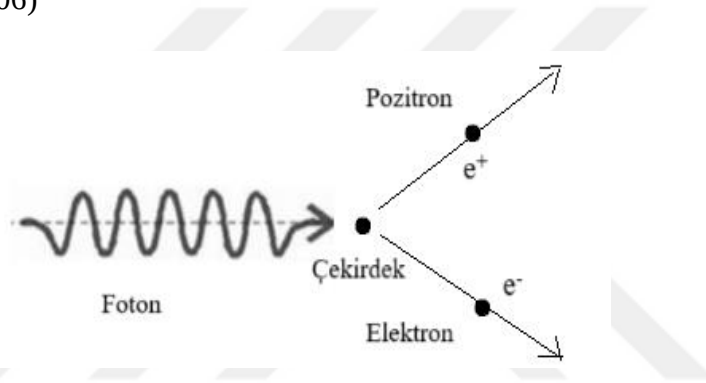
c : Işık hızı

θ : Saçılan fotonun yön değiştirme açısı

Compton dalga boyundaki kayma θ açısına bağlıdır. Saçılan fotonun dalga boyu gelen fotonun dalga boyundan büyüktür. Gelen fotonun enerjisi de saçılan fotonun enerjisinden büyük olur. Gelen ve saçılan fotonların hızları aynıdır. Yüksek enerjili fotonların enerjileri bir düzeye düşünceye kadar Compton saçılmasına uğrarlar. Bu olaydan itibaren fotoelektrik etkiyle soğrulurlar. Çünkü fotonlar bir tek Compton saçılmasıyla tamamen soğurulmazlar (Kaplan, 1969).

Çift Oluşum

Enerjisi yeteri kadar yüksek bir foton, atom çekirdeğinin yakınından geçebilecek enerjiye sahipse, kütesiz olan foton atom çekirdeğiyle etkileşime girerek biri pozitif ve biri negatif yüklü iki parçacık oluşturur. Oluşan pozitif yüklü parçacığa pozitron, negatif yüklü parçacığa ise elektron denir. Oluşan pozitron ve elektron çiftinin yükleri ve kütleleri eşit fakat işaretleri zıttır. Çift oluşumunun gerçekleşebilmesi için, gelen fotonun enerjisinin en az $2 \times 0,511 = 1,022$ MeV olması gerekmektedir. Çift oluşum Şekil 9'da gösterilmiştir. Gelen fotonun enerjisi daha büyük olursa fazla olan enerji o zaman da pozitron ve elektrona kinetik enerji olarak yansır. Açığa çıkan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşime girerken, pozitron ise bir yörünge elektronu ile etkileşerek yok olur. Bu sürece yok olma (anihilasyon) denir. Zıt yönlü iki tane 0,511 MeV enerjili fotonun oluşumuna neden olur. (Krane, 1987; Knoll, 2002; Martin, 2006)



Şekil 9. Çift oluşum gösterimi

Çift oluşumun, fotoelektrik ve Compton olaylarından ayırt eden özelliği, fotonun ortam elektronları ile etkileşmeye girmeden karakter değiştirerek parçacık halinde yayımlanmasıdır. (Kaplan, 1969)

Soğurma Katsayıları

Lineer Azaltma Katsayısı (μ)

Lineer zayıflatma katsayısı, bir malzemenin iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakılması durumunda, birim yüzeye gelen enerjinin birim kalınlıkta azaltma miktarına denir. Lineer azaltma katsayısı kullanılan malzemenin atom numarasına ve gelen radyasyonun enerjisine bağlıdır. Bunun yanında kullanılacak zırh malzemesinin yoğunluğuna da bağlıdır. Lineer azaltma katsayısının birimi cm^{-1} olarak ifade edilir. (Arpaç, 2023)

Matematiksel olarak, Beer-Lambert yasasına göre radyasyonun zayıflaması şu şekilde tanımlanır:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (12)$$

Bu ifadeden lineer zayıflatma katsayısı elde edersek, lineer azaltma katsayısının formülü aşağıdaki gibidir.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (13)$$

Burada I , x kalınlığına sahip bir numuneden geçtikten sonraki radyasyon şiddeti,

I_0 : başlangıç şiddeti, μ : azaltma katsayısı (cm^{-1}), x : malzeme kalınlığıdır (Kavaz et.el., 2019).

Kütle Azaltma Katsayısı (μ_m)

Kütle azaltma katsayısı bir maddede birim alanda birim kütle başına düşen soğurmaya verir. Çoğunlukla foton radyasyonunun geçişinde gerçekleşen enerji kaybını tanımlamak için kullanılır. Bu katsayı lineer azaltma katsayısının (μ), maddenin yoğunluğuna (ρ) oranıdır.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{\mu}{m}}{\frac{m}{v}} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{v}t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{At}t} = \frac{\ln(I_0/I)}{\frac{m}{A}} \quad (14)$$

(μ_m) kütle zayıflatma katsayısını ifade eder ve birimi cm^2/g olarak ifade edilir.

Bir fotonun madde ile etkileşimi fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu olaylarıyla gerçekleşir. Bunlar τ , σ ve κ sembolleriyle gösterilen kısmi azaltma katsayılarına sahiptirler. Bu üç etkileşimlerden gelen azaltma katsayılarının toplamı, toplam azaltma katsayısına (μ) eşittir (Şen, 2021).

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (15)$$

Kütle azaltma katsayısı, gelen radyasyonun enerjisine, soğurucu materyalin atom numarasına ve kullanılan malzemenin fiziksel yoğunluğuna bağlıdır. Kütle azaltma katsayısının değeri atom numarası ve fiziksel yoğunlukla doğru orantılıdır ve direkt olarak soğurucu materyalin özelliklerini yansıtır. Bu yüzden kütle azaltma katsayısını kullanarak ölçüm yapmak için daha uygundur.

Atomik Tesir Kesiti

Atomik tesir kesiti, bir radyasyon parçacığının (foton veya elektron gibi) bir hedef atomla etkileşime girme olasılığının bir ölçüsüdür. Bir radyasyonun atomla etkileşme olasılığı atomik tesir kesitiyle bulunabilir. Atomik tesir kesiti gelen parçacığın enerjisine, hedef parçacığın atom numarasına ve etkileşim türüne bağlı olarak değişir. Atomik tesir kesitinin matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_a = \frac{\mu_m}{N_A} M_T \quad (16)$$

Burada:

σ_a : atomik tesir kesitini(cm^2/atom)

μ_m : kütle azaltma katsayısı

M_T : atomik kütleyi (g/cm^3)

N_A : Avogadro sayısını ($6.22 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) göstermektedir (Attix, 2004; Knoll, 2010).

Elektronik Tesir Kesiti

Elektronik tesir kesiti, gelen bir radyasyonun ya da parçacığın, serbest ya da bağlı olan bir elektronla etkileşime girme olasılığı olarak tanımlanan fiziksel büyüklüktür (Knoll,2010). Bu büyüklük elektron başına düşen etki edilen yüzey alanını belirtir; yani bir radyasyonun bir atomun tamamıyla değil, sadece bir elektronla etkileşme olasılığını dikkate alır (Attix, 2004).

Elektron başına düşen toplam foton etkileşim tesir kesiti olan toplam elektronik tesir kesiti;

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} (\mu/\rho)_i = \frac{\sigma_a}{Z_{eff}} \quad (17)$$

formülü ile gösterilir. Burada f_i , $f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n = 1$ olacak şekilde i. elementin kısmi bolluğudur. Z_i ise i. elementin atom numarasıdır.

Elektronik tesir kesiti özellikle Compton saçılması gibi olaylarda büyük önem taşır çünkü bu olayda gelen foton, bir atomun içindeki bağlı bir elektronla etkileşerek saçılır bu tür etkileşimler doğrudan elektronlarla gerçekleşir (Podgorsak, 2005).

Elektronik tesir kesiti, çeşitli radyasyon-madde etkileşimlerinde yoğunluk etkisini ortadan kaldırabilmek için normalize edilmiş bir değişken olarak kullanılır. Böylece çeşitli maddeler arasında doğrudan karşılaştırma yapılabilir (Hubbell & Seltzer, 1996).

Örneğin, çeşitli elementlerin Compton olayına karşı gösterdiği direnci karşılaştırırken, elektron başına düşen etkileşim miktarı dikkate alınır. Bu durum da özellikle doz hesaplamaları, radyasyon zırhlama tasarımı ve X-ışını spektroskopisi için önemlidir. (ICRU, 2011)

Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Bir maddenin etkin atom numarası, bir bileşik veya karışımın özellikle X ve gama ışınlarının maddeyle etkileşmesi (fotoelektrik olay, Compton saçılması vb) sonucunda malzemede bulunan farklı atom numaralarının çeşitli şekilde ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Z_{eff} , kullanılacak malzeme için gerçek bir sabit değildir. Bu etkileşim sürecine bağlı olarak fotonun enerjisi ile değişen bir durumdur. Etkin atom numarası maddenin fiziksel

özelliklerine dair temel bilgileri kavramamızı sağlayarak maddeyle radyasyonun etkileşimini gösterir (Manohara, Hanagodimath, Thind, & Gerward, 2008) (Manohara *et al.* 2008).

Belirli bir foton enerjisine maruz kalan zırhlama malzemesinin performansının değerlendirilebilmesi için bir malzemenin kütle azaltma katsayı değeri dışında etkin atom numarası değerinin de dikkate alınması gerekir. Etkin atom numarası büyük olan malzemelerin zırhlama performansı o kadar yüksek olduğu söylenebilir. Bu yüzden radyasyon zırhlamasında etkin atom numarası büyük olan malzemeler özellikle tercih edilir. Kurşun (Pb), Baryum (Ba) ve Tungsten (W) gibi elementler yüksek etkin atom numarasına sahiptirler (Singh, Badiger, & Gerward, 2015).

Etkin atom numarası, enerjiye bağlı olarak değişir. Yüksek enerjilerde Compton saçılması ve çift oluşum gerçekleşirken düşük enerjilerde fotoelektrik olay gerçekleşir. Bu nedenle Z_{eff} , enerjinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmelidir (Midgley, 2004).

Z_{eff} değeri özellikle Compton saçılması maddeyle etkileşim sürecinden etkilenir. Etkin atom numarası Denklem (19) ile ifade edilmektedir

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,e}} \quad (18)$$

$\sigma_{t,a}$: toplam atomik tesir kesiti ve $\sigma_{t,e}$: toplam elektronik tesir kesitidir (Arslan, 2023)

Etkin atom numarası, bir bileşiğin ya da karışımın radyasyonla etkileşimini ifade eden oldukça önemli bir değerdir ve enerjiye bağlı olarak değişen parametredir. Radyasyon fiziği, tıbbi görüntüleme sistemleri, zırhlama mühendisliği gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılır ve her enerji aralığındaki değerler için ayrı ayrı hesaplama yapılmalıdır.

Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff})

Birim kütle başına düşen elektron sayısına etkin elektron yoğunluğu olarak tanımlanır. Özellikle foton-madde etkileşimi sırasında örneğin Compton saçılmasında fotonun elektronla doğrudan etkileştiği olayların incelenmesinde önemli rol oynar. Etkin atom numarası ile etkin elektron yoğunluğu ile arasında doğrusal bir ilişki bulunur ve bir malzeme için elektron yoğunluğu (2.8) denklemi ile ifade edilir.

$$N_{eff} = \frac{N_A}{M_T} Z_{eff} \sum_i n_i = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (\text{elektron /g}) \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemde N_A : Avogadro sayısını, Z_{eff} : Etkin atom sayısını, σ_e : Elektronik tesir kesitini (cm^2/atom), μ_m : Kütle azaltma katsayısını ve M_T : Atomik kütleyi (g/cm^3) göstermektedir (Şen, 2021).

Ortalama Serbest Yol (Mean free path, MFP)

Ortalama serbest yol radyasyonun-madde etkileşimi sürecinde madde içinde ilerlemekte olan fotonların peş peşe gerçekleşen iki etkileşimi arasındaki mesafe olarak tanımlanır ve lineer azaltma katsayısı kullanılarak ortalama serbest yol bulunur.

Fotonlar, maddeyle etkileşime girene kadar düzensiz yollar izler. Ortalama serbest yolları, fotonun enerjisine ve ortamın atomik özelliklerine bağlıdır (NIST XCOM Database, 2023). Nötronların ortalama serbest yol değeri, genellikle atom çekirdekleri ile yaptığı elastik veya inelastik saçılmalara bağlı olarak değişir (Lamarsh & Baratta, 2018). Elektronların ise ortalama serbest yolu, yoğun madde içerisinde sürekli iyonizasyon ve saçılmalar nedeniyle çok daha kısadır (Berger *et al.* 2017; Bichsel, 2019).

Ortalama serbest yol aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (20)$$

Ortalama serbest yol malzemenin kalınlığının ne kadar olması gerektiğini belirler. Tıbbi Görüntüleme sistemlerinde özellikle X-ray veya CT de fotonların ortalama serbest yol değeri, görüntü kalitesini ve dozu etkiler. Nükleer reaktörlerde ise nötronların ortalama serbest yol değeri, reaktörün kritikliğini belirler (Seibert *et al.* 2021; IAEA,2022)

Yarı Değer Kalınlığı (Half Value Layer, HVL)

Yarı değer kalınlığı (HVL), bir radyasyon kaynağından çıkan radyasyonun (fotonlar, X ışını veya gama ışını vb.) şiddetini, geçilen ortam tarafından başlangıçtaki değerinin yarısına düşürmek için gerekli olan madde kalınlığına denir. Bu özellik, bir maddenin radyasyonun azaltma kapasitesini göstermek için kullanılır.

Foton enerjisi azaldıkça yarı değer kalınlığı (HVL) azalır ve yarı değer kalınlığı ile radyasyonu zırlama özelliği ters orantılıdır. Kullanılan malzemelerde atom numarası yüksek olan ($Z \uparrow$) malzemeler daha düşük HVL' ye sahiptir bu yüzden zırlama için uygundur. Yoğunluğu fazla olan malzemeler ışını daha çok soğurur, HVL küçülür (Podgorsak, 2010).

Yarı Değer Kalınlığı (HVL) nin lineer azaltma katsayısına bağlı ifadesi aşağıdaki gibidir (Erkoyuncu, 2023).

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

Onda Bir Kalınlık Değeri (Tenth Value Layers, TVL)

Onda bir değer kalınlığı başlangıçta gelen radyasyonun (gama veya X-ışınının) şiddetini 1/10'a kadar düşürerek radyasyonu soğurması için gerekli olan malzeme kalınlığına denir. Bu, durum radyasyonun %90'ının soğurulması demektir (IAEA, 2022).

Onda değer kalınlığı lineer azaltma katsayısına bağlı olarak hesaplanır (Erkoyuncu, 2023).

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

Onda bir değer kalınlığı (TVL), bir malzemenin radyasyona karşı azaltma kapasitesini ifade eder. Düşük değere sahip onda bir değer kalınlığı (TVL), yüksek radyasyon soğurma özelliği gösterir. Yüksek değere sahip ise TVL, daha fazla radyasyonun geçirgenliğini artırır ve malzemenin zırlama özelliğini azaltır. Gelen fotonun enerjisi arttıkça TVL artar ve daha derine nüfuz ederek daha fazla radyasyonu geçirir. Bu yüzden radyasyon zırlanmasında TVL değeri daha düşük atom numarası daha büyük olan malzeme kullanılması gerekir. Ayrıca kullanılan malzemenin yoğunluğu da fazla olması TVL değerini düşürür.

TVL onda bir değer kalınlığının değeri özellikle radyasyon zırlamasında radyasyondan ne kadar korunacağını belirlemede önemli bir rol oynar. Tıbbi görüntüleme de X-ray odaları, gama kamera sistemleri için kurşun kalınlığı hesaplamalarında TVL yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride radyasyon kaynağının bulunduğu ortamdaki çalışanlar için gereken korumayı sağlamak için kullanılır (Podgorsak, 2010).

Radyasyon Doz Kavramları ve Ölçüm Birimleri

Radyasyonun biyolojik ve fiziksel etkilerinin anlaşılabilmesi için, maruz kalınan radyasyon miktarının nicel olarak ifade edilmesi ve ölçülmesi gereklidir. Bu amaçla geliştirilen doz kavramları, radyasyonun türü, enerjisi, dokularla etkileşimi ve ölçüm teknikleri dikkate alınarak tanımlanır. Doz ölçümleri, hem radyasyon güvenliği açısından maruziyetin sınırlandırılması hem de medikal uygulamalarda tanı ve tedavi etkinliğinin optimize edilmesi için temel öneme sahiptir. Radyasyon ölçüm birimleri Tablo 5'te yer almaktadır.

Temel Doz Kavramları

İşinlanma (Exposure): X ve Gama fotonlarının havada oluşturduğu iyonizasyonun ölçüsüdür. SI birimi Coulomb/kg (C/kg), geleneksel birim Röntgen (R)'dir. Genellikle iyon odaları ile ölçülür ve yalnızca foton radyasyonu için tanımlıdır.

Soğurulan Doz (Absorbed Dose, D): Radyasyon enerjisinin birim kütlede bıraktığı enerji miktarıdır.

$$D = \frac{d_E}{d_m} \quad (23)$$

burada d_E soğurulan enerjiyi; d_m ise kütleyi ifade eder. SI birimi Gray (Gy) olup, 1 Gy = 1 Joule/kg'dır. Geleneksel birim rad (1 Gy = 100 rad) olarak kullanılır.

Eşdeğer Doz (Equivalent Dose, HT): Soğurulan dozun, radyasyon türüne göre biyolojik etkinlik farklarını dikkate alarak hesaplanan dozudur ve sievert (Sv) cinsinden ifade edilir.

$$H_T = D_T \times W_T \quad (24)$$

burada D_T doku veya organ tarafından soğurulan dozu, W_T ise radyasyon ağırlık faktörünü temsil eder. X ışınları ve γ ışınları için W_T değeri 1'dir (Sweni *et al.* 2015).

Etkin Doz (Effective Dose, E): Vücudun farklı organ ve dokularının farklı radyasyon duyarlılıklarını hesaba katan toplam risk ölçüsüdür ve birimi Sievert (Sv) olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E = \sum_T H_T W_T \quad (25)$$

Kerma (Kinetic Energy Released per unit Mass): Tanım: Birim kütlede yüklü parçacıklara aktarılan toplam kinetik enerjidir. Özellikle dozimetri hesaplamalarında kullanılır. Birimi Gray (Gy).

Tablo 5. Radyasyon Ölçüm Birimleri

Kavram	SI Birimi	Sembol	Geleneksel Birim	Dönüşüm
Işınlama	C/kg	-	Röntgen (R)	1 R = 2.58×10^{-4} C/kg
Soğurulan doz	Gray	Gy	rad	1 Gy = 100 rad
Eşdeğer/Etkin doz	Sievert	Sv	rem	1 Sv = 100 rem
Kerma	Gray	Gy	-	-

Bu kavramlar, reaktör tasarımı, radyasyon koruma sistemleri ve insan güvenliği açısından mühendislik hesaplamalarında kritik rol oynar.

Zırhlama Malzemeleri

Radyasyon; nükleer santraller, tıbbi görüntüleme merkezleri, endüstriyel tesisler ve araştırma laboratuvarları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ortamlarda, canlıların güvenliğini sağlamak amacıyla yüksek etkinliğe sahip radyasyon zırhlama malzemelerinin kullanılması zorunludur. Son yıllarda, bu gereksinimi karşılamak üzere esnek,

taşınabilir, düşük maliyetli ve radyasyona karşı yüksek koruma kapasitesine sahip alternatif malzeme arayışları hız kazanmıştır. Bu kapsamda geliştirilen bazı malzeme türleri aşağıda sunulmuştur.

Kurşun ve diğer yoğun malzemeler

Kurşun (Pb): Kurşun, periyodik tabloda atom numarası 82 olan ağır bir metal olup yüksek atom numarası ($Z = 82$) ve yoğunluğu ($11,34 \text{ g/cm}^3$) sayesinde X-ışınları ve gama ışınları gibi yüksek enerjili elektromanyetik radyasyonlara karşı etkili bir zırhlama malzemesidir. Yüksek atom numarası, özellikle fotoelektrik olay ve Compton saçılması gibi etkileşim mekanizmalarında soğurma olasılığını artırarak radyasyonun malzeme içinde daha etkin bir şekilde tutulmasını sağlar. Düşük enerjili fotonlarda fotoelektrik soğurma mekanizmasıyla yüksek koruma sağlarken, yüksek yoğunluğu da radyasyonun penetrasyonunu önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, kurşun iyi işlenebilir olması sayesinde levha veya blok formunda kolayca şekillendirilebilir ve kimyasal çevresel koşullara karşı yüksek direnç gösterir. Bu özellikler, kurşunu hem medikal hem de endüstriyel alanlarda yaygın olarak tercih edilen bir radyasyon zırhlama malzemesi haline getirmektedir (ICNIRP, 2010; Turner, 2007; Attix, 2004).

Kurşun, beta parçacıklarını da soğurabilir; fakat dikkat edilmesi gereken nokta ikincil X-ışını (bremsstrahlung) üretimidir. Bu sebeple beta radyasyona karşı çoğunlukla kurşunun önüne düşük atom numarasına sahip bir malzeme (plastik) yerleştirilir (Martin & Harbison, 2013).

Nötronlar yüksüz parçacıklar olduklarından elektron kabukları ile doğrudan etkileşime girmezler. Bu nedenle kurşun, nötronlara karşı etkili bir yavaşlatıcı (moderator) değildir. Nötronların etkin bir şekilde yavaşlatılması için genellikle hidrojen içeren maddeler (ör. su, parafin, polietilen) kullanılır. Nötronlar bu tür ortamlarda yavaşlatıldığında ikincil gama ışınları oluşur. Kurşun, bu ikincil gama ışınlarını yüksek atom numarası ve yoğunluğu sayesinde etkili biçimde soğurabilir. Ayrıca, nötron ile etkileşim sonucu gama ışını üretme kapasitesi düşük olduğundan, ikincil radyasyon oluşma riski de görece azdır. Bu özellik, kurşunun nötron zırhlarının dış katmanında ikincil fotonları zayıflatıcı bir tabaka olarak kullanılmasını avantajlı kılar (Martin & Harbison, 2013; Knoll, 2010).

Kurşun, gama ve X-ışınlarına karşı üstün koruma sağlaması sayesinde pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıbbi görüntüleme merkezlerinde X-ray ve bilgisayarlı tomografi (BT) odalarının duvar kaplamaları ve kurşun önlükler, nükleer santrallerde reaktör çevresel zırhlamaları, nötron moderatörleri sonrası gama absorpsiyonu, reaktör kaplamaları ve

koruyucular, endüstriyel radyografide kurşun kaplı konteynerler, taşınabilir radyasyon kalkanları ve mobil kurşun paneller bu kullanım alanlarına örnektir. Ayrıca, uzay ve havacılık sektöründe elektromanyetik radyasyona karşı hassas elektronik donanımların korunmasında da kurşunun şekillendirilebilirliği ve yüksek koruma kapasitesi önemli avantajlar sağlar (NCRP, 2004). Bununla birlikte, kurşun elementi toksik özelliklere sahip olduğundan insan sağlığı açısından dikkatle kullanılmalıdır. Biyolojik sistemlerde birikme eğilimi gösterir ve özellikle sinir sistemi, böbrek fonksiyonları, hematopoetik sistem ve gelişimsel süreçler üzerinde kalıcı hasarlara yol açabilir. Kurşun tozu veya bileşiklerine maruziyet, halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit unsuru olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle kapalı ortamlardaki kullanımda özel önlemler alınması gereklidir. Son yıllarda, kurşunun toksik etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla polimer kompozitler, tungsten, baryum sülfat gibi alternatif malzemeler üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır (Tariq *et al.* 2023).

Beton: Beton, çimento, agrega (kum, çakıl, kırmataş vb.) ve suyun karışımından elde edilen, sertleştiğinde yüksek mekanik dayanım sağlayan kompozit bir malzemedir. Yerel kaynaklardan kolaylıkla üretilebilmesi, düşük maliyeti, geniş yüzey alanlarında uygulanabilirliği, işlenebilirliği, mekanik dayanımı ve radyasyon soğurma özellikleri nedeniyle radyasyon zırhlamasında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. İçeriğinde bulunan yüksek yoğunluklu agregalar ve mineral bileşenler, iyonlaştırıcı radyasyona (gama ışınları ve nötronlar) karşı etkin koruma sağlar. Betonun yoğunluğu arttıkça ($2,3-3,5 \text{ g/cm}^3$), radyasyonun azaltma (attenuation) kapasitesi de artar. Kalın yapısal uygulamalara elverişli olması, yüksek enerjili fotonların etkin şekilde zayıflatılmasını mümkün kılar (Akkurt *et al.* 2010).

Özellikle nükleer santraller ve tıbbi radyoterapi merkezlerinde, kurşun gibi maliyeti yüksek malzemelere alternatif olarak tercih edilmektedir. Betonun şekil alabilme kabiliyeti, yangına dayanıklılığı ve inşaat kolaylığı da kullanımını destekleyen avantajlardır (Aydın *et al.* 2015). Nükleer santrallerde kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon türleri (α , β , γ , X-ışınları ve nötron parçacıkları) canlılar üzerinde ciddi biyolojik hasarlar oluşturabileceğinden, beton bu alanlarda önemli bir zırh malzemesi olarak görev yapar (Özturan, 2013).

Betonun zırhlama mekanizması, radyasyon türüne bağlı olarak değişir. X ve γ ışınları için, yüksek atom numarasına (Z) sahip mineraller ve agregalar; fotoelektrik etkileşim, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi süreçler yoluyla enerjiyi soğurur. Nötron radyasyonu için ise betonun içerdiği hidrojen ve hafif elementler nötronların yavaşlatılmasında etkilidir. Ayrıca, özel nötron zırh betonlarında bor, baryum, barit gibi katkıları kullanılarak nötron soğurma kapasitesi artırılır (Kaewkhao & Limsuwan, 2012).

Ağır Beton (Heavyweight Concrete): Ağır beton, barit (BaSO_4), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), limonit, ilmenit, serpantin gibi yüksek yoğunluklu agregalarla üretilir. Bu tür betonlar, standart betona kıyasla daha yüksek lineer zayıflatma katsayısına ve daha düşük yarı değer kalınlığına (HVL) sahiptir. Bor katkılı ağır betonlar ise nötron radyasyonuna karşı daha etkin koruma sağlar (IAEA Safety Reports Series No. 33, 2003).

Betonun başlıca kullanım alanları; nükleer reaktörlerde reaktör kabuğu ve biyolojik kalkan yapıları, radyoaktif atık depolama tesisleri, radyoterapi ve lineer hızlandırıcı (LINAC) odalarının duvarları, endüstriyel radyografi tesisleri ve tıbbi görüntüleme (X-ray, BT) odalarının çevresel zırhlarıdır.

Betonun avantajları arasında; geniş alanlara kolay uygulanabilmesi, düşük maliyetli olması, farklı radyasyon türlerine karşı eşzamanlı koruma sağlayabilmesi, uzun ömürlü olması ve bakım gereksinimlerinin düşük olması sayılabilir. Bununla birlikte, bazı dezavantajları da vardır: yüksek koruma sağlamak için kalın kesitler gerektirmesi nedeniyle alan kaybına yol açması, uzun süreli radyasyon maruziyetinde mikro çatlaklar oluşması, nemli ortamlarda yapısal bozulma riski ve ağır beton kullanımında yapıların taşıyıcı sistemlerinde ek yük gereksinimi doğması.

Her ne kadar beton yaygın bir zırhlama malzemesi olsa da, gelişen teknoloji ile birlikte daha hafif, yüksek performanslı ve uzun ömürlü alternatif malzemeler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda polimer kompozitler, bor katkılı seramikler ve gelişmiş hibrit zırh sistemleri gelecekte potansiyel alternatifler olarak değerlendirilmektedir (Shahidan *et al.* 2017).

Hafif Malzemeler

Polietilen (PE): Polietilen, radyasyon zırhlamada kullanılan kurşun gibi ağır metallerin taşınabilirlik, maliyet, toksisite ve ikincil radyasyon üretimi gibi dezavantajları nedeniyle öne çıkan hafif alternatif malzemelerden biridir. Yüksek hidrojen içeriği, düşük yoğunluğu ve kolay işlenebilirliği sayesinde özellikle nötron radyasyonunun zayıflatılmasında oldukça etkilidir (Shultis & Faw, 2000). Hidrojen atomunun kütlesi, nötronla neredeyse eşdeğer olduğu için elastik saçılma yoluyla nötron enerjisini hızlı bir şekilde düşürür ve onları termal enerji seviyelerine kadar yavaşlatır (El-Jaby *et al.* 2021).

Bor katkılı polietilen (%5–10 borat içeren) kullanıldığında, nötronlar önce yavaşlatılır, ardından ^{10}B çekirdeği tarafından soğurularak yok edilir (Akbay & Evcin, 2022). Bu özellik, polietileni özellikle hızlı nötron akılarının bulunduğu ortamlarda etkili bir çözüm haline getirir (Singh & Badiger, 2015).

Polietilenin başlıca avantajları arasında hafif olması, taşınabilirlik sağlaması, düşük maliyeti, kolay şekillendirilebilmesi ve çevreye zarar vermeyen toksik olmayan yapısı yer almaktadır. Ayrıca, üretimi ve işlenmesi ekonomik olup geri dönüştürülebilir olması sürdürülebilirlik açısından önemlidir (Emco Plastics, 2023). Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), termoplastik yapısı sayesinde kolayca kesilebilir, şekillendirilebilir ve bor, Gd_2O_3 , B_4C gibi dolgu malzemeleriyle takviye edilerek mekanik dayanımı artırılabilir (DiJulio *et al.* 2017). Bununla birlikte, polietilenin bazı dezavantajları da vardır. Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini kaybetme eğilimi gösterir, yüksek enerjili gama ışınlarının zayıflatılmasında kurşun veya baryum sülfat kadar etkili değildir ve yoğun nötron akıplarında malzeme içinde radyoaktif izotop oluşumu riski taşır (Chadwick *et al.* 2011). Düşük yoğunluğu (More *et al.* 2021), onu özellikle uzay ve havacılık gibi hafif malzeme gerektiren alanlarda avantajlı kılar (Vira *et al.* 2022). Ayrıca çevresel koşullara karşı kimyasal yapısını büyük ölçüde koruyarak uzun süreli kullanımlarda performansını sürdürebilir.

Başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Nükleer tesisler: Bor katkılı HDPE paneller, nötron kaynaklı odalar, reaktör koruyucu muhafaza sistemleri (DiJulio *et al.* 2017).
- Tıp: Proton terapisi ve radyoterapi merkezlerinde nötron zırhlaması.
- Uzay uygulamaları: NASA projelerinde uzay giysileri ve ekipman koruması.
- Araştırma laboratuvarları: Düşük arka planlı deney odalarında radyasyon yalıtımı.

Su: Nükleer santrallerde bulunan reaktörlerde hem soğutucu hem de nötron/gama zırh malzemesi olarak iki yönlü işlev görür bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadır. İçeriğinde bulunan yüksek miktardaki hidrojen sayesinde nötronları daha etkili biçimde yavaşlatıp, kalın tabakalar halinde kullanıldığında radyasyon zayıflatma kapasitesi oldukça yüksektir. Örneğin, tıbbi hızlandırıcı odalarında meydana gelebilecek radyasyon kaçacağını önlemek amacıyla su tankları kullanılır (IAEA, 2022). Su, aynı zamanda kolay temin edilebilir, işlenmesi ve düşük maliyetli bir malzeme olması nedeniyle büyük bir avantaj sağlar (NCRP Report No. 151, 2005).

Suyun kullanılmasının dezavantajları ise; Su, yapısal olarak stabil bir malzeme değildir ve sızıntı riski taşır. Sıcaklık değişimlerine karşı (Donma veya buharlaşma) duyarlıdır. Ayrıca kimyasal olarak nükleer reaktör ortamında radyoliz ve korozyon sorunları yaratabilir.

Polimer Malzemeler: Polimer malzemeler, birçok endüstriyel ve bilimsel alanda yaygın olarak kullanılan, uzun zincirli makromoleküllerden oluşan bileşik yapıdır. Polimerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri büyük ölçüde sentez yöntemlerine, kullanılan başlangıç maddelerine ve işlenme süreçlerine bağlıdır. Bu nedenle polimer sentezi, sadece akademik değil aynı zamanda endüstriyel açıdan da oldukça kritik bir alandır. Günümüzde

gelişmiş mühendislik uygulamalarında, biyomalzemelerde, enerji sistemlerinde, radyasyon zırhlama teknolojilerinde, elektronik, uzay, otomotiv ve medikal gibi birçok sektörde kullanılmakta olup; hafiflik, işlenebilirlik ve özelleştirilebilirlik gibi avantajları sebebiyle geleneksel olarak kullanılan metalik malzemelere önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Oğian, 2004; Young & Lovell, 2011).

Polimerler, çok sayıda kendini tekrar eden monomer birimlerin kimyasal bağlarla birleşerek oluşturduğu uzun zincirli makromoleküllerden oluşan yapılardır. Bu zincir yapıları laboratuvar ortamlarında veya doğada sentezlenebilmektedir. Doğada bulunan polimerlere selüloz, nişasta, kauçuk ve proteinler örnek verilebilir. Laboratuvar ortamında oluşturulan sentetik polimerlere ise polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polietilen tereftalat (PET), polietere eter keton (PEEK) ve polimetil metakrilat (PMMA) örnek verilebilir. (Billmeyer, 1984).

Polimerler termal özelliklerine göre de ikiye ayrılırlar:

Termoplastik Polimerler: Isıtıldığı zaman yumuşayabilen ve soğutulduğu zaman tekrar sertleşebilen ve tekrar işlenebilen durumda olan yapılardır. Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polikarbonat (PC), Polietilen tereftalat örnek olarak verilebilir.

Termoset Polimerler: Isıtıldıkları zaman kalıcı olarak sertleşerek eski haline geri dönüştürülemeyen yapıdadır. Epoksi, fenolik reçineler, polyesterler bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu gruptandırımlar malzemenin radyasyonun bulunduğı ortama dayanıklılığı, şekillendirilebilirliği ve uygulama alanları açısından belirleyici bir özelliktir (Cherkashina & Pavlenko, 2019).

Polimerler, diğere malzemelere kıyasla birçok avantaja sahiptir. Düşük yoğunlukları sayesinde hafif olmaları, taşıma ve enerji maliyetlerini azaltır. İyi elektriksel yalıtkanlık özellikleri, onları elektronik ve kablolama endüstrisinde tercih edilen malzemeler haline getirir. Yüksek şekillendirilebilirlikleri, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve 3D baskı gibi üretim tekniklerine uygun olmalarını sağlar. Ayrıca asit, baz ve çeşitli çözücülere karşı kimyasal direnç gösterebilir; optik özellikleri (saydamlık, renklenme, ışık geçirgenliği) üretim sürecinde ayarlanabilir. Düşük ısı iletkenlikleri, ısı yalıtım uygulamalarında avantaj sağlar. Geri dönüştürülebilir olmaları ise sürdürülebilir üretim açısından önemli bir artıdır (Sperling, 2005).

Bununla birlikte, polimerlerin radyasyona ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı genellikle sınırlıdır. Bu nedenle bu tür koşullarda polimer kompozitler veya yüksek performanslı mühendislik polimerleri tercih edilir.

Polimer malzemeler; düşük maliyet, yüksek üretim kapasitesi, çevresel sürdürülebilirlik ve biyouyumluluk gibi özellikleri sayesinde hem temel bilimlerde hem de uygulamalı mühendislikte büyük önem taşır. Özellikle nanoteknoloji ve fonksiyonel kompozitler alanındaki gelişmeler, polimerlerin daha karmaşık görevlerde kullanılmasına imkân tanımaktadır (More & Badawi, 2021).

Radyasyon zırhlama, iyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığı, çevre ve ekipmanlar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla uygulanan temel bir koruma yöntemidir. Geleneksel olarak kurşun gibi ağır metaller kullanılsa da, toksisite, yüksek yoğunluk, düşük işlenebilirlik ve yüksek maliyet gibi dezavantajlar, alternatif malzeme arayışlarını hızlandırmıştır. Bu bağlamda, polimer bazlı malzemeler özellikle nanoteknolojik katkılar ile geliştirildiğinde, hafiflik, işlenebilirlik ve çevre dostu yapılarıyla dikkat çeken etkili seçenekler arasında yer almaktadır (Toto *et al.* 2024; Yılmaz, 2024).

Polimer tabanlı kompozitlerde zırhlama performansı, kullanılan dolgu maddesinin türü, oranı, boyutu, polimer matrisin özellikleri ve üretim tekniği gibi birçok parametreye bağlıdır. Yüksek atom numarasına sahip elementler (örneğin bizmut, kurşun) foton radyasyonunun zayıflatılmasında etkinlik sağlarken, düşük atom numaralı elementler (örneğin bor, lityum) özellikle nötron radyasyonunun soğurulmasında önemli rol oynar. Dolgu oranının artırılması, lineer zayıflatma katsayısının (μ) yükselmesine ve böylece zırhlama kapasitesinin artmasına katkıda bulunur; ancak bu durum, malzemenin işlenebilirliğini olumsuz etkileyebilir. Dolgu malzemesinin tanecik boyutu da kritik bir faktördür; nano boyutlu dolgular, matris içinde daha homojen dağılım ve yüksek yüzey etkileşimi sağlayarak performansı iyileştirir. Polimer matrisin türü ise mekanik dayanım, termal kararlılık, UV ışınımına karşı direnç ve radyasyon dayanımı açısından belirleyici olup, uygulama koşullarına göre uygun matris seçimi yapılmalıdır. Ayrıca, üretim teknikleri (enjeksiyon kalıplama, sıkıştırma kalıplama, 3D baskı gibi) kompozitin mikro yapısını ve dolayısıyla zırhlama performansını doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır (Toto *et al.* 2024; Cherkashina & Pavlenko, 2019; Yılmaz, 2024; Wu *et al.* 2024; Li *et al.* 2024).

Seramik Malzemeler

Seramikler, genellikle metalik ve ametalik elementlerin yüksek sıcaklıklarda oluşturduğu inorganik bileşiklerden meydana gelir ve yüksek iyonik ile kovalent bağ oranları sayesinde sertlik, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi üstün özellikler sergiler (Ouda, 2020). İçerdikleri elementlerin atom numarası (Z) ve yoğunluğu, seramiklerin radyasyon zırhlama kabiliyetini doğrudan etkiler. Bor karbür (B_4C) ve bor nitrür (BN) gibi bor içeren seramikler, yüksek nötron yakalama tesir kesitleri sayesinde nötron radyasyonu zırhlamasında tercih

edilirken; zirkonya (ZrO_2), titanya (TiO_2), baryum sülfat ($BaSO_4$) ve tungsten oksit (WO_3) katkılı seramikler gama ve X-ışınlarının zayıflatılmasında etkilidir (Zhang *et al.* 2022; Dlamini *et al.* 2018). Seramikler, yüksek sıcaklıklarda bile yapısal bütünlüklerini koruyarak nükleer reaktörlerin iç kaplamaları, uzay teknolojileri ve diğer zorlu çalışma koşullarında uzun süreli kullanım imkânı sunar. Ayrıca elektriksel yalıtıcılık özellikleri sayesinde radyasyon altında elektriksel yük birikiminden kaynaklı arızaları önleme potansiyeline sahiptirler (IAEA, 2022). Bununla birlikte, kırılğan yapıları ve üretim maliyetlerinin yüksekliği seramiklerin başlıca dezavantajları arasındadır (Dlamini *et al.* 2018). Günümüzde seramik malzemeler; nükleer santrallerin içyapıları ve yakıt çubukları kaplamaları, medikal görüntüleme cihazlarında radyasyon sızdırmazlığı sağlayan paneller, uzay araçları ve uyduların radyasyon koruması ile askeri savunma sistemlerindeki zırh ve koruma panellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler ise farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle üretilen, hafiflik, yüksek mekanik dayanım ve tasarlanabilir zırhlama kapasitesi sunan gelişmiş malzemelerdir. Radyasyon zırhlama amacıyla kullanılan kompozitlerde matris (polimer, metal veya seramik) genellikle yapısal bütünlük ve şekillendirme kolaylığı sağlarken, takviye fazı (fiber, partikül veya tabaka formunda) radyasyonun soğurulmasında ana etken rolünü üstlenir (Kargar *et al.* 2021). Yüksek atom numaralı katkılar (örneğin bizmut oksit, tungsten, baryum sülfat) foton radyasyonunun zayıflatılmasında; hidrojen veya bor içeren bileşenler ise nötron radyasyonunun yavaşlatılması ve soğurulmasında etkilidir (Fadhel *et al.* 2020; Al-Bahrani *et al.* 2022). Dolgu türü ve miktarı, tanecik boyutu, polimer matrisin özellikleri ve üretim yöntemi (enjeksiyon kalıplama, sıkıştırma kalıplama, 3D baskı vb.) kompozitin nihai zırhlama performansını belirleyen temel faktörlerdir. Kompozitler, çok katmanlı yapı tasarımları sayesinde hem gama/X-ışınları hem de nötron radyasyonuna karşı eşzamanlı koruma sağlayabilir. Bu nedenle medikal görüntüleme merkezlerinde kurşunsuz koruyucu paneller, nükleer tesislerde taşınabilir kalkanlar, uzay araçlarında hafif radyasyon bariyerleri ve askeri uygulamalarda balistik-radyasyon hibrit zırh sistemleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Singh *et al.* 2015).

Epoksi Esaslı Kompozitler

Epoksi reçineler, çapraz bağlı termoset yapıları sayesinde yüksek mekanik dayanım ve termal kararlılık sergileyen polimer matrislerdir. Kimyasal etkilere karşı dirençli olmalarının yanı sıra üretim sırasında yüksek atom numaralı katkılar (örneğin bizmut oksit, baryum sülfat, kurşun oksit veya tungsten) ile kolayca birleştirilebilmeleri, epoksi matrislerin radyasyon

zırhlama amaçlı kompozit üretiminde tercih edilmesinin temel nedenidir (Singh *et al.* 2016). Epoksi esaslı kompozitlerde foton radyasyonu, malzeme ile fotoelektrik etki ve Compton saçılması mekanizmaları üzerinden etkileşir; matris içine eklenen yüksek atom numaralı dolgular, foton soğurma olasılığını artırarak lineer azaltma katsayısını yükseltir ve yarı değer kalınlığını (HVL) azaltır (Al-Hadeethi *et al.* 2020). Ayrıca, epoksi matrisli bor katkılı kompozitler termal nötronları yüksek verimle soğurarak nötron radyasyonuna karşı etkin koruma sağlayabilmektedir (Yakubu *et al.* 2021). Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde epoksi esaslı zırhlama malzemeleri taşınabilirlik açısından avantajlıdır ve tıbbi görüntüleme tesislerinde X-ışını ve gama radyasyonu panellerinde, reaktörlerde koruyucu kaplamalarda, kişisel koruyucu zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tekin *et al.* 2018).

Nanomalzemeler ve yeni gelişmeler

Nanoteknoloji, radyasyon zırhlama alanına düşük yoğunluk, yüksek dayanım, geniş yüzey alanı ve optimize edilebilir özellikler sunarak yenilikçi çözümler kazandırmıştır. Grafen, karbon nanotüpler (CNT) ve nano seramikler bu alanda öne çıkmaktadır (Zhang W. *et al.* 2025). Radyasyonla etkileşmesi sonucunda gösterdikleri yüksek soğurma kapasiteleri ve mekanik dayanımları sayesinde nükleer enerji, savunma ve tıp gibi birçok alanda kullanım alanı sunmaktadır.

- **Grafen**, tek katmanlı sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir yapı olup yüksek mekanik dayanım (≈ 130 GPa), mükemmel ısı ve elektrik iletkenliği ve esnekliği ile dikkat çeker (Novoselov *et al.* 2012). Düşük atom numarasına rağmen yüksek elektron yoğunluğu sayesinde proton ve alfa parçacıklarıyla etkili etkileşim kurar; çok katmanlı yapılar X-ışını ve gama radyasyonu zayıflatmada etkilidir (Sobczak *et al.* 2024). Hafifliği, grafen tabanlı kompozitleri kozmik radyasyon zırhlamasında uzay araçları, tıbbi cihazlar ve nükleer tesisler için cazip hale getirir (Türktaş *et al.* 2022).
- **Karbon Nanotüpler (CNT)**, tek (SWCNT) veya çok duvarlı (MWCNT) grafen silindirlere sahiptir. Düşük yoğunluk, yüksek elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım sunarak elektromanyetik girişim (EMI) zırhlaması ve iyonlaştırıcı radyasyondan korunmada kullanılmaktadır (Uyar *et al.* 2025). Yüksek yüzey alanı, radyasyon etkileşim kapasitesini artırır; ancak yüksek üretim maliyeti, homojen dağılım zorlukları ve potansiyel toksisite, yaygın kullanımın önünde engeldir (Zhan *et al.* 2020).
- **Nano Seramikler**, mikron altı boyutlarda oksit (Al_2O_3 , ZrO_2), karbür (SiC) veya nitrür (BN) yapılar olup yüksek sertlik, kimyasal kararlılık ve sıcaklık

dayanımı ile bilinir (Agarwal *et al.* 2024). Nano boyut, yüzey alanını artırarak radyasyon soğurma olasılığını yükseltir; tungsten, bizmut veya demir oksit katkıları ile gama ve nötron zırhlama performansı artırılabilir. Nano seramikler, hafif ve yüksek performans kombinasyonları sayesinde modern kompozit zırh sistemlerinde, nükleer reaktör kaplamalarında ve tıbbi görüntüleme cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, gelişmiş radyasyon zırhlama malzemeleri, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarak daha hafif, yüksek verimli ve çok işlevli koruma çözümleri sunmaktadır. Seramikler, kompozitler, epoksi matrisli sistemler ve nanomalzemeler, tek başına veya hibrit yapıların bileşeni olarak, önümüzdeki yıllarda radyasyon güvenliğinde stratejik bir rol üstlenmeye devam edecektir.



MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Epoksi Reçine

Termoset polimer özellik gösteren epoksi reçineler, yüksek mekanik dayanımı, kimyasal direnç (asit, baz ve tuz), termal ve boyutsal kararlılık gibi üst düzey özellikleri ile bilinen polimer grubuna dahildir. Yüksek yapışma kabiliyeti ve kürleşme sırasında düşük büzülme oranı sayesinde, cam, karbon elyaf ve aramid lifleri gibi takviye malzemelerle daha güçlü bağ oluşturur (Akçin Ergün, 2019). Bu olay yük transfer verimliliğini artmasına neden olarak kompozitlerin yüksek çekme, eğilme ve darbe dayanımlarına karşı daha optimize haline getirir (Alam *et al.* 2024).

Polimer bazlı olması nedeniyle düşük yoğunluğu (yaklaşık $1.1-1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) ve düşük atom numarasına sahiptir; buda kendi başına foton ve gama radyasyonunu zayıflatma kapasitesinin sınırlı olduğu anlamına gelmektedir (Sasidharan *et al.* 2023). Bu durum, epoksi matrisler yüksek-Z dolgu maddeleri ile (örneğin; Bi_2O_3 , WO_3 , Sb_2O_3 , BaSO_4) katkıldığında, lineer azaltma katsayısı (μ) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) belirgin ölçüde artmakta, böylece X-ışını, gama ve nötron radyasyonuna karşı koruma performansını önemli ölçüde iyileşmektedir (Mahmoud *et al.* 2021; Abdelhameed *et al.* 2024).

Yapılan çalışmalardaki bazı deneysel sonuçlar, %30–50 ağırlık oranında yüksek-Z katkı içeren epoksi kompozitlerde, yarı kalınlık (HVL) değerlerinin saf epoksiye kıyasla %40–60 oranında azaldığını göstermektedir (Abdelhameed *et al.* 2024). Ayrıca, epoksi kompozitler yüksek mekanik stabilite ve kimyasal kararlılıkları sayesinde, radyasyon zırhlama performansını uzun süre koruyabilmektedir (Guna *et al.* 2022). Bu özellikleri nedeniyle hem geleneksel hem de yüksek mühendislik uygulamalarında daha çok tercih edilen epoksi kompozitler radyasyon zırhlama sistemleri; uzay ve havacılık uygulamalarında, otomotiv ve inşaat sektörlerinde, nükleer santrallerde, radyoterapi odalarında, tıbbi görüntüleme tesislerinde ve taşınabilir koruyucu ekipmanlarda kurşun içermeyen, daha hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı alternatif çözümler sunmaktadır (Singh *et al.* 2020; Sasidharan *et al.* 2023).

Antimon Trioksit (Sb_2O_3)

Antimon trioksit (Sb_2O_3), inorganik bir bileşiktir. İnce, beyaz renkte amorf veya kristalin toz görünümüne sahiptir. Yaklaşık olarak $5.2 - 5.7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ve yüksek atom

numarası ($Z=51$) sayesinde polimer matrislerde foton soğurma kapasitesini belirli bir şekilde artıran oldukça etkili bir katkı maddesidir. Epoksi, doğal kauçuk ve polietilen gibi polimer matrisler ile beraber kullanıldığı zaman kompozit malzemenin yoğunluğu ve etkin atom numarası (Z_{eff}) artırarak, tanınal X-ışını, nükleer tıp gama ışını ve endüstriyel gama kaynaklarına karşı zırhlama performansını belirgin biçimde güçlendirir (Abdelhameed *et al.* 2024; Guna *et al.* 2022). Önceki çalışmaların ortaya çıkardığı verilere göre, Sb_2O_3 ilavesi lineer azaltma katsayısını (μ) artırmakta, bu duruma bağlı olarak yarı kalınlık (HVL) ve onda bir kalınlık (TVL) değerlerini düşürmektedir. Bu sayede, eşdeğer koruma düzeyi 2 daha hafif ve ince zırhlama malzemesi elde etmeye olanak sağlamaktadır (Mahmoud *et al.* 2021).

Kurşun bazlı malzemelere göre daha düşük toksit etkisine sahip olan Sb_2O_3 (ATSDR, 2019), ayrıca kolay işlenebilirliği ve polimer matrisler ile uyumu sayesinde, özellikle sağlık sektöründe (röntgen ve radyoterapi odaları, taşınabilir zırh sistemleri) ve giyilebilir radyasyon koruma ekipmanlarının tasarımında oldukça tercih edilen bir dolgu maddesi haline gelmiştir (Sasidharan *et al.* 2023). Nötron radyasyonuna karşı Sb_2O_3 , hidrojen içermediği için doğrudan moderasyon etkisi göstermez; ancak hidrojen bakımından zengin olan matrisler ile birlikte kullanıldığında, hızlı nötronların yavaşlatılması hidrojen atomları tarafından sağlanırken, Sb çekirdekleri (nötron, gama) reaksiyonları sayesinde ikincil gama ışınlarını soğurarak karma radyasyon alanlarında ek koruma sağlar (El-Khatib *et al.* 2022).

Yapılan deneysel çalışmada, %30–50 ağırlık oranında Antimon Trioksit (Sb_2O_3) içeren epoksi kompozitlerde, 0.06–1.33 MeV gama enerjilerinde yarı kalınlık (HVL) değerlerinin saf epoksiye göre %35–55 oranında azaldığını ortaya koymaktadır (Abdelhameed *et al.* 2024). Benzer şekilde, doğal kauçuk matrislerde %40 Sb_2O_3 ilavesi, 662 keV gama ışınları için azaltma katsayısını yaklaşık iki katına çıkarırken, malzemenin mekanik esnekliğinin korumasını sağlamaktadır (Guna *et al.* 2022). Sonuç olarak, Sb_2O_3 katkılı polimer kompozitlerin hem taşınabilir hem de yüksek performanslı zırh sistemleri için kurşunsuz, çevre dostu ve etkin bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Karbon Elyaf (CF)

Karbon elyaf (CF), içerisinde yüksek miktarda karbon bulunan ince ve lif yapısına sahip bir malzemedir. Düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet (çekme) ve dayanıklılık özellikleri ile bilinen kompozit malzemedir (Baker, Dutton, & Kelly, 2016). Karbon elyaflar, oksijensiz ortamda 1000 °C'ye kadar kararlı halde kalabilir, bu da yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olduğunu gösterir (Baker *et al.* 2016). Kimyasal olarak kararlıdır; özellikle asitler, bazlar gibi çoğu organik çözücüye karşı daha dayanıklıdır (Kumar *et al.* 2018). İyi bir elektriksel ve termal iletkenliğine sahiptir. (Wang & Li, 2020; Singh ve ark., 2019). Genellikle polimer matrislerle

güçlendirilen karbon elyaf ilaveli polimerler (CFRP) oluşturulmakta ve havacılık, otomotiv, inşaat ile uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ebrahimi & Karami, 2023). CF'nin üstün mekanik özellikleri, kimyasal stabilitesi ve yüksek sıcaklık dayanımı karbon elyafları mühendislik uygulamaları için kullanımını ideal kılmaktadır.

Radyasyonla etkileşim açısından, CF takviyeli kompozitler gama ışını ve nötron radyasyonuna karşı etkili zayıflatma özellikleri göstermektedir. Özellikle bor ilave edilmiş CF/epoksi kompozitler, nötron emme kapasitesinde belli bir artış göstererek uzay uygulamalarında radyasyon zırhlaması için kullanıma uygun hale gelmektedir (Ebrahimi & Karami, 2023).

Yüksek enerjiye sahip proton ışınlarına maruz kalan CF takviyeli kompozitler, termal şok emme ve radyasyon hasarına karşı dayanıklılık göstermektedir. Bu özellik, yüksek güçlü hızlandırıcılar ve düşük empedanslı kollimasyon elemanları gibi uygulamalarda önem taşımaktadır (Zhang, Li, & Chen, 2017).

Ayrıca, CF/epoksi kompozitleri elektromanyetik müdahale (EMI) kalkanlama özellikleri göstererek elektromanyetik alanların olumsuz etkilerini azaltarak sistemlerin güvenliğini artırmaktadır (Smith & Wang, 2025).

Karbon elyaf, üstün mekanik özellikleri ve radyasyonla etkileşimi açısından oldukça avantajlı bir malzemedir. CF takviyeli kompozitler, gamma ışını ve nötron zayıflatma kapasitesi, yüksek enerjili proton ışınlarına karşı direnç ve elektromanyetik müdahale kalkanlama gibi özellikleri ile uzay yapıları, nükleer enerji santralleri ve elektromanyetik hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Gelecekte, CF'nin radyasyonla etkileşimi üzerine yapılacak daha detaylı araştırmalar, bu malzemenin daha verimli ve güvenli kullanımını sağlayacaktır (Ebrahimi & Karami, 2023; Smith & Wang, 2025; Zhang, Li, & Chen, 2017).

Bazalt

Bazalt, magnezyum ve demir açısından zengin, ince taneli ve koyu renkli bir volkanik kayadır. Yüksek sıcaklıkta hızla soğuyan lavların yüzeye çıkmasıyla oluşur ve Dünya yüzeyinin bir bölümünü kaplar (Ding, Zhang, & Liu, 2022). Kimyasal bileşimi genellikle SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO ve TiO_2 'den oluşur ve bu bileşim, bazaltın mekanik dayanımı gücü, yüksek sıcaklık direnci ve kimyasal stabilitesi sayesinde özellikle çevre dostu yapısı ve sürdürülebilir olması nedeniyle inşaat, otomotiv, uzay sanayilerinde ve kompozit malzeme sektöründe kullanım alanları artmıştır.

Bazaltın gama ışınlarına karşı koruma özelliklerini araştıran Ding ve arkadaşları (2022) farklı kalınlıklardaki bazalt fiber kumaşlarını 100 keV ve 120 keV enerjiye sahip gama ışınlarına maruz bırakmışlardır. Yapılan bu çalışmada, 100 keV enerjisi için 0.12 mm ve 0.28 mm kalınlığındaki kumaşlar sırasıyla %18.9 ve %22.5 oranında, 120 keV için ise %8.7 ve %10.4 oranında koruma sağlamıştır. Bu değerler, 0.5 mm kalınlığındaki kurşun levhanın %38.9 ve %46.3'üne karşılık gelmektedir. Bu bulgular, bazalt fiberlerin gama ışınlarına karşı etkin bir koruma sağladığını göstermektedir.

Gama ışını maruziyeti sonrası yapılan analizlerde, bazalt fiberlerin yapısal bütünlüğünün korunduğu, yüzey morfolojisinde belirgin ölçüde bir değişiklik olmadığı ve yüzey elementlerinin içeriğinin sabit kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, fiberlerin kütle kaybı oranı %1'den daha az olup, çekme mukavemeti ve elastik modülü sırasıyla %4.7–7.5 ve %3.9–9.1 oranında artmıştır. Bununla birlikte, kopma uzaması %4.18–10.97 arasında azalmıştır. Bu sonuçlar, uzun süreli radyasyon maruz kalınması durumuna karşı bazalt fiberlerin stabil durumda kaldığını ortaya koymaktadır (El-Bakary & Yassien, 2018).

Zorla ve arkadaşları (2016), boron oksit katkılı bazalt fiberleri beton ilavesiyle güçlendirerek nötron ve gama ışını koruma özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada, gama ışını koruması WinXCom programı ile, nötron koruması ise Monte Carlo Serpent kodu ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar, boronlu bazalt fiberlerin betonun nötron koruma kapasitesini artırdığını, fakat gama ışını korumasında belirli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, boron katkılı bazalt fiberlerin özellikle nötron koruma uygulamalarında kullanıma uygun olduğunu göstermektedir.

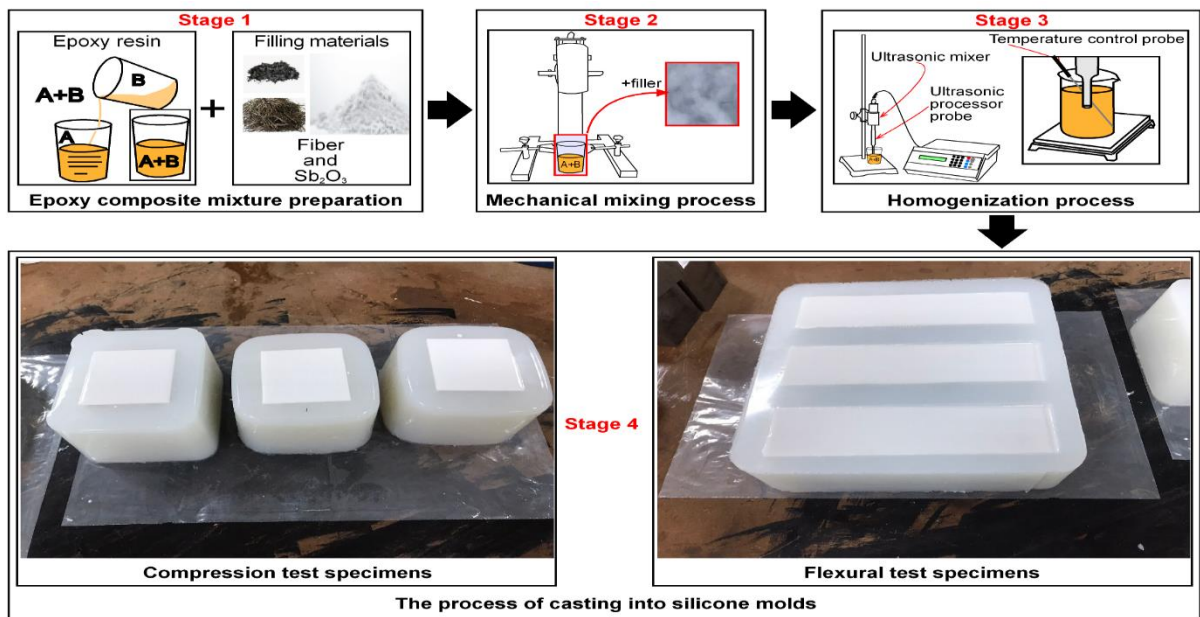
Bazalt ve türevleri, üstün mekanik gücü, termal özellikleri, düşük maliyeti ve doğal yapısı nedeniyle radyasyon koruma malzemesi olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Bazalt fiberler, inşaat sektöründe, nükleer tesislerde ve uzay uygulamalarında radyasyon kalkını olarak kullanılabilir. Boronlu bazalt fiberler ise nötron koruma uygulamalarında kullanıma uygundur. Bazalt malzemeler dayanıklılığı ve çevresel avantajları nedenleriyle sürdürülebilir mühendislik çözümlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekte radyasyon güvenliği alanında stratejik bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi

Bu çalışmada, kompozit numunelerin hazırlanması için karbon elyaf, antimon trioksit (Sb_2O_3) ve bazalt elyaf farklı oranlarda ilave edilmesiyle homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmış ve kuruması için kalıplara dökülerek kompozit malzemeler elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ve antimon trioksit içeren yedi farklı kompozit çeşitleri (RT1, RT2, RT3, RT4,

RT5, RT6, ve RT7) hazırlanmıştır. Kompozit malzemeler düşük maliyetle üretilerek bu malzemelerin radyasyon zırlama parametreleri incelenmiştir. Numuneler Ba-133 radyoaktif kaynaklarla 900 saniyelik gama ışını bombardımanına tabi tutularak zırlama kabiliyetleri 0 keV – 200 keV, 200 keV -400 keV enerji aralığı için analiz edilmiştir.

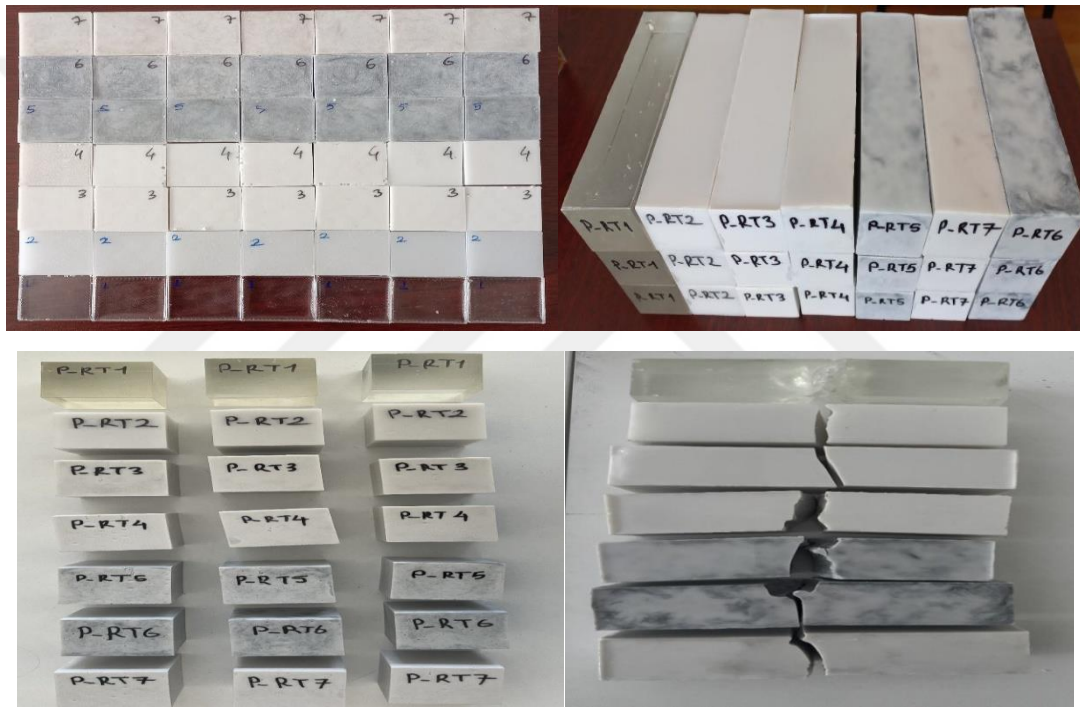
Bu çalışmada, Marker Reçine Teknolojileri, Türkiye firmasından tedarik edilen bir epoksi reçinesi (Resinin A) ve buna karşılık gelen sertleştirici (Resinin B) kullanılmıştır. Kompozitlere eklenen dolgu maddeleri antimon trioksit (Sb_2O_3), karbon fiber ve bazalt fiberdir. Tablo 6’da verilen oranları göre epoksi esaslı kompozitlerin ayrıntılı formülasyonlarını, örnek kodlarını ve epoksi reçinesi, sertleştirici ve her bir dolgu malzemesinin ağırlık yüzdelerini özetlemektedir. Kompozit numuneler iki aşamalı bir dispersiyon işlemiyle hazırlanmıştır. Başlangıçta, dolgu maddeleri mekanik bir karıştırıcı (Vortex Genie 2) kullanılarak epoksi matrise eklenerek ön homojen bir dağılım sağlanmıştır. Bunu, karışımın homojenliğini daha da artırmak için ultrasonik homojenizasyon (Sonics VCX 130) takip etmiştir. Epoksi sistemi yaklaşık 20 dakikalık bir jelleşme süresi ve 1 saatlik bir ilk kürlenme süresi sergilemiştir. Elde edilen karışımlar daha sonra basınç ve eğilme testleri için gerekli boyutlarda özel olarak üretilmiş silikon kalıplara döküldü. Dökümden sonra, numunelerin tam polimerizasyonunu sağlamak için 24 saat boyunca ortam sıcaklığında kürlenmesi sağlandı. Malzemenin hazırlanmasından nihai numune üretimine kadar üretim sürecinin şematik bir gösterimi Şekil 10’da ve hazırlanan kompozit numuneler Şekil 11 ‘de yer almaktadır.



Şekil 10. Numune üretimine kadar üretim sürecinin şematik bir gösterimi

Tablo 6. Kompozit Çeşitleri

Kod	Epoksi(%)	Antimon Trioksit Sb_2O_3 (%)	Karbon Elyaf (%)	Bazalt Elyaf (%)	Yoğunluk ³ (g/cm)
RT1	100	-	-	-	1.096
RT2	99	1	-	-	1.099
RT3	97	3	-	-	1.115
RT4	95	5	-	-	1.128
RT5	96.8	3	0.1	0.1	1.109
RT6	96.8	3	0.2	-	1.110
RT7	96.8	3	-	0.2	1.113

**Şekil 11.** Hazırlanan kompozit numuneler

Spektroskopi Ölçüm sistemi

Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Taramalı elektron mikroskopu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskopu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşime geçirek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili dedektörler tarafından toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir. Elde edilen numunelerin numune yüzeyleri hakkında bilgi almak için DAYTAM da ölçümler alınacaktır

Taramalı Elektron Mikroskobu, madde ile elektronların etkileşime girmesi sonucu açığa çıkan ikincil sinyallerin toplanması ve görüntülenmesi prensibine dayanan yüksek çözünürlüğe sahip olan bir mikroskop çeşitidir. Optik mikroskoplar kıyasla, görüntüleme için elektron demeti kullanıldığından çok daha üstün büyütme ve çözünürlük performansı sunmaktadır (Goldstein *et al.* 2017). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), son yıllarda özellikle malzeme bilimi, metalürji, biyoloji, jeoloji ve nanoteknoloji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Reimer, 1998).

SEM'in temel çalışma prensibi, odaklanmış bir elektron demetinin numune yüzeyi üzerinde taranmasına dayanır. Elektron tabancasından çıkan elektronlar elektromanyetik mercekler yardımı ile çok ince bir noktaya odaklanarak bu yüksek enerjiye sahip elektronların numune yüzeyine çarptmasıyla birlikte çeşitli etkileşimler meydana gelir:

- **İkincil Elektronlar (SE):** Düşük enerjili elektronların yüzeyden salınmasıyla elde edilir, yüzey morfolojisinin görüntülenmesinde kullanılır (Goldstein *et al.* 2017).
- **Geri Saçılmış Elektronlar (BSE):** Yüksek enerjili elektronların numuneye etki ederek elastik saçılması sonucu oluşur, atom numarasındaki farklılıklara bağlı kontrast elde edilmesini sağlar (Reimer, 1998).
- **Karakteristik X-Işınları:** Elektronların, iç kabukta bulunan elektronları uyarmasıyla ortaya çıkar; bu X-ışınları enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS/EDX) ile elementel analiz yapılmasını sağlar (Egerton, 2011).
- **Katot Işıması:** Numunenin elektron bombardımanı ile ışık yaymasıdır, bazı malzemelerin karakterizasyonunda kullanılır (Bozzola & Russell, 1999).

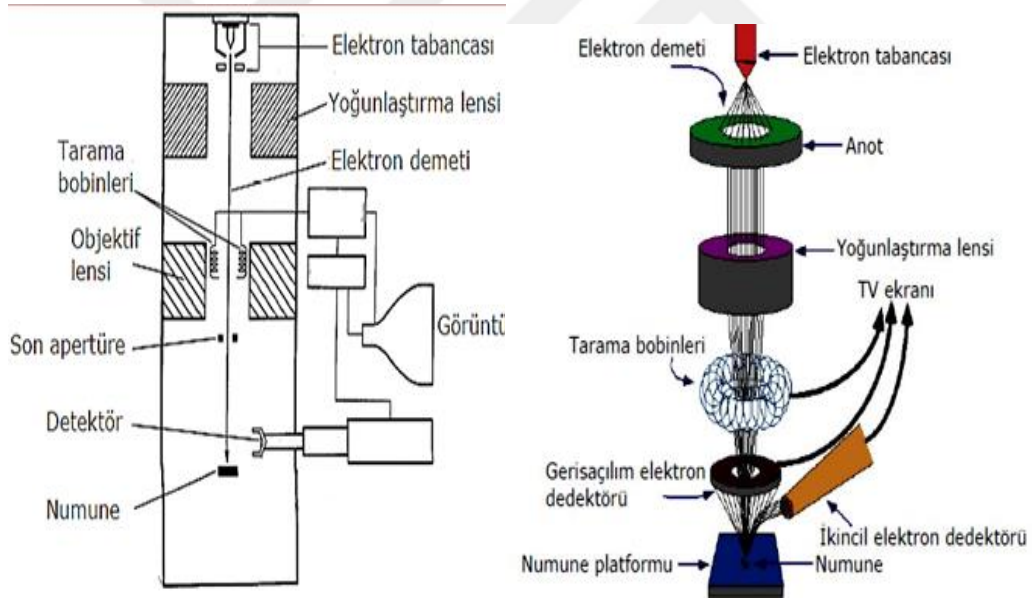
SEM cihazı, elektron tabancası, elektromanyetik mercekler, tarama bobinleri, numune odası, dedektörler ve görüntüleme sisteminden oluşmaktadır. Elektron kaynağı olarak tungsten filaman, LaB₆ kristali veya alan emisyonlu tabancalar kullanılmaktadır (Goldstein *et al.* 2017). Elektron demeti elektromanyetik merceklerle odaklanır ve tarama bobinleri yardımıyla numune yüzeyinde satır satır hareket ettirilir (Reimer, 1998). Dedektörler aracılığıyla elde edilen sinyaller işlenerek görüntüye dönüştürülür. Bu dedektörler arasında SE dedektörü yüzey morfolojisini, BSE dedektörü atom numarasına bağlı kontrastı, EDS/EDX dedektörü ise elementel analizi sağlamaktadır. Şekil 12 de SEM cihazının temel birimleri yer verilmiştir (Egerton, 2011).

SEM, oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle malzeme biliminde mikro yapı, yüzey pürüzlülüğü ve kırılma yüzeylerinin incelenmesinde; metalürjide alaşımların tane boyutu ve faz dağılımlarının belirlenmesinde; nanoteknolojide nanoyapıların morfolojik analizlerinde; jeolojide ise mineral bileşimi ve mikroyapısal incelemelerde; biyolojide hücre ve

dokuların yüzey yapılarının gözlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bozzola & Russell, 1999; Goldstein *et al.* 2017).

SEM'in en önemli avantajları arasında çok yüksek büyütme (10 – 1.000.000x), yüksek çözünürlük (1–10 nm) ve geniş alan derinliği sayesinde üç boyutlu yüzey görüntüsü elde edebilme ve EDS/EDX sistemi ile elementel analiz yapabilme yeteneği yer almaktadır (Reimer, 1998; Egerton, 2011). SEM'in, birçok avantajlarının yanında bazı sınırlılıkları da bulunur. İlk olarak vakum ortamı gereklidir ve bu durum özellikle biyolojik örneklerin hazırlanmasını zorlaştırır (Bozzola & Russell, 1999). Buna ek olarak elektron demeti hassas veya organik numunelere zarar verebilir. Çalışmalarda kullanılan iletken olmayan numuneler için iletken kaplama (ör. altın, platin, karbon elyaf) ile hazırlanması gerekmektedir (Goldstein *et al.* 2017).

SEM, yüksek çözünürlükte yüzey görüntüleme ve elementel analiz yapabilmesi sayesinde modern bilimsel araştırmalarda vazgeçilmez bir araçtır. Hem kalitatif hem de kantitatif analizlerde sağladığı avantajlarla malzemelerin mikro ve nano ölçekli özelliklerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (Reimer, 1998; Goldstein *et al.* 2017).



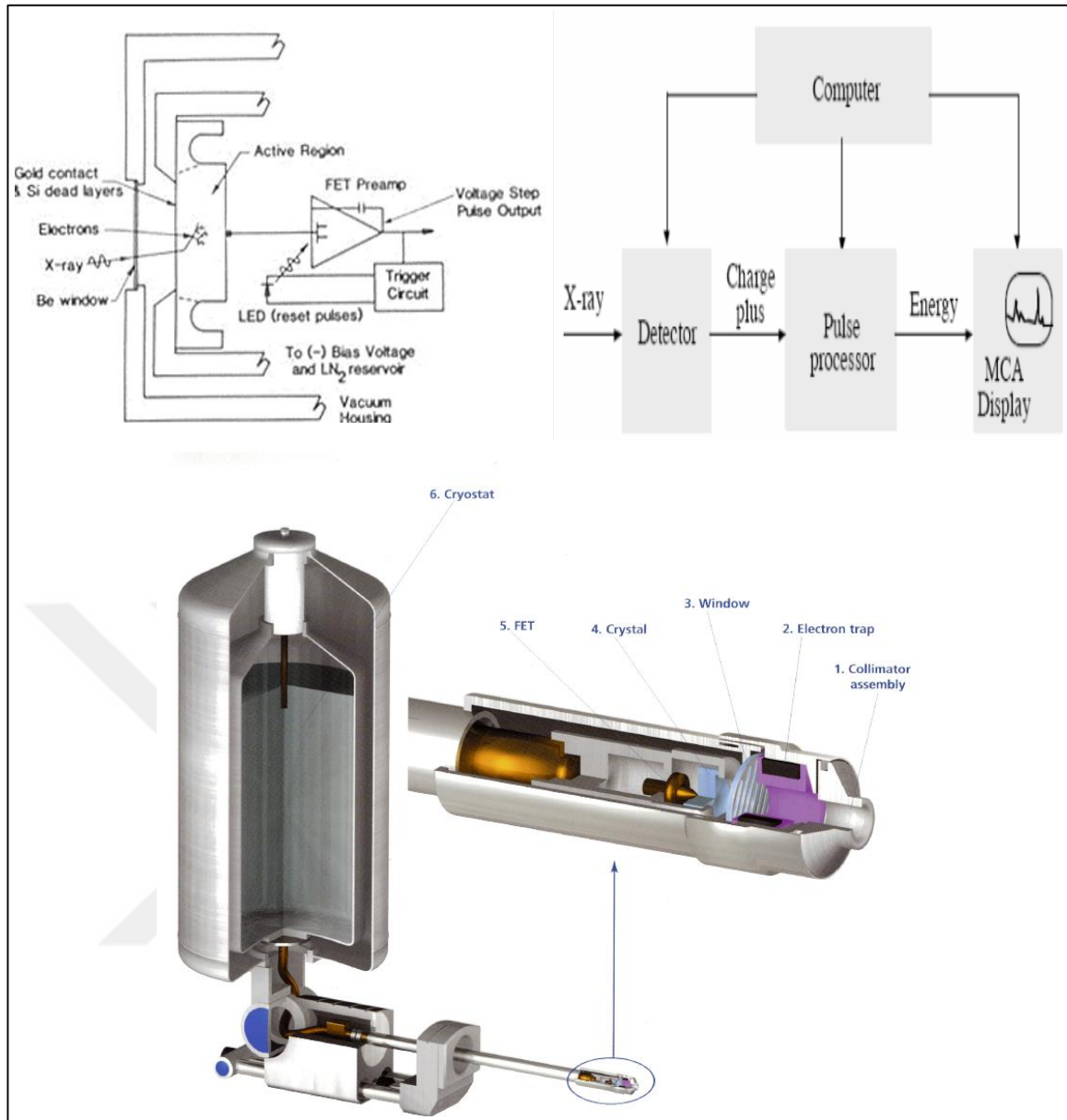
Şekil 12. SEM cihazının temel birimleri

Enerji Dağılımlı X-Işını (EDX)

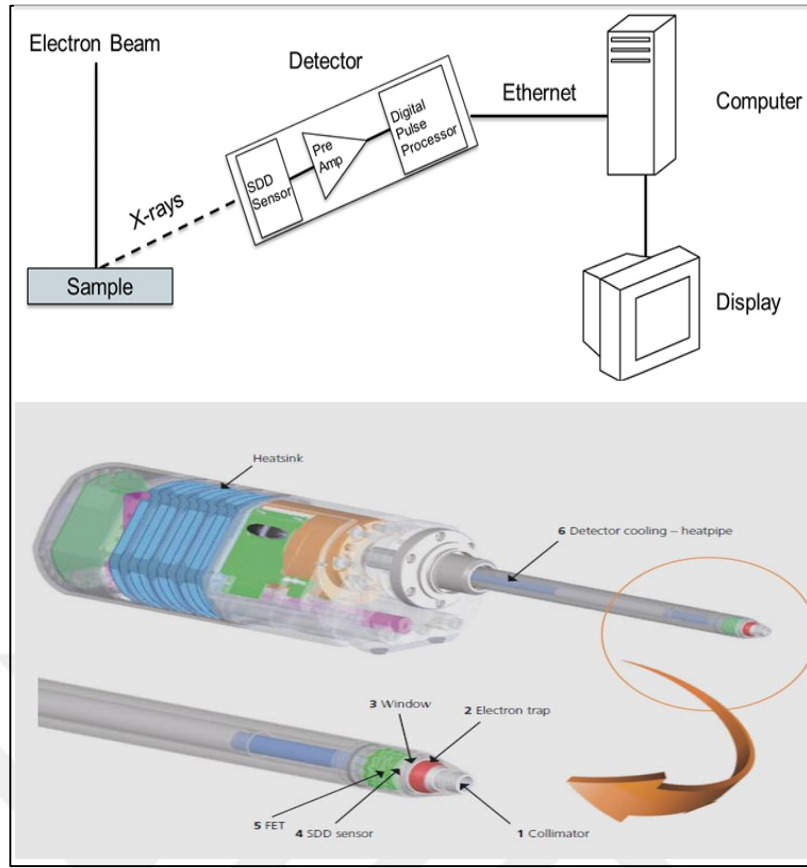
Enerji dağılımlı X-ışını EDX, özellikle taramalı elektron mikroskopları (SEM) ve geçirimli elektron mikroskopları (TEM) ile entegre bir şekilde çalışarak numunelerin elementel bileşimini belirleyen, nitel ve nicel analiz yapmaya olanak sağlayan bir X-ışını mikroanaliz yöntemidir. Bu yöntem, yüksek enerjili elektronun numunenin atomları ile etkileşimi sonucu oluşan karakteristik X-ışınlarının enerjisinin ölçülmesine dayanır ve malzeme bilimi, jeoloji, biyomedikal araştırmalar ve yarıiletken arıza incelemeleri gibi birçok alanda uygulama alanına sahiptir (Goldstein *et al.* 2017; Newbury & Ritchie, 2015).

Birincil elektron demeti numune atomlarının iç kabukta bulunan elektronlarını iyonize edebilecek kadar yüksek enerji taşıdığında, iç kabuktan bir elektron uzaklaştırılır ve daha üst enerjili bir elektron bu boşluğu doldurduğunda aradaki enerji karakteristik bir X-ışını fotonu olarak yayılır. Oluşan bu ışının enerjisi, kullanılan malzemenin atom numarasına özgüdür (ör. $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$ hatları) ve dedektörde ölçülen enerji tepe konumları sayesinde element tanımlaması yapılır. Aynı zamanda elastik ve inelastik saçılma ile hızlanan elektronların oluşturduğu sürekli (bremsstrahlung) arka plan spektruma eklenir; bu yüzden spektral analiz hem karakteristik hatların hem de arka planın doğru modellenmesini gerektirir (Reimer & Kohl, 2008; Williams & Carter, 2009).

Dedektör teknolojisinde, genellikle geleneksel olarak Si(Li) dedektörler kullanılırken, modern sistemlerin çoğunda yüksek sayım hızı ve daha iyi enerji çözünürlüğü sağlayan Silikon Drift Dedektörler (SDD) ile donatımı yapılmıştır. Silikon Drift Dedektörler (SDD)'ler daha yüksek giriş sayım hızlarına, daha düşük gürültüye ve Peltier soğutmalı operasyonla sıvı azot kullanımının azlamasını mümkün kılar. Ayrıca dedektör penceresi tipi (kalın pencere, ince pencere, windowless) hafif elementlerin (B, C, N, O, Li vb.) dedekte edilebilirliğini doğrudan etkiler; ince pencere veya windowless tasarımlar hafif elementlerin X-ışınlarını daha az soğurur. Şekil 13 ve Şekil 14'te EDX dedektörlerinin gösterimi yer almaktadır (Thermo Fisher Scientific, 2020).



Şekil 13. EDX dedektörü (Si (Li) dedektörünün içyapısı)



Şekil 14. EDX dedektörü (SDD dedektör ve bağlı donanım)

Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) spektrometresiyle gerçekleştirilen nicel analizlerde, spektral entegrasyon yaklaşımıyla beraber, k-oran kullanımı, standart tabanlı kalibrasyon ve matris düzeltmeleri (ZAF veya $\phi(\rho z)$ modelleri) uygulanır. Bu durum sayesinde analiz edilen elementlerin gerçek kütle veya atomik konsantrasyonları güvenli bir şekilde hesaplanabilir. İnce filmler için Cliff-Lorimer ve zeta-factor yöntemleri tipik olarak tercih edilir; standartsız yöntemler pratik olmakla birlikte doğruluk sınırlamaları vardır (Cliff & Lorimer, 1975; Bastin & Heijligers, 1991).

EDX analizi için mekansal çözünürlük, elektron-numune etkileşim hacmi ile sınırlıdır. Etkileşim hacmi; numunenin atom numarası, yoğunluğu ve hızlandırma gerilimi ile ilişkilidir. Düşük kV (1–5 kV) yüzeysel analiz sağlarken, yüksek kV (10–30 kV) daha derin hacimlere nüfus eder. Bu durum, hassas ayırıştırma ve lokalizasyon analizlerin yorumlanmasında göz önüne alınması gereken önemli bir parametredir (Newbury & Ritchie, 2015).

EDX, özellikle malzeme bilimi, nanoteknoloji, jeoloji ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. EDX tekniği, malzemelerin yüzey morfolojisini gözlemleme imkânı sağlarken bunun yanı sıra kimyasal kompozisyonunun aynı anda incelenmesiyle araştırmalarda kritik bir analiz yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, enerji dağılımlı X

ışını (EDX) hızlı ve tahribatsız analiz yapabilmesi nedeniyle geniş bir malzeme aralığında tercih edilmektedir (Goldstein *et al.* 2017; Newbury & Ritchie, 2015).

Gama Spektrometreleri

Gama Spektrometreleri, gama ışınlarının sahip oldukları enerjilerini ve yoğunluklarını yüksek hassasiyetle ölçen cihazlardır. Bu cihazlar gama ışını spektrumunu oluşturarak radyoaktif izotopların türünü ve miktarını belirlemek için kullanılır (Knoll, 2010). Temel olarak bir dedektör, sinyal işleme birimleri ve veri analiz sisteminden oluşur. Gama spektrometreleri, özellikle çevresel radyoaktivite izleme, nükleer fizik araştırmaları, radyasyon güvenliği ve nükleer adli incelemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gilmore, 2008). Bu cihazın en önemli avantajı ise gama fotonlarının enerjilerini yüksek çözünürlükle ölçebilmesidir. Enerji çözünürlüğü, kullanılan dedektör türüne bağlı olarak değişir. Örneğin, NaI(Tl) sintilatörler düşük maliyetli ve yüksek verimli olmasına rağmen çözünürlükleri daha düşüktür; HPGe dedektörler ise yüksek çözünürlük sağlar, fakat kriyojenik soğutma gerektirir (Tsoulfanidis, 2013).

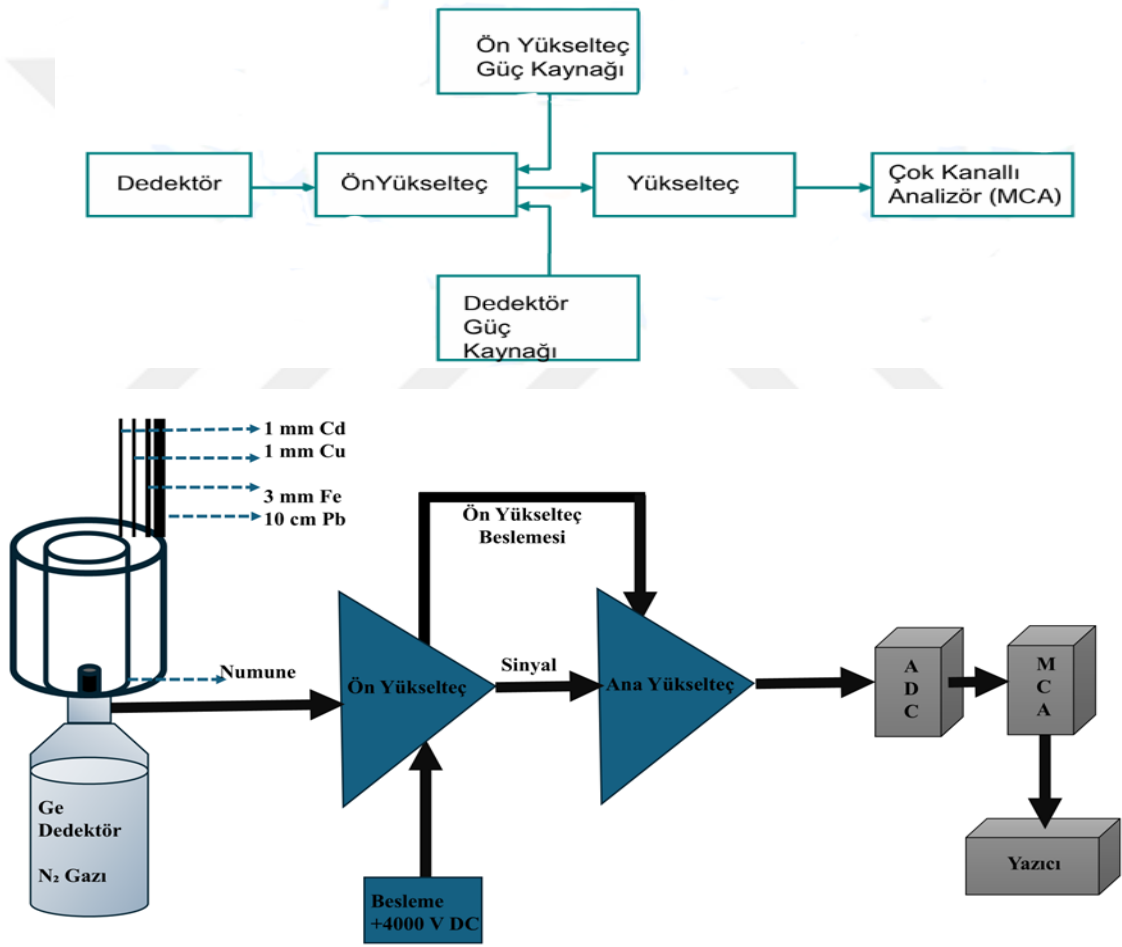
Gama Spektrometreleri Çalışma Prensibi

Gama spektrometreleri, gama ışınlarının dedektör malzemesi ile etkileşime girmesi sonucunda açığa çıkan elektriksel sinyallerin enerjiye göre analiz edilmesi prensibiyle çalışır. Sistemin işleyişi üç aşamada gerçekleşir:

1. **Radyasyonun Dedektörle Etkileşimi:** Gama ışınları dedektör materyali ile fotoelektrik etki, Compton saçılması veya çift oluşum süreçleriyle etkileşir. Bu etkileşimler sonucunda elektronlar serbest kalır ve iyonizasyon oluşur (Knoll, 2010).
2. **Elektrik Sinyaline Dönüşüm:** Dedektörde açığa çıkan serbest yük taşıyıcıları, elektrik alan etkisi ile toplanarak bir elektrik sinyali oluşturur. Sintilatörlü sistemlerde bu süreç, fotonların optik sinyale dönüşmesi ve ardından fotokatot üzerinden elektron üretilmesiyle tamamlanır (Gilmore, 2008).
3. **Sinyalin İşlenmesi ve Analizi:** Elektrik sinyali, preamplifikatör ve amplifikatörlerden geçerek yükseltilir, ardından analog-sayısal dönüştürücüler aracılığıyla dijital formata çevrilir. Bu veriler, çok kanallı analizör (MCA) tarafından enerji kanallarına ayrılır ve enerji spektrumu oluşturulur (Tsoulfanidis, 2013).

Bir gama spektrometresinde genellikle aşağıdaki ana bileşenlerden oluşur:

- Dedektör: bazı dedektör türleri NaI (Tl), BGO, CZT veya HPGe gibi gama fotonlarını algılayan ana bileşenlerdir.
- Yüksek Voltaj Kaynağı: Dedektörün çalışması için gerekli olan potansiyel farkı oluşmasına sebep olur.
- Preamplifikatör ve Amplifikatör: Sinyali toplar ve güçlendirir.
- Çok Kanallı Analizör (MCA): Enerji kanallarına göre sinyalleri sınıflandırır ve spektrum oluşturulmasını sağlar.
- Veri Toplama ve Analiz Yazılımı: Elde edilen spektrumun analizini yaparak, izotop tanımlaması ve aktivite hesaplamalarını gerçekleştirir. Gama spektrometresinin şematik gösterimi Şekil 15’de verilmiştir. (Gilmore, 2008).



Şekil 15. Gama spektrometresinin şematik gösterimi

Gama spektrometreleri, çevresel radyasyon izlemede; örneğin toprak, su ve havadan alınan örneklerde radyoaktivitenin belirlenmesinde, nükleer tesis güvenliğinde; yakıt kontrolü, sızıntı tespiti ve atık yönetiminde, tıbbi uygulamalarda; özellikle radyofarmasötiklerin aktivite tayininde, adli nükleer analizlerde; kullanılan radyoaktif maddelerin kökeninin belirlenmesinde

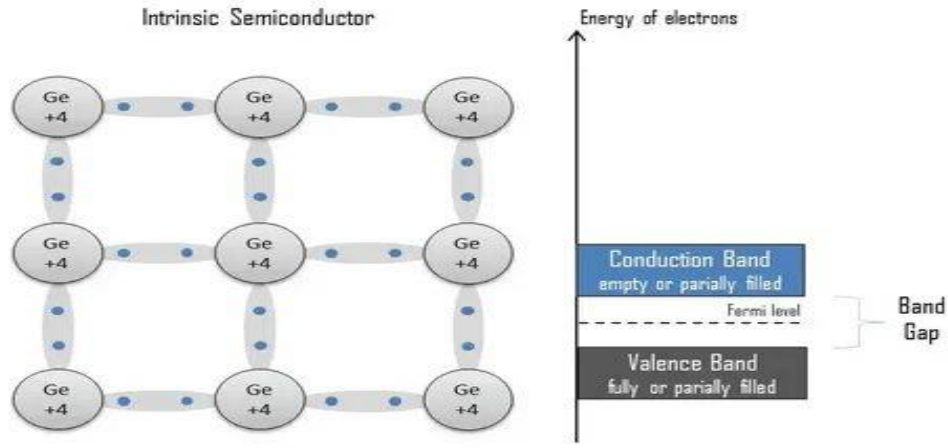
ve bilimsel araştırmalarda; nükleer fizik deneyleri ve gama ışını spektroskopisinde kullanılır (Tsoulfanidis, 2013).

Gama spektrometreleri yüksek  z n rl k hassasiyeti, radyoaktif izotopların enerji piki üzerinden ayırt edebilme ve geniş enerji aralığında ölüm yapma gibi avantajlara sahipken, bazı sınırlılıkları da vardır. Bunlar HPGe gibi yüksek  z n rl kl  sistemlerde soğutma zorunluluğu, dedektör tipine göre maliyetin yüksek olması, ağır kurşun zırhlama gerektirmesidir (Gilmore, 2008)

HPGe Dedektör  alışma Prensipleri

Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörleri, gama ışınlarını daha yüksek  z n rl kle ölçen yarıiletken dedektörlerdir. Yüksek saflıkta germanyum (HPGe), silisyum temelli dedektörlere kıyaslandığında daha yüksek enerji  z n rl ğ  sunarak özellikle gama spektroskopisinde tercih edilir (Knoll, 2010). HPGe dedektörü, çoğunlukla çok yüksek saflıkta (yaklaşık 10^{10} atom/cm³) germaniyum kristalinden üretilir; bu sayede içsel yük taşıyıcıları minimuma indirgenir ve dedektörün gürültüsü azaltılır (Gilmore, 2008). HPGe dedektörlerinin en temel avantajlarından biri de yüksek enerji  z n rl ğ  ( r. 1.33 MeV gama ışını için yaklaşık 2–3 keV), geniş enerji aralığında ise doğrusal yanıt vermesi ve düşük arka plan gürültüsü yer almaktadır (Knoll, 2010). Bu  zellikleri nedeniyle HPGe dedektörleri, gama ışınlarının enerjilerini çok hassas bir şekilde ölçerek element analizi ve radyoaktivite tayini gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tsoulfanidis, 2013).

HPGe dedektörleri, yarıiletkenlerde meydana gelen iyonizasyon olayına dayanarak çalışır. Gama ışınları, germanyum kristali ile etkileşime girdiğinde fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşum gibi süreçler meydana gelir. Fotoelektrik etki sırasında gama ışını, kristalden bir elektron çeker ve enerji iyonizasyon yoluyla elektrik sinyaline dönüşür. Compton saçılmasında, gama ışınının enerjisinin bir kısmı elektronlara aktarılır ve geriye kalan enerji foton olarak saçılır. Çift oluşum ise 1.022 MeV  zerindeki enerjiye sahip olan fotonlar için geçerlidir ve elektron-pozitron çiftleri oluşturarak dedektörde sinyal üretir (Knoll, 2010; Tsoulfanidis, 2013). Oluşan bu iyonizasyon bölgelerinde serbestleşen elektronlar ve delikler, dedektör içinde uygulanan ters polarlama voltajıyla toplanır. Bu toplama süreci, preamplifikatör ve amplifikatör tarafından güçlendirilerek sayıcı/spektroskop cihazına iletilir. Ge dedektör gösterimi şekil 16 ‘da verilmiştir. (Gilmore, 2008).



Şekil 16. Ge dedektör gösterimi

HPGe dedektörler, genellikle germaniyum kristali, elektrotlar, kriyojenik soğutma sistemi, preamplifikatör ve amplifikatör ile dedektör çevresinde koruma (shielding) bileşenlerinden oluşur (Knoll, 2010). Kristal, yüksek saflık ve homojenlikte olmalıdır; elektrotlar, ters polarlama için Li-doplu n-tipi ve B-doplu p-tipi gibi katmanlardan oluşur. Dedektörün düşük termal gürültü ile çalışabilmesi için genellikle sıvı azot veya mekanik soğutma ile yaklaşık 77 K'e düşürülür (Gilmore, 2008). Dedektör verimliliği, kristal hacmi ve geometrisine bağlıdır; tipik boyutlar 20–70 mm çap ve 10–70 mm uzunluk arasındadır.

HPGe dedektörleri, özellikle nükleer ve radyokimya analizleri, çevresel radyasyon ölçümleri, radyoaktif izotopların spektral analizi, tıbbi radyofarmasötik tayini ve nükleer güvenlik uygulamalarında kullanılır. Yüksek enerji çözünürlüğü, gama ışını spektrumundaki pikleri net ayırt edebilme yeteneği sağlar; böylece izotopların güvenilir şekilde tanımlanması mümkün olur (Tsoulfanidis, 2013; Knoll, 2010)

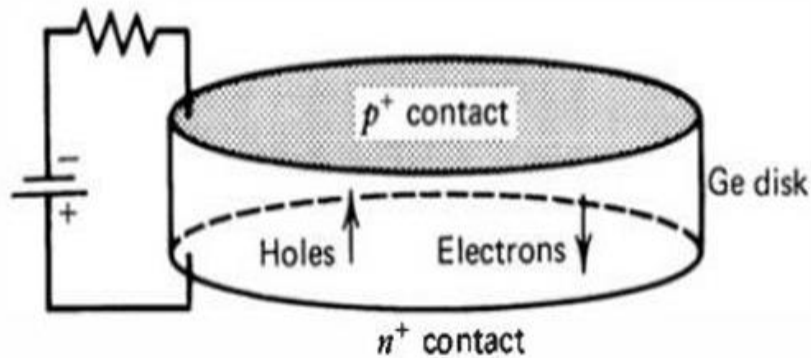
HPGe dedektörleri yüksek enerji çözünürlüğe, geniş enerji aralığında doğrusal yanıt ve düşük arka plan gürültüsü gibi avantajlara sahiptir (Gilmore, 2008). Fakat HPGe dedektörlerinin bazı dezavantajları bulunmaktadır bunlar kriyojenik soğutma gerektirmesi, göreceli olarak yüksek maliyetli olması, taşınması ve kurulumunun hassasiyet gerektirmesi bu durumları kapsar (Knoll, 2010)

Yüksek saflıktaki germanyum (HPGe) dedektörleri genellikle nükleer fizik, gama ve X-ışını spektroskopisinde kullanılmaktadır. Germanyum dedektörlerinde elektron-hol çifti oluşturmak için gerekli olan enerji değeri 2,9 eV iken silisyum dedektörlerde ise bu değer 3,6 eV olur. Bu açıdan değerlendirildiğinde radyasyonun tespit edilebilmesi için yüksek verime sahip olan Silisyum dedektörlerin kalınlıkları birkaç milimetreden daha kalın olamazken germanyum dedektörlerin kalınlıkları birkaç santim olabilir. Bu nedenle megaelektronvolt (MeV) enerjiye kadar olan gama ışınları için kullanıma daha uygundur. Maksimum verim elde

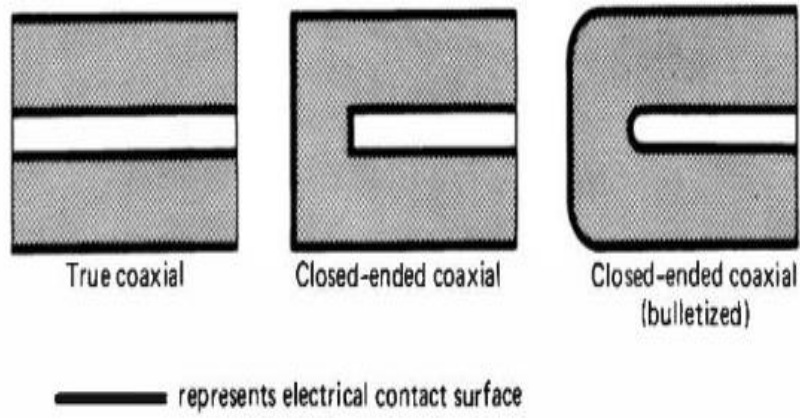
etmek için HPGe dedektörleri çok düşük sıcaklıklarda bulunan sıvı azot (-196°C) ile birlikte çalışması gerekmektedir, çünkü oda sıcaklıklarında termal olarak uyarılmadan kaynaklı ortaya çıkan gürültü çok yüksektir. Yarıiletken dedektörlerin çalışmasını özetlemek gerekirse, serbest kalan gama fotonları dedektörün germanyum kristalinin içerisine girer ve yarı iletken materyalle etkileşir. Yüksek saflıkta germanyum dedektöründen geçen yüksek enerjiye sahip olan foton, yarıiletkenin atomlarını iyonize hale getirerek elektron hol çiftlerini oluşturur. Oluşan elektron hol çiftlerinin sayısı ile yarı iletkene gelen radyasyonun enerjisi doğru orantılıdır. Sonuç olarak, valans bandından iletim bandına elektron aktarımı gerçekleşir ve valans bandında aynı miktarda hol oluşur. Bu çiftler elektrik alana maruz bırakıldığında, elektrotlara doğru hareket eder ve bu durum dış devrede ölçülebilecek bir sinyal oluşturur. Bu durumda oluşan sinyal gelen radyasyonun enerjisi ve ek olarak birim zamanda oluşan sinyallerin sayısı bu radyasyonun şiddetiyle ilgili bilgi verir (Bilgiç, 2020).

Germanyum dedektörlerini nemden korumak için vakumlama odasına ve kaçak akımların çok daha az bir seviyede tutulabilmesi için sıvı azot sıcaklığında olması gerekir. Dedektörün kristali için ultra saf germanyum kristalden veya lityum katkılanmış germanyum kristalden de olabilir. Elektronik gürültüyü önlemek için Ön yükseltici (preamplifikatör) dedektör kristalinin yakınlıklarına yerleştirilir. Üç farklı germanyum dedektör tipleri vardır. Bunlar; Coaxial (eş eksenli), planar (düzlemsel) ve well type (kuyu tipi) dir. Dedektör tiplerine Şekil 17, 18 ve Şekil 19 'da yer verilmiştir.

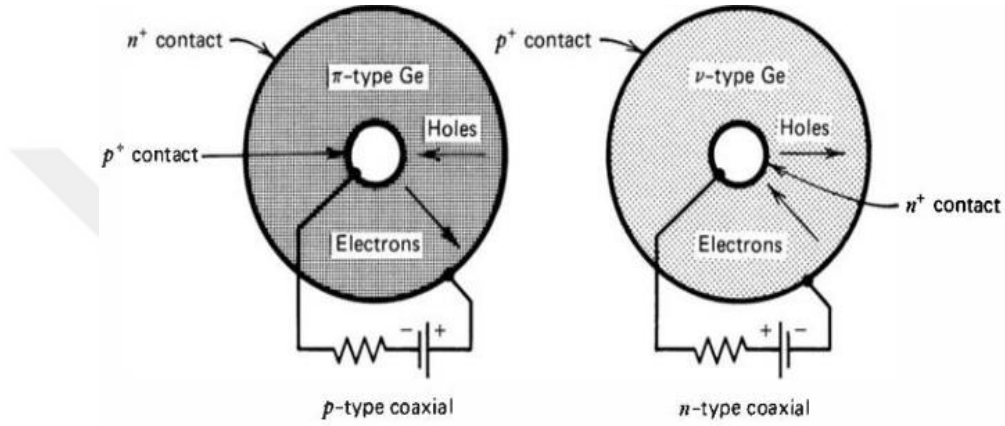
Çeşitli dedektör türleri gama ışınları ve X ışınları için dedektörün verimi, enerji aralığı ve enerji çözünürlüğü farklıdır. Coaxial (eş merkezli) p-tipi germanyum dedektörler için gama fotonları kullanılır. Ayrıca 100 keV'den yaklaşık 10 MeV'e kadar enerji aralığı değişir. Düşük enerjili gama ve X-ışınları için Coaxial (eş merkezli) p-tipi germanyum dedektörler tercih edilmezler. Dolayısıyla yüksek enerjili gama ışınları için dedektörün alüminyum penceresi ile aktif hacmine doğru geçebilmelidir (Perişanoğlu, 2018).



Şekil 17. HPGe dedektörünün düzlemsel yapılandırması



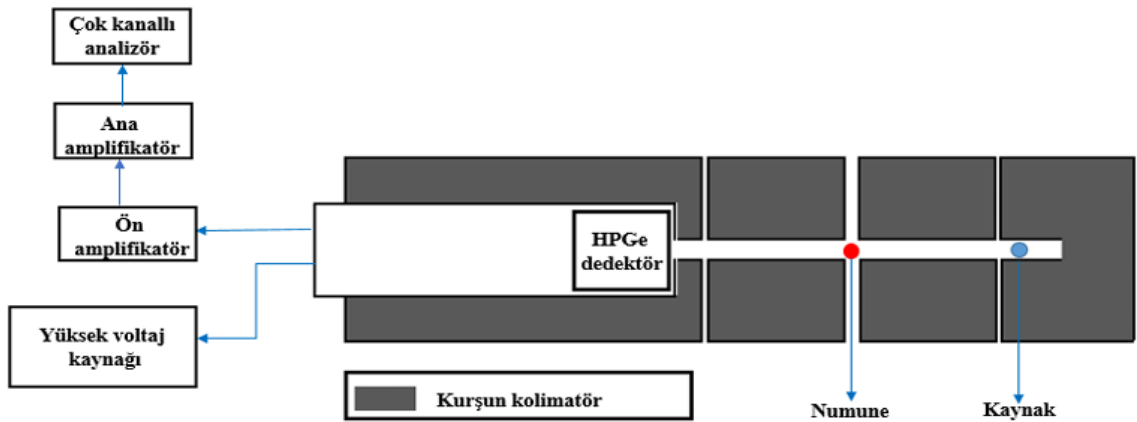
Şekil 18. Eş merkezli yapılandırılması



Şekil 19. Kuyu tipi yapılandırılması

Sayma Sistemi

Sayma sistemini sağlayan materyaller genellikle bir adet sayma sistemi, detektör, ön yükseltici (preamplifier) ve yükseltici (amplifier), bir yüksek voltaj kaynağı, analog sayısal dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör, osiloskop oluşur. Sayma sistemi Şekil 20 sunulmaktadır.



Şekil 20. Sayma sistemi gösterimi

Yüksek Voltaj Kaynağı

Serbest hale gelen yükleri toparlayabilmek için dedektörün üzerine yüksek voltaj uygulanması gerekir. Genelde iyi bir çalışma voltajının ayarlanması üretici firma tarafından belirlenerek bu çalışmada kullanılan HPGe dedektöre -1500 V gerilim uygulanmıştır.

Ön Yükseltici

Genellikle yük için hassas bir ön yükselticiler yarıiletken dedektör sistemlerinde kullanılır. Meydana gelen elektronik gürültüyü azaltmak için, çoğunlukla bir alan-etkili transistör (FET) olan ön yükselticinin girişi azotun kaynama sıcaklığında saklanır. Ön yükselticinin çalışmasını daha iyi hale getirmek için alan-etkili transistör FET'in sıcaklığı oda sıcaklığında bulunan dedektörün dış korumasından içerisine çok az miktarda ısı sızmasına izin verilerek dedektörün sıcaklığından daha sıcak tutulabilir. Ön yükseltici dedektörden gelen yük sinyalini voltaj sinyaline dönüştürerek bu yükselticiden dışarıya çıkan sinyallerin yükseklikleri veya genlikleri dedektörde toplanan yük 65 in katı ile orantılı olmalıdır. Şayet fotonun bütün enerjisi dedektörde soğurulmuşsa bu durumda fotonun enerjisiyle orantılı olmalıdır.

Yükseltici

Yükselticinin (amplifier) sistemde iki temel ana işlevi vardır:

1. Ön yükselticinin (preamplifier) çıkış impuls genliklerini ayırt eder ve impulsları sayma için uygun olan voltaj seviyelerine kadar yükseltebilir.
2. İmpuls genliği, impulslar ve X-ışını radyasyonu arasındaki orantıyı eksiksiz sağlayarak işlemi tamamen uygun bir şekle dönüştürür.

Gelişmiş sistemlerde maksimum çıkış impulsun genliğini 2 V'tan 10 V'a kadar değiştirir. Birçok yükselticinin (amplifikatör) hem tek kutuplu (unipolar) çıkış (sinyal ya tamamen pozitif ya da tamamen negatiftir.) hem de çift kutuplu çıkış (sinyal hem pozitif hem de negatif yönlüdür.) donatılmıştır. En yüksek sinyal-gürültü oranını (S/N) ulaşmak için, yükselticinin unipolar çıkışı tercih edilir. Kullanıcı tarafından özellikle seçilmesi gereken bir diğer yükseltici denetimi impuls genişliğini belirleyen "shaping time" sabitidir. Spektrumda oluşan pikler için optimum çözünürlük (rezölasyon), çoğunlukla sistemlerin gürültüyü daha uzun bir süre boyunca ortalama almasına olanak sağlayan uzun zaman sabiti kullanılarak elde edilir. Buna ek olarak uzun zaman sabitleri daha fazla rastgele sinyallerin toplanmasına sebep olur. Bu duruma bağlı olarak, sistemin 2.000 s'lik sayma periyotlarında çalıştırılabilirse zaman sabitleri daha kısa seçilebilir.

Analog Dijital Dönüştürücü (ADC)

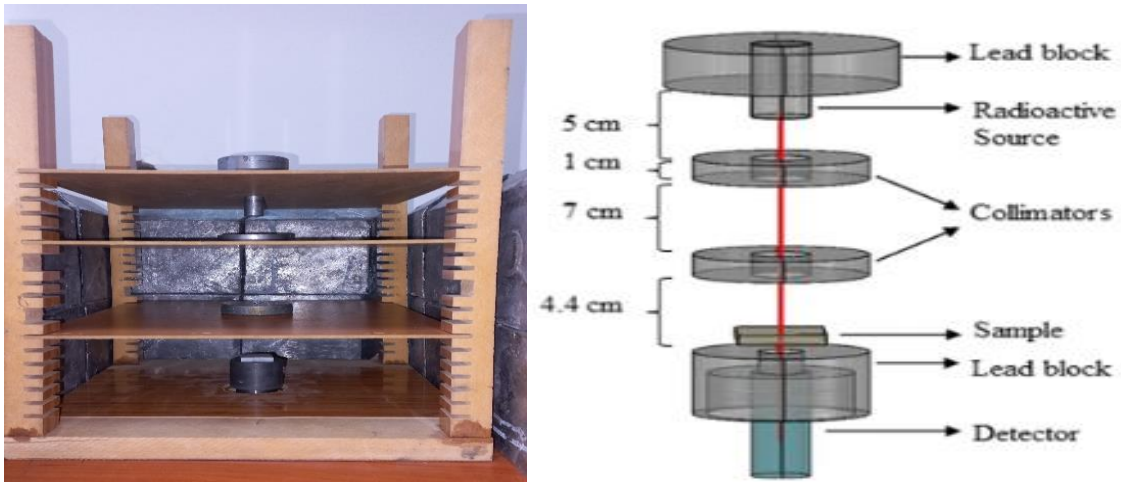
ADC'nin (Analog dijital dönüştürücünün) sistemdeki amacı amplifikatöre (yükseltici) iletilen analog impulsların genliği ölçerek, X-ışını foton enerjisi ile orantılı olarak bir tam sayıya dönüştürmektir. Bu tür bir işlemler analoğu sayısala dönüştürme (ADC) işlemi olarak tanımlanır. Her bir sayılan impulsun yüksekliği kadar sayı analizörün hafızasında birikir ve sonuçta bu veriler bir enerji spektrumu olarak görüntülenir.

Çok Kanallı Analizör

Çok kanallı analizör (MCA) sayısal verilere dönüştürülen impulsları doğruca kanallara yerleştirerek bilgisayarın hafızasına kaydedilmesini sağlar. Aslında, kanallarda verileri depolamak kullanılan kutudur. Cihaz X-ışını spektrumunda önceden belirlenmiş enerji aralıklarına düşen impulsları sayar ve kalibrasyon işlemi ise standart kaynaklar kullanılarak ölçüme başlanmadan önce yapılmalıdır (Perişanoğlu, 2018).

Kompozit materyaller gama ışınlarını zayıflatma kapasiteleri, farklı oranlarda eklenen (örneğin Sb_2O_3 , Karbon Elyaf ve Bazalt) ve bağlayıcı olarak kullanılan epoksi ile hazırlanan RT1'den RT7'ye kadar yedi çeşit numune üzerinde incelenmiştir. Yapılan deneylerde gama ışını kaynağı olarak ^{133}Ba izotopu kullanılarak bu kaynak vasıtasıyla 0 keV- 200keV ve 200 keV- 400keV enerjilerine sahip olan fotonlarla numunelerin uyarılması sağlanmıştır.

Hazırlanan kompozit numuneler, 900 saniyelik zaman aralıklarıyla üç kez ışınlanmış ve bu ışınlamalar sonucunda elde edilen spektrumlardaki pik alanları ölçülmüştür. Alınan ölçüm sonuçlarının daha da hassasiyetini artırmak için, hazırlanan her bir numune için bulunan pik alanlarının ortalamaları alınarak LAC, MAC, HVL, MFP ve mekanik dayanım testleri için deneysel hesaplamalar yapılmıştır Gama ışını deney düzeneği Şekil 21'de yer verilmiştir.



Şekil 21. Gama ışını deney düzeneği gösterimi

Mekanik Testler

Bir malzemenin uygulanan kuvvetler karşısındaki davranışını belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar mekanik testlerdir. Bu testler ile malzemelerin dayanım gücü, elastiklik, darbe, sertlik ve yorulma gibi nicel özelliklerinin belirlenmesi sağlanır. Kompozitler mühendislik tasarımlarında kullanılabilirliği ve güvenilirliği için bu veriler zorunludur (Callister & Rethwisch, 2020).

Mekanik Testlerin Genel Özellikleri

- Standartlara bağlıdır: ASTM, ISO veya TS standartları kullanılır.
- Numune boyutları kritiktir: Ölçüm doğruluğu numune geometrisine bağlıdır.
- Yükleme türüne göre ayrılır: Çekme, basma, eğme, darbe, yorulma gibi.
- Alınan ölçümler mühendislik hesaplarında kullanılır: Örneğin; betonarme hesaplarında basınç dayanımı, makine elemanlarında çekme dayanımı önemlidir.

Başlıca Mekanik Test Türleri

- 1.Basınç Dayanım Testi:** Malzemelerin uygulanan kuvvet altındaki dayanımı ölçülür. Özellikle beton, taş, seramik gibi malzemeler için oldukça önemlidir. Örneğin; betonun basınç dayanımı 28 günlük numunelerde belirlenir ve yapı güvenliği açısından sınıflandırılır (Neville, 2011).
- 2. Eğilme (Bükme) Testi:** Eğilme dayanımı testi ise malzemelerin üç veya dört nokta yükleme altında kırılma davranışını inceler. Seramik ve kompozitler için yaygın olarak uygulanan testtir. Elde edilen değer: Eğilme dayanımı (flexural strength).
- 3.Darbe Testi (Tokluk Testi):** Ani yükler altında malzemenin kırılma enerjisini ölçer. Charpy veya Izod yöntemleri kullanılır. Özellikle düşük sıcaklıkta malzemenin sünek-brittle geçişi incelenir. (Anderson, 2017).
- 4.Sertlik Testi:** Malzemenin yüzeyine batırılan bir uç ile yüzey direnci ölçülür. Brinell, Rockwell, Vickers yöntemleri bulunur. Örneğin; ısıtılmış çeliklerde sertlik ölçümü kalite kontrol için kullanılır.
- 5.Yorulma Testi:** Tekrarlı yükler altında malzemenin dayanım sınırlarını ölçmeye yarar. Malzeme tek seferde değil, milyonlarca yükleme döngüsü sonrası kırılabilir. Özellikle uçak kanatları, otomotiv parçaları gibi dinamik yükler taşıyan sistemler için önemli rol oynar (Suresh, 1998).

Basınç Dayanım Testi

Bu çalışmada ise hazırlanan epoksi bağlayıcılı karbon elyaf ve bazalt elyaf katkıli kompozitlerin basınç dayanımı için 50*50*50 mm ebatlarında üretilen küp numunelerle tespit edilecektir. Numuneler üretimi tarihini izleyen 3, 7 ve 28 gün sonrası her karışımdan en az 3 numune üzerinde TS EN 12390-3 ve ASTM C109/C109M-20'ye göre basınç dayanımı testine tabi tutulacaktır. Deneylerde yükleme hızı sabit olarak 0,6 MPa/s olarak kullanılacaktır. Basınç dayanımı;

$$\sigma = F/A \quad (26)$$

σ : Basınç mukavemeti, MPa veya N/mm²,

F: Numuneye kırılmadan önce uygulanan maksimum yük, N,

A: Numuneye yük uygulanan yüzey alanı, mm²

İle hesaplanacaktır. Şekil 22'de Basınç dayanım testi cihazı yer almaktadır.



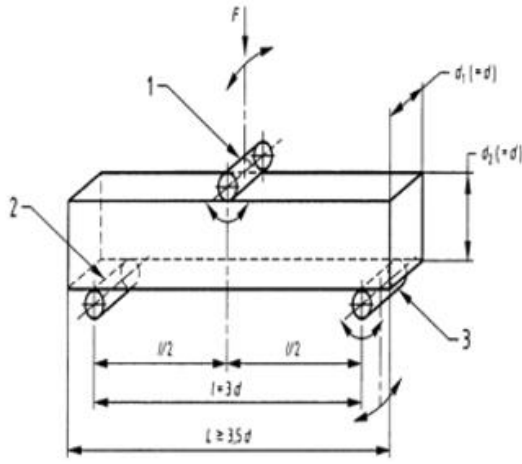
Şekil 22. Basınç dayanımı test cihazı

Eğilme Dayanımı Testi

Hazırlanan her karışım için 40x40x160 mm boyutlarında 3 adet kiriş numune üretilerek, TS EN 12390-5 (2010) standartlarına göre 3 noktalı yükleme sistemi ile ve yükleme hızı 50 N/s olarak test edilecektir. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2^2} \quad (27)$$

Burada, f_{cf} eğilme dayanımı (MPa), F en büyük yük (N), l mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm), d_1 ve d_2 numunenin en kesit boyutlarıdır (mm). Şekil 23'de eğilme dayanımı deney sistemi ve cihaz gösterimi verilmiştir.



Şekil 23. Eğilme dayanımı deney sistemi ve cihazı

Ultrason Darbe Hızı (UPV) testi

Ses dalgalarında titreşim frekansı 20 kHz'den fazla olan dalgalara ultrasonik dalgalar denir. Malzeme testinde kullanılan ultrasonik dalgalar piezo-elektrik özellik gösteren transdüserler yardımı ile elde edilir. Numunenin yüzeyinden gönderilen ultrasonik dalgalar numune içerisinde ilerlerken yolları üzerinde boşluklarla karşılaşılır. Bu dalgalar boşluk kenarlarına gelince karşı tarafa geçemeyeceğinden, boşluğun etrafından dolaşacaktır. Bu olayın çok fazla sayıda tekrarlanmasıyla ultrasonik dalgaların belirli bir nokta arasındaki yolunu arttıracaktır. Ultrason hızındaki azalma, malzemelerin boşluklu yapıda olduğunu göstermekte buna bağlı olarak da malzemenin dayanımı da azalmaktadır. Transdüserlerin temas ettikleri yüzeylere daha iyi temas edebilmeleri için yüzeylerin temiz, düzgün ve boşluksuz yapıda olmaları ve transdüserlerle numune yüzeyi arasında boşluk kalmayacak bir ultrason jel vb. malzeme katmanı kullanılması gerekir. Ultrasonik hız ölçümleri, laboratuvarımızda mevcut dijital ultrasonik hız ölçme aleti ile tespit edilmiştir. Ultrasonik hızların tespiti için direk ölçüm yöntemi kullanılacaktır. UPV cihazı gösterimi şekil 24'de verilmiştir.



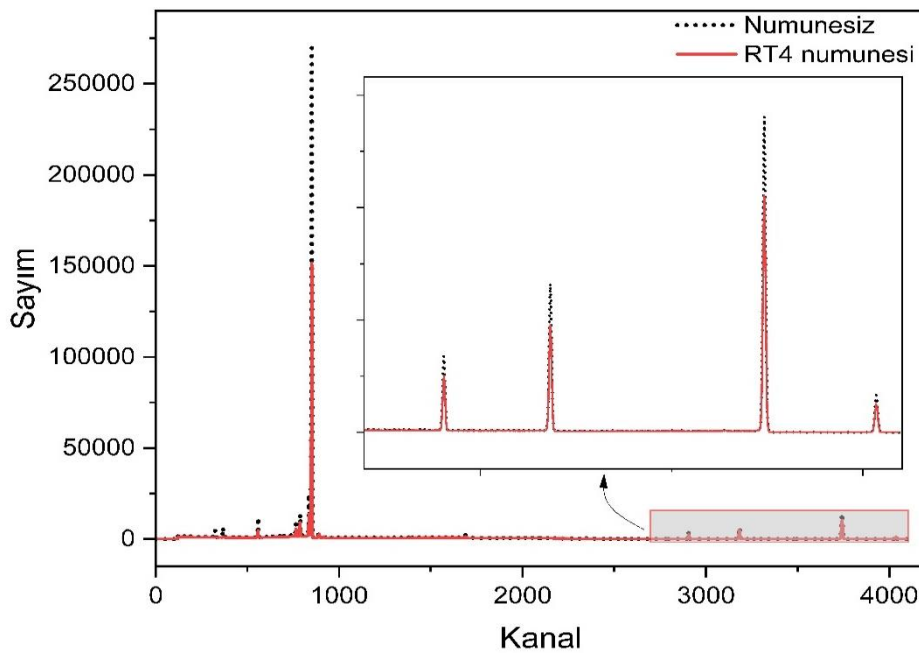
Şekil 24. UPV cihazı

ARAŞTIRMA BULGULARI

Gerçekleştirilen araştırma sonucunda elde edilen bulgular, bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri

Bu bölümde elde edilen MAC, Z_{eff} , N_{eff} , HVL ve MFP değerleri tablolar ve grafiksel eğilimler ışığında tartışılmıştır. Bu çalışmada, farklı oranlarda Sb_2O_3 , karbon elyaf ve bazalt elyaf içeren epoksi kompozitlerin kütle azaltma katsayısı (MAC), etkin atom numarası (Z_{eff}), etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}), yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerleri hem teorik (WinXCOM) hem de deneysel (HPGe dedektör sistemi) yöntemlerle belirlenmiştir. Ba-133 radyoaktif kaynak kullanılarak elde edilen deneysel ölçüm spektrumu Şekil 25'te gösterilmektedir. Elde edilen bulgular, katkı malzemesinin türü ve oranının radyasyon zırhlama performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Numuneler için Ba-133 radyoaktif kaynak kullanılmış ve 53,2–383,9 keV enerji aralığı için değerlendirmeler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Origin programı yardımıyla spektrumlara dönüştürülerek pik alanları hesaplanmıştır. İlk olarak numunelerin teorik ve deneysel MAC değerleri bulunmuştur. Numuneler için teorik MAC değerleri Tablo 7'de, deneysel MAC değerleri Tablo 8 de verilmiştir. Ayrıca teorik ve deneysel değerlerin bir arada yer aldığı veriler Şekil 26 de sunulmuştur.



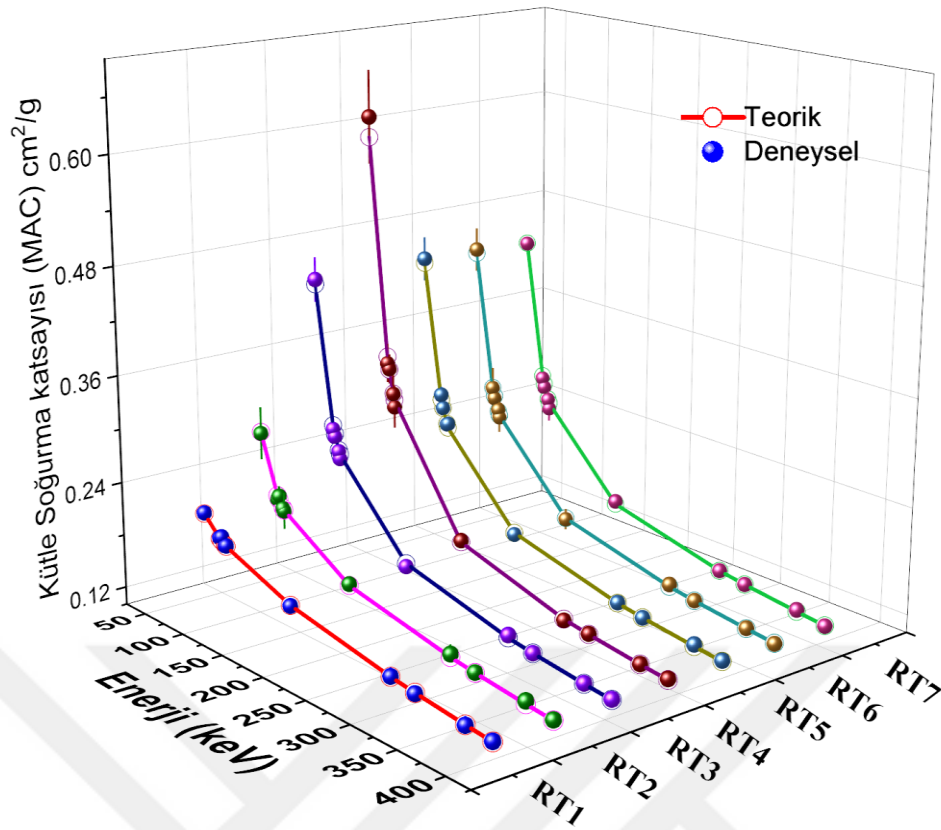
Şekil 25. Deneysel ölçüm spektrumu

Tablo 7. Kompozit Numunelerin Teorik MAC Değerleri (cm²/g)

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	0.199	0.277	0.432	0.587	0.432	0.432	0.432
72.8	0.178	0.211	0.276	0.342	0.276	0.276	0.276
75.0	0.177	0.207	0.267	0.327	0.267	0.267	0.267
79.6	0.174	0.199	0.250	0.301	0.250	0.250	0.250
81.0	0.173	0.197	0.245	0.294	0.245	0.245	0.245
160.6	0.141	0.145	0.151	0.158	0.151	0.151	0.151
276.4	0.118	0.118	0.120	0.121	0.119	0.119	0.119
302.9	0.114	0.114	0.115	0.116	0.115	0.115	0.115
356.0	0.107	0.107	0.108	0.108	0.108	0.108	0.108
383.9	0.104	0.104	0.104	0.105	0.104	0.104	0.104

Tablo 8. Kompozit Numunelerin Deneysel MAC Değerleri (cm²/g)

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	0.200	0.275	0.437	0.610	0.437	0.436	0.432
72.8	0.179	0.206	0.272	0.334	0.282	0.276	0.273
75.0	0.181	0.211	0.264	0.328	0.267	0.264	0.263
79.6	0.173	0.199	0.248	0.300	0.249	0.252	0.249
81.0	0.174	0.196	0.241	0.286	0.250	0.243	0.239
160.6	0.141	0.146	0.148	0.160	0.149	0.150	0.154
276.4	0.118	0.122	0.123	0.119	0.120	0.122	0.120
302.9	0.113	0.115	0.115	0.117	0.115	0.115	0.115
356.0	0.107	0.111	0.108	0.109	0.110	0.108	0.110
383.9	0.105	0.105	0.105	0.106	0.105	0.104	0.104



Şekil 26. Kompozit numuneler için kütle azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi

Elde edilen bulgular, incelenen enerji aralığında (53,2–383,9 keV) MAC değerlerinin genel olarak enerji arttıkça azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, foton-madde etkileşim mekanizmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Düşük enerjili fotonlar için fotoelektrik soğurma baskın etkileşim süreci olduğundan, düşük enerjilerde MAC değerleri yüksek çıkmaktadır. Özellikle 53,2 keV civarındaki değerlerin diğer enerji noktalarına kıyasla belirgin derecede yüksek olması, fotoelektrik etkinin güçlü katkısından kaynaklanmaktadır.

Enerji yükseldikçe fotoelektrik etkileşimin olasılığı hızlı bir şekilde azalırken, Compton saçılması giderek daha baskın hale gelir. Bu nedenle 72,8–160,6 keV aralığında MAC değerlerinde düzenli bir düşüş gözlenmiştir. Daha yüksek enerjilere çıkıldığında (276,4–383,9 keV), Compton saçılması temel etkileşim mekanizması haline geldiği için MAC değerlerindeki azalma eğilimi görece yavaşlamaktadır. İncelenen enerji aralığında çift oluşumu (pair production) mekanizması için gerekli eşik değerine ulaşılmadığından, bu sürecin katkısı göz ardı edilebilir.

Deneysel ve teorik değerlerin birbirine oldukça yakın çıkması (maksimum %3,85 fark) kullanılan yöntemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Özellikle düşük enerjilerdeki küçük sapmalar, deneysel koşullardan (dedektör çözünürlüğü, pik alanı tayininde istatistiksel hatalar, örnek homojenliği vb.) kaynaklanabilir. Yüksek enerjilerde ise teorik ve

deneysel sonuçların daha iyi örtüşmesi, Compton saçılmasının enerjinin artışıyla daha öngörülebilir hale gelmesiyle açıklanabilir.

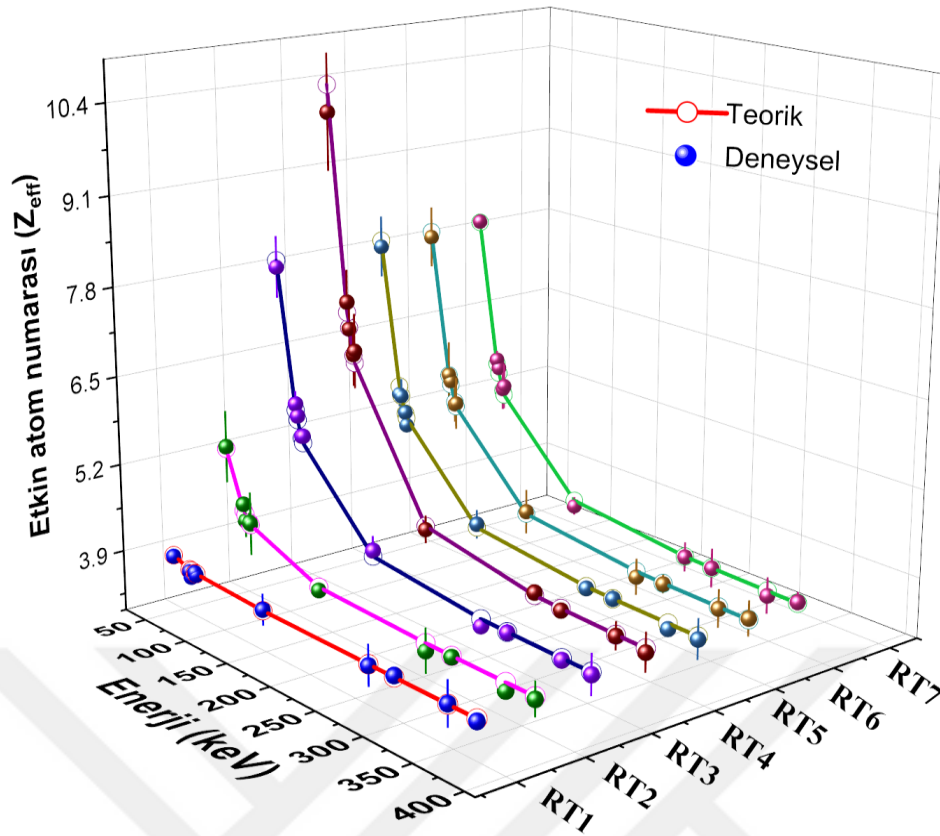
Bu bulgular, kompozit malzemelerdeki katkı maddesi oranının da önemli rol oynadığını göstermektedir. Yüksek atom numarasına (Z) sahip $Sb_2 O_3$ katkısı özellikle düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim üzerinden MAC değerlerini belirgin şekilde artırmaktadır. Buna karşılık, karbon elyaf ve bazalt katkılarında düşük atom numaralarına sahip olmasından kaynaklı olarak daha çok Compton saçılmasına etki ederek orta ve yüksek enerji bölgelerindeki davranışı şekillendirmektedir. Böylelikle, kompozitlerin içerik tasarımı sayesinde belirli enerji aralıklarında radyasyon zırhlama performansını optimize etmenin mümkün olduğu görülmektedir. Tablo 9, 10 ve Şekil 27 numunelerin etkin atom numaralarının enerjiye bağlı değişimini göstermektedir.

Tablo 9. Kompozit Numunelerin Teorik Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.892	5.296	7.937	10.376	7.947	7.942	7.951
72.8	3.793	4.466	5.791	7.090	5.798	5.795	5.800
75.0	3.787	4.414	5.652	6.870	5.659	5.656	5.661
79.6	3.777	4.321	5.401	6.471	5.407	5.405	5.410
81.0	3.774	4.296	5.334	6.364	5.340	5.337	5.342
160.6	3.722	3.836	4.069	4.309	4.073	4.072	4.075
276.4	3.714	3.764	3.866	3.972	3.870	3.869	3.871
302.9	3.713	3.758	3.851	3.947	3.854	3.853	3.855
356.0	3.711	3.751	3.831	3.915	3.835	3.834	3.836
383.9	3.711	3.748	3.825	3.904	3.829	3.828	3.830

Tablo 10. Kompozit Numunelerin Deneysel Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.876	5.326	7.839	9.976	7.856	7.863	7.963
72.8	3.769	4.561	5.882	7.245	5.678	5.802	5.865
75.0	3.694	4.328	5.713	6.851	5.654	5.712	5.745
79.6	3.789	4.328	5.432	6.483	5.423	5.364	5.429
81.0	3.756	4.312	5.436	6.541	5.235	5.386	5.481
160.6	3.737	3.792	4.155	4.258	4.122	4.105	3.988
276.4	3.697	3.654	3.765	4.012	3.846	3.787	3.863
302.9	3.736	3.741	3.841	3.921	3.854	3.841	3.852
356.0	3.720	3.632	3.806	3.898	3.758	3.811	3.769
383.9	3.682	3.715	3.794	3.851	3.790	3.845	3.846



Şekil 27. Kompozit numuneler için etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi

Kompozit numuneler için hem teorik hem de deneysel yöntemlerle belirlenen etkin atom numarası (Z_{eff}) değerleri, enerjinin artmasıyla birlikte genel olarak azalan bir eğilim göstermektedir. Bu eğilim, düşük enerjilerde keskin bir düşüş olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bu aralıkta fotoelektrik etkinin baskın olması ve fotoelektrik kesitin Z^{4-5}/E^{3-4} ile orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Orta ve yüksek enerjilerde ise Compton saçılmasının daha baskın hale gelmesiyle bu keskin azalma giderek daha yumuşak bir azalmaya yol açmıştır. Compton saçılmasının tesir kesiti Z ile orantılı olarak değişmektedir.

Düşük enerji bölgesinde (53,2 keV) en yüksek Z_{eff} değerine sahip numune teorik hesaplamalarda RT4 (10,376) iken deneysel sonuçlarda yine RT4 (9,976) olarak belirlenmiştir. Bu, RT4 numunesinin yüksek atom numaralı katkı maddesi ($Sb_2 O_3$) oranının fazla olduğunu ve düşük enerjili fotonların soğurulmasında etkin rol oynadığını göstermektedir. Aynı enerji seviyesinde en düşük Z_{eff} değeri hem teorik hem deneysel hesaplamalarda RT1 numunesine aittir (sırasıyla 3,892 ve 3,876). Bu durum, RT1'in düşük enerjilerde foton soğurma performansının diğer numunelere kıyasla daha zayıf olduğunu ortaya koymaktadır.

Orta enerji bölgesinde (72,8–160,6 keV) teorik ve deneysel değerler arasında yakın bir uyum gözlenmektedir. Örneğin, 160,6 keV'de teorik değerler RT4 için 4,309, RT1 için 3,722 iken; deneysel değerler RT4 için 4,258, RT1 için 3,737 bulunmuştur. Farkların %2–3 bandında kalması, deneysel yöntemlerin güvenilirliğini göstermektedir. Bu bölgede fotoelektrik

etkileşimin zayıflaması ve compton saçılma tesir kesiti Z doğru orantılı olmasından dolayı Compton saçılmasının baskın hale gelmesi nedeniyle Z_{eff} değerleri arasındaki farkların azaldığı dikkat çekmektedir.

Yüksek enerji bölgesinde (276,4–383,9 keV) tüm numunelerin Z_{eff} değerleri birbirine oldukça yakınsamaktadır. 383,9 keV’de teorik sonuçlar RT1 için 3,711, RT4 için 3,904; deneysel sonuçlar ise RT1 için 3,682, RT4 için 3,851 olarak bulunmuştur. Bu yakınsama, yüksek enerjilerde foton–madde etkileşiminde Compton saçılmasının baskınlığı ve atom numarasına olan bağımlılığın azalmasıyla açıklanabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde:

RT4 numunesi hem teorik hem deneysel sonuçlarda tüm enerji bölgelerinde en yüksek Z_{eff} değerlerine sahiptir. RT4 yüksek etkin atom numarası (Z_{eff}) ve kütle azaltma katsayısı (MAC), ortalama serbest yol (MFP) ve yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerinden düşük olmasından dolayı iyi zırhlama performansı gösterdiği tespit edilmiştir. RT1 numunesi tüm enerji aralıklarında en düşük Z_{eff} değerleri ile öne çıkmaktadır. Bu durum, RT1’in etkin atom numarası açısından diğer numunelere göre daha düşük performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Teorik ve deneysel sonuçlar arasında genel olarak iyi bir uyum bulunmakta, farklar çoğunlukla %1–4 aralığında kalmaktadır. Düşük enerjilerde görülen sapmalar, deneysel ölçüm hataları (dedektör çözünürlüğü, pik alanı tayinindeki istatistiksel belirsizlikler, örnek homojenliği vb.) ile açıklanabilir. Ayrıca deneysel verilerde elde edilen en büyük hata %8,87 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, etkin atom numarasının enerjiye bağlı değişimi hem teorik hem deneysel olarak benzer eğilimler göstermiş, düşük enerjilerde katkı malzemesinin türü ve oranı belirleyici olurken yüksek enerjilerde numuneler arasındaki farkların giderek azaldığı ortaya konmuştur. Bu bulgular, kompozit malzemelerin özellikle düşük enerjili gama fotonlarına karşı tasarımında yüksek- Z katkılarının kritik rol oynadığını doğrulamaktadır.

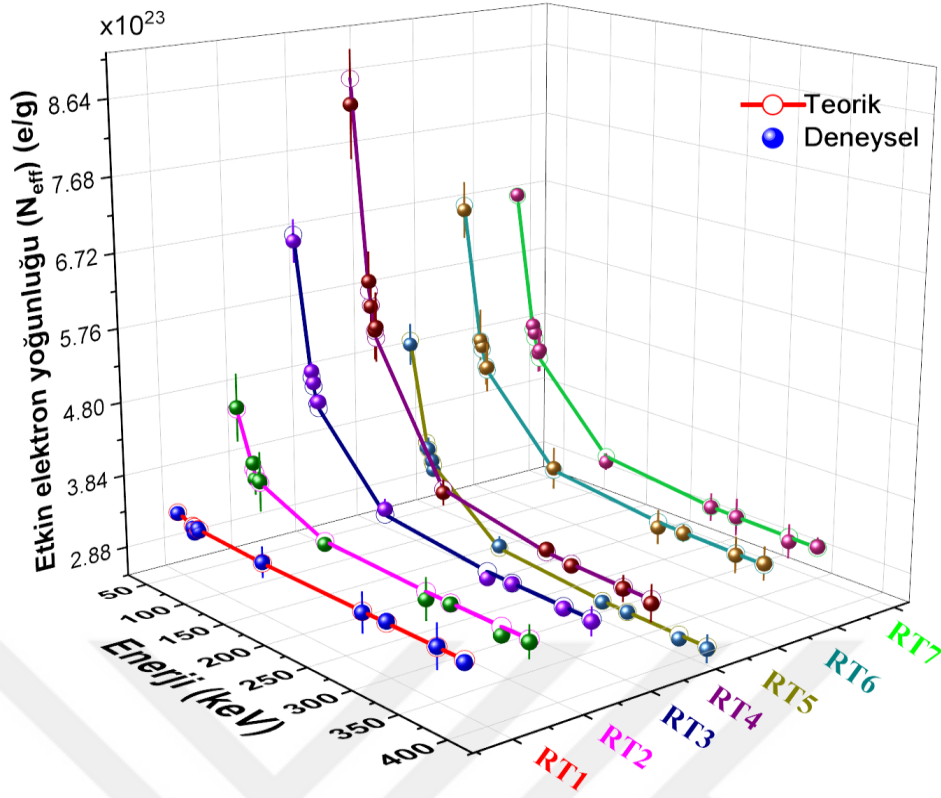
Tablo 11, 12 ve Şekil 28 Etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) enerjiye bağlı değişimini göstermektedir.

Tablo 11. Kompozit Numunelerin Teorik Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff}) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.379	4.557	6.709	8.611	4.989	6.707	6.711
72.8	3.293	3.843	4.894	5.884	3.640	4.894	4.896
75.0	3.288	3.798	4.777	5.702	3.552	4.776	4.778
79.6	3.279	3.718	4.565	5.371	3.395	4.564	4.566
81.0	3.277	3.697	4.508	5.282	3.352	4.507	4.509
160.6	3.232	3.301	3.439	3.576	2.557	3.439	3.439
276.4	3.224	3.239	3.268	3.296	2.429	3.267	3.267
302.9	3.223	3.234	3.255	3.275	2.420	3.254	3.254
356.0	3.222	3.228	3.239	3.249	2.408	3.238	3.238
383.9	3.222	3.225	3.233	3.240	2.404	3.232	3.232

Tablo 12. Kompozit Numunelerin Deneysel Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff}) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.365	4.583	6.626	8.279	4.932	6.640	6.721
72.8	3.272	3.925	4.972	6.013	3.565	4.900	4.950
75.0	3.207	3.724	4.829	5.686	3.550	4.824	4.849
79.6	3.290	3.724	4.591	5.380	3.405	4.530	4.582
81.0	3.261	3.711	4.595	5.429	3.286	4.548	4.626
160.6	3.244	3.263	3.512	3.534	2.588	3.467	3.366
276.4	3.210	3.144	3.182	3.330	2.414	3.198	3.261
302.9	3.244	3.219	3.247	3.254	2.420	3.244	3.251
356.0	3.230	3.125	3.217	3.235	2.359	3.218	3.181
383.9	3.197	3.197	3.207	3.196	2.379	3.247	3.246



Şekil 28. Kompozit numuneler için etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi

Numunelerin etkin elektron yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimini. Kompozit numunelerin etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}) değerleri, incelenen enerji aralığında (53,2–383,9 keV) genel olarak enerji arttıkça azalan bir eğilim göstermektedir. Bu durum, foton–madde etkileşim mekanizmalarının enerjiye bağlı değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Düşük enerjilerde fotoelektrik etkileşim baskın olduğu için malzemelerin atom numarası ve elektron yoğunluğu daha belirgin bir etki yaratmakta, yüksek enerjilere çıkıldığında ise Compton saçılması baskın hale gelmekte ve N_{eff} değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

Düşük enerjilerde teorik sonuçlarda en yüksek N_{eff} değeri RT4 (8.611) iken en düşük değer RT1 (3.379) olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarda da benzer şekilde RT4 8.279 ile en yüksek, RT1 3.365 ile en düşük değere sahiptir. Bu sonuç, RT4 numunesinde yüksek atom numaralı katkı maddelerinin (özellikle $Sb_2 O_3$) yoğunluk ve elektron sayısı açısından önemli katkı sağladığını, RT1'in ise görece daha düşük yoğunluk ve etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Orta enerjiler (72,8–160,6 keV) için hem teorik hem deneysel değerler düzenli şekilde azalmaktadır. Örneğin, 160,6 keV'de teorik N_{eff} RT4 için 3.576, RT1 için 3.232; deneysel değerler ise RT4 için 3.534, RT1 için 3.244 bulunmuştur. Değerler arasındaki farkın daralması, Compton saçılmasının baskın hale gelmesiyle atom numarasına bağımlılığın azalmasıyla uyumludur.

Yüksek enerjiler (276,4–383,9 keV) için tüm numuneler için N_{eff} değerleri birbirine oldukça yakınsamaktadır. 383,9 keV’de teorik değerler RT1 için 3.222, RT4 için 3.240; deneysel değerler RT1 için 3.197, RT4 için 3.196 olarak hesaplanmıştır. Burada dikkat çekici nokta, RT4’ün düşük enerjilerde en yüksek değere sahipken yüksek enerjilerde farkını kaybetmesi ve diğer numunelerle benzer değerlere ulaşmasıdır. Bu durum, yüksek enerjilerde Compton saçılmasının baskın olmasıyla açıklanabilir. Genel olarak etkin elektron yoğunluğu ve etkin atom numarası değerleri, denklem 2.8’de ki ilişkiden dolayı benzer sonuçlar göstermiştir.

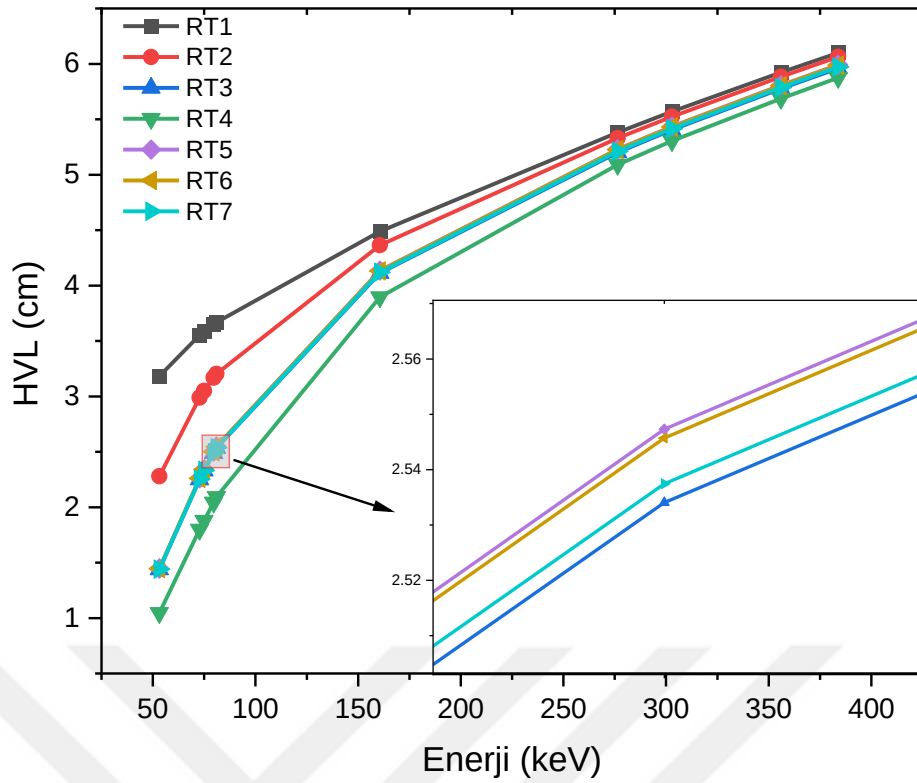
Numunelerin yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimini Tablo 13, 14 ve Şekil 29 göstermektedir.

Tablo 13. Kompozit Numunelerin Teorik Yarı Değer Kalınlığı (HVL) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.182	2.279	1.439	1.047	1.446	1.446	1.440
72.8	3.553	2.989	2.250	1.799	2.261	2.260	2.253
75.0	3.586	3.050	2.329	1.879	2.342	2.340	2.332
79.6	3.650	3.169	2.488	2.043	2.501	2.499	2.491
81.0	3.669	3.203	2.534	2.092	2.547	2.546	2.537
160.6	4.487	4.364	4.113	3.895	4.136	4.132	4.120
276.4	5.382	5.330	5.202	5.092	5.231	5.226	5.212
302.9	5.570	5.524	5.405	5.304	5.435	5.430	5.415
356.0	5.922	5.883	5.776	5.687	5.808	5.803	5.787
383.9	6.100	6.064	5.960	5.875	5.993	5.988	5.972

Tablo 14. Kompozit numunelerin deneysel yarı değer kalınlığı (HVL) değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	3.195	2.266	1.457	1.087	1.463	1.460	1.438
72.8	3.576	2.926	2.214	1.759	2.308	2.257	2.227
75.0	3.674	3.110	2.304	1.885	2.343	2.317	2.298
79.6	3.638	3.164	2.474	2.040	2.494	2.518	2.482
81.0	3.687	3.191	2.485	2.034	2.597	2.523	2.472
160.6	4.470	4.415	4.026	3.941	4.086	4.099	4.208
276.4	5.406	5.486	5.338	5.040	5.263	5.336	5.222
302.9	5.534	5.549	5.419	5.339	5.436	5.448	5.420
356.0	5.908	6.069	5.814	5.712	5.925	5.838	5.889
383.9	6.148	6.117	6.008	5.955	6.054	5.961	5.946



Şekil 29. Kompozit numuneler için yarı değer kalınlığının enerjiye bağlı değişimi

Kompozit numunelerin HVL değerleri, foton enerjisinin artışıyla birlikte üstel olarak yükselmiştir. Bu durum, artan enerjiye sahip fotonların malzeme içinden daha kolay geçebilmesi nedeniyle lineer azaltma katsayısındaki düşüşten dolayı daha kalın tabakalara ihtiyaç duyulmasına bağlanabilir.

Düşük enerjilerde (53,2–81,0 keV) numuneler arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Örneğin, 53,2 keV’de RT4 numunesi teorik olarak 1,047 cm, deneysel olarak 1,087 cm HVL ile en düşük değere sahip olmuş; bu da RT4’ün ince bir tabaka ile bile gama ışınlarını zayıflatmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşın RT1 numunesi, hem teorik (3,182 cm) hem deneysel (3,195 cm) hesaplamalarda en yüksek HVL değerine sahiptir. Bu sonuç, RT1’in aynı enerjide radyasyonu azaltmak için daha kalın tabakalara ihtiyaç duyduğunu ve zırhlama etkinliğinin diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Orta enerjilerde (160,6 keV civarı) farklılıkların azaldığı ve numunelerin birbirine daha yakın değerler sergilediği görülmektedir. Örneğin RT4 için HVL değerleri teorik olarak 3,895 cm, deneysel olarak 3,941 cm iken; RT1 için sırasıyla 4,487 cm ve 4,470 cm olarak bulunmuştur. Buradaki farklar düşük enerjiye kıyasla çok daha sınırlıdır, bu da Compton saçılmasının baskın hale gelmesiyle numuneler arasındaki atom numarası farklarının etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Yüksek enerjilerde (276,4–383,9 keV) tüm numuneler için HVL değerlerinin 5–6 cm civarında yakınsadığı dikkat çekmektedir. Örneğin 383,9 keV’de RT4 için 5,875 cm (teorik) ve 5,955 cm (deneysel), RT1 için 6,100 cm (teorik) ve 6,148 cm (deneysel) olarak bulunmuştur. Bu bölgede farklı numunelerin zırhlama performansları arasındaki fark minimum düzeye inmiştir. Bunun nedeni yüksek enerjilerde MAC değerlerindeki azalmaya bağlı olarak HVL değerlerinde artışa neden olmuştur.

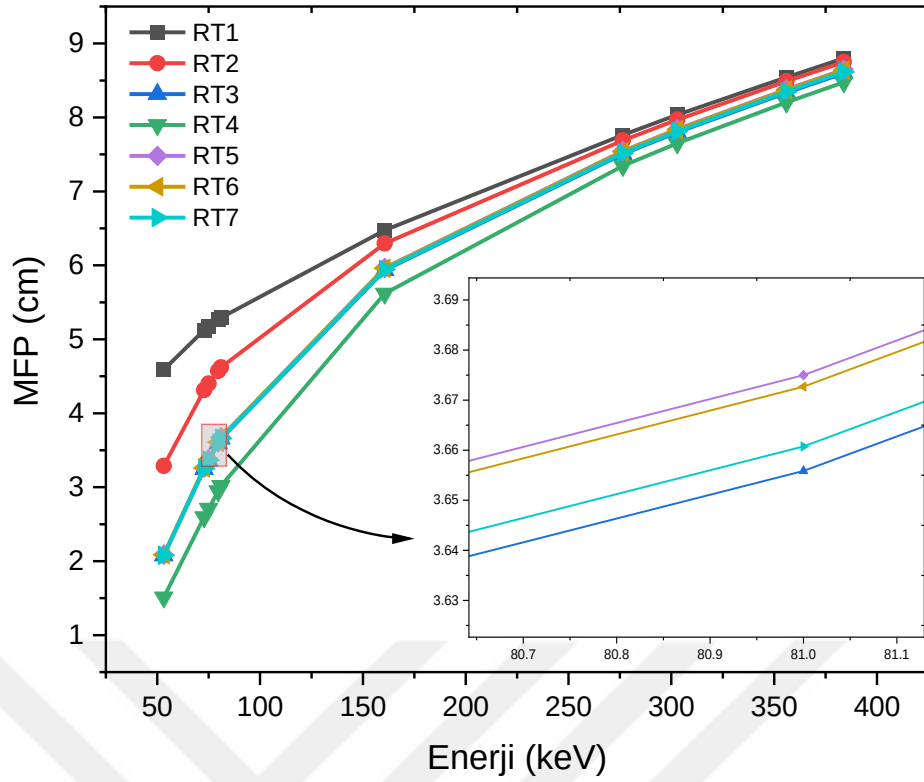
Genel değerlendirme yapıldığında; RT4 numunesi düşük enerji aralıklarında en düşük HVL değerine sahip olarak en güçlü zırhlama yeteneğini göstermiştir. RT1 numunesi ise tüm enerji bölgelerinde en yüksek HVL değerlerine sahip olup, radyasyon geçirgenliğinin en fazla olduğu numune olarak öne çıkmaktadır. Enerji arttıkça numuneler arasındaki farklar azalmış ve HVL değerleri birbirine oldukça yaklaşmıştır.

Tablo 15. Kompozit Numunelerin Teorik Ortalama Serbest Yol (MFP) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	4.591	3.288	2.076	1.510	2.087	2.086	2.078
72.8	5.126	4.313	3.246	2.595	3.263	3.261	3.250
75.0	5.173	4.401	3.361	2.711	3.378	3.376	3.365
79.6	5.266	4.572	3.589	2.948	3.608	3.606	3.594
81.0	5.293	4.621	3.656	3.018	3.675	3.673	3.661
160.6	6.474	6.297	5.934	5.619	5.966	5.961	5.945
276.4	7.764	7.690	7.505	7.346	7.546	7.540	7.519
302.9	8.035	7.969	7.798	7.652	7.841	7.834	7.813
356.0	8.544	8.488	8.333	8.204	8.379	8.372	8.349
383.9	8.800	8.748	8.599	8.476	8.646	8.639	8.615

Tablo 16. Kompozit Numunelerin Deneysel Ortalama Serbest Yol (MFP) Değerleri

Enerji (keV)	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7
53.2	4.609	3.270	2.102	1.568	2.111	2.107	2.075
72.8	5.159	4.221	3.195	2.538	3.330	3.257	3.214
75.0	5.300	4.486	3.324	2.719	3.381	3.343	3.315
79.6	5.249	4.564	3.569	2.943	3.598	3.633	3.581
81.0	5.319	4.604	3.586	2.934	3.747	3.639	3.566
160.6	6.448	6.369	5.809	5.685	5.895	5.913	6.071
276.4	7.799	7.914	7.701	7.271	7.593	7.699	7.534
302.9	7.985	8.005	7.817	7.702	7.842	7.859	7.820
356.0	8.524	8.756	8.388	8.240	8.548	8.422	8.495
383.9	8.869	8.826	8.668	8.591	8.733	8.599	8.578



Şekil 30. Kompozit numuneler için ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimi

Tablo 15, 16 ve Şekil 30 numunelerin ortalama serbest yolun enerjiye bağlı değişimini göstermektedir. Ortalama serbest yol, fotonların malzeme içinde herhangi bir etkileşime uğramadan kat edebildiği ortalama mesafeyi ifade etmektedir. Bu parametrenin yüksek olması malzemenin radyasyon zayıflatma kapasitesinin düşük olduğuna, düşük olması ise etkin bir zırhlama özelliğine işaret eder. Enerjiye bağlı değişim incelendiğinde MFP değerlerinin enerji arttıkça sürekli yükseldiği görülmektedir. Düşük enerjilerde fotonların malzemede daha kolay soğurulması nedeniyle serbest yol kısalmış, yüksek enerjilerde ise fotonların maddeyle etkileşim olasılığı azaldığından serbest yol uzamıştır.

Ortalama serbest yol (MFP) sonuçları da HVL ile uyumlu şekilde enerjiyle artış göstermiştir. Düşük enerjiler (53,2 keV); Teorik sonuçlarda en kısa serbest yol RT4 (1,510 cm) iken en uzun değer RT1 (4,591 cm) olarak hesaplanmıştır. Deneysel ölçümlerde de aynı eğilim korunmuş, RT4 1,568 cm, RT1 ise 4,609 cm bulunmuştur. Bu sonuç, RT4 numunesinin düşük enerjili gama ışınlarını daha etkili biçimde soğurduğunu, RT1'in ise daha geçirgen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Orta enerjiler (72,8–160,6 keV); Bu bölgede MFP değerleri artış göstermiş ancak numuneler arasındaki farklar kısmen azalmıştır. Örneğin, 160,6 keV'de RT4 için değerler teorik 5,619 cm, deneysel 5,685 cm iken RT1 için sırasıyla 6,474 cm ve 6,448 cm'dir. Bu durum, orta enerjilerde farklı katkı oranlarının etkisinin devam ettiğini fakat düşük enerjilere kıyasla daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Yüksek enerjiler (276,4–383,9 keV); MFP değerleri bu aralıkta 7–9 cm düzeyine ulaşarak birbirine oldukça yaklaşmıştır. 383,9

keV’de RT4 için değerler teorik 8,476 cm, deneysel 8,591 cm; RT1 için teorik 8,800 cm, deneysel 8,869 cm olarak bulunmuştur. Bu yakınsama, yüksek enerjilerde fotonların madde ile daha az etkileşmesi nedeniyle katkı maddelerinin etkisinin giderek azaldığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde:

Düşük enerjilerde foton–madde etkileşiminde fotoelektrik olay baskın olmuş, bu nedenle katkı malzemesi oranı (özellikle $Sb_2 O_3$ içeriği) performansı doğrudan etkilemiştir. Orta ve yüksek enerjilerde Compton saçılmasının hâkimiyetiyle parametreler arasındaki farklar azalmış ve tüm numuneler benzer davranış sergilemiştir. RT4 numunesi tüm parametreler açısından en iyi zırhlama performansını göstermiş; RT1 ise en zayıf sonuçlara sahip olmuştur. Sonuç olarak, kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama kapasiteleri hem foton enerjisine hem de katkı bileşimine duyarlıdır. Özellikle düşük enerjili gama ışınlarına karşı korunmada yüksek-Z katkılarının kritik öneme sahip olduğu, yüksek enerjilerde ise malzeme seçiminin görece daha az belirleyici olduğu görülmüştür. Bu bulgular, radyasyon güvenliği uygulamalarında malzeme tasarımı ve optimizasyonu için yol gösterici niteliktedir.

Mekanik Test Sonuçları

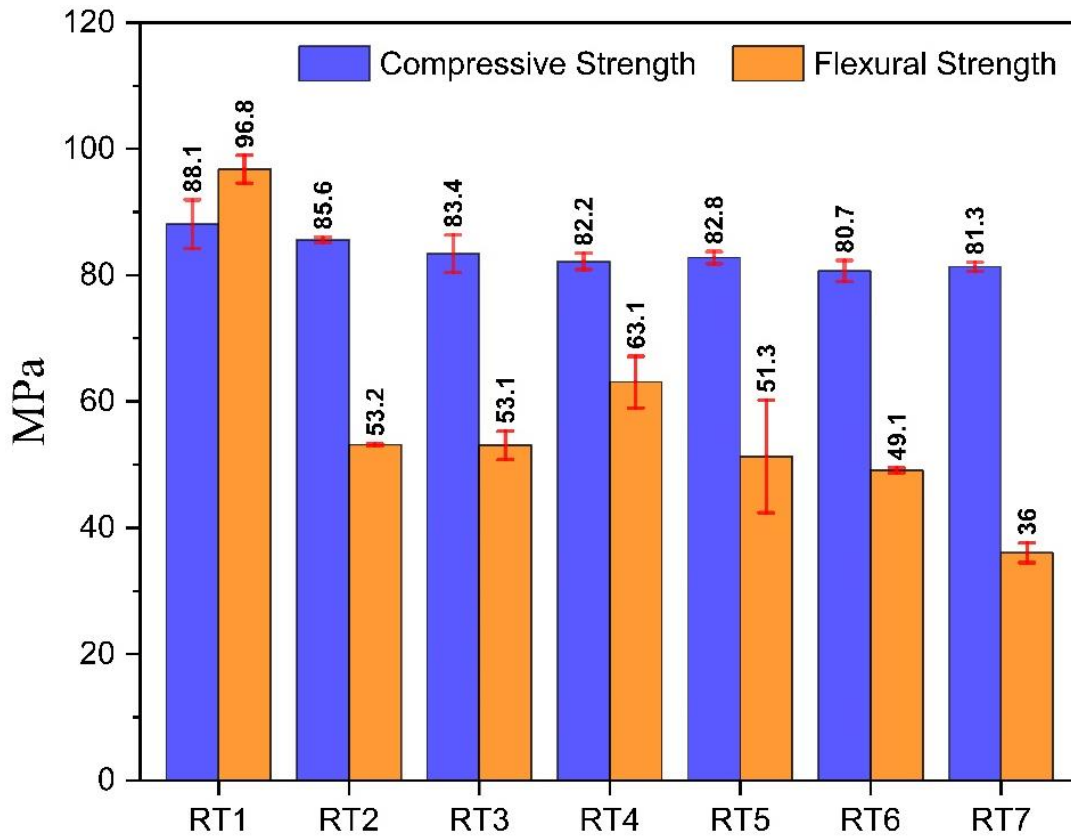
Çalışmada oluşturulan kompozit numuneler için basınç dayanımları ve eğilme dayanımları her bir numune grubu için 3 ayrı numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Atatürk üniversitesi mühendislik fakültesi inşaat bölümü laboratuvarında alınmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları sonuçları Tablo 17 de verilmiştir. Numunelere ait basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde değerlerin 79,22 MPa ile 92,79 MPa arasında değiştiği, ortalama dayanım değerlerinin ise 80,7 MPa ile 88,1 MPa aralığında olduğu görülmektedir. En yüksek ortalama basınç dayanımı PRT1 grubunda (88,1 MPa) elde edilmiştir ve bu grubun özellikle PRT1-1 numunesi 92,79 MPa ile tüm ölçümler arasında en yüksek değeri göstermiştir bunun nedeni saf epoksi içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, PRT1 grubundaki tekrarlar gözlenen farklılıklar homojenlik açısından sınırlı bir dengesizliği işaret etmektedir. PRT2 grubu (85,6 MPa) ortalama dayanım açısından ikinci sırada yer almakta ve tekrarlar arasındaki sapmaların düşük olmasıyla oldukça kararlı bir yapı sergilemektedir. PRT3, PRT4 ve PRT5 grupları (82–83 MPa bandında) birbirine yakın dayanım değerleri sunmuş, orta düzeyde fakat tutarlı sonuçlar vermiştir. PRT6 grubu (80,7 MPa) en düşük ortalama basınç dayanımına sahip olup özellikle PRT6-2 numunesinde 78,7 MPa ile en düşük bireysel değer kaydedilmiştir, bu durum serideki zayıf nokta olarak dikkat çekmektedir. PRT7 grubu (81,3 MPa) ise dayanım açısından PRT6’dan biraz daha yüksek olmakla birlikte tekrarlardaki tutarlılığıyla öne çıkmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, PRT1 grubu

yüksek mukavemet özellikleriyle ön plana çıkarken, PRT2 ve PRT7 grupları homojenlik ve kararlılık açısından daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, malzeme bileşimi ve üretim parametrelerinin basınç dayanımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve performans farklılıklarını belirgin şekilde ortaya çıkardığını göstermektedir.

Tablo 17 ve Şekil 31 da Kompozit numunelere ait basınç ve eğilme dayanımı sonuçları ile beraber bir görseli sunulmuştur.

Tablo 17. Kompozit Numunelere Ait Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

	Basınç Dayanımı (Mpa)	Ortalama	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Ortalama
PRT1-1	92.79		99.91	
PRT1-2	83.33	88.1±3.9	94.95	96.8±2.2
PRT1-3	88.05		95.52	
PRT2-1	85.16		53.12	
PRT2-2	85.43	85.6±0.5	53.38	53.2±0.2
PRT2-3	86.24		52.98	
PRT3-1	84.86		54.65	
PRT3-2	79.22	83.4±3.0	49.86	53.1±2.3
PRT3-3	86.09		54.65	
PRT4-1	80.5		68.87	
PRT4-2	82.41	82.2±1.3	60.25	63.1±4.1
PRT4-3	83.65		60.1	
PRT5-1	81.69		63.88	
PRT5-2	82.64	82.8±1.0	44.16	51.3±8.9
PRT5-3	84.05		45.87	
PRT6-1	80.44		48.86	
PRT6-2	78.7	80.7±1.7	48.79	49.1±0.4
PRT6-3	82.84		49.67	
PRT7-1	81.08		33.81	
PRT7-2	80.64	81.3±0.7	37.11	36.0±1.6
PRT7-3	82.32		37.18	



Şekil 31. Kompozit numuneler için basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

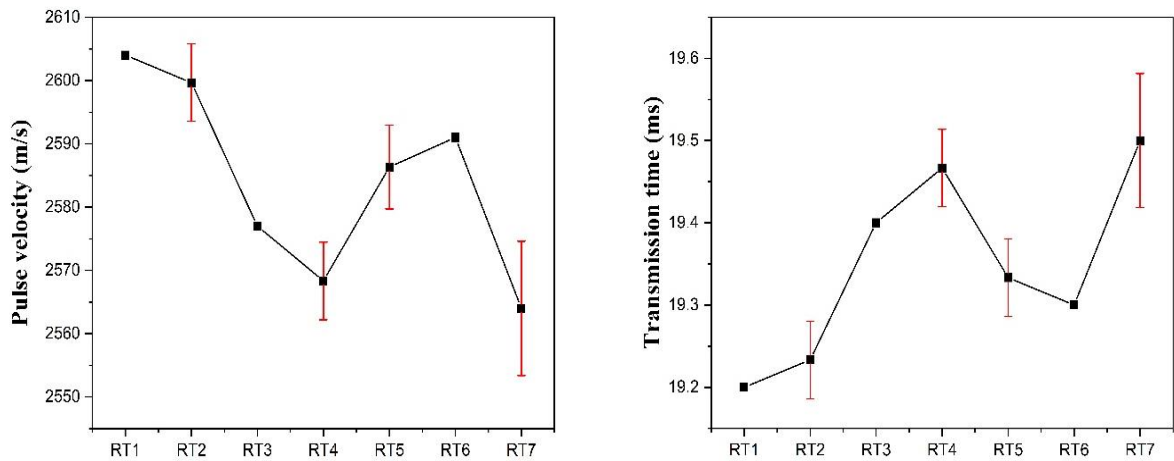
Kompozitlerin bileşimleri dikkate alındığında, katkısız RT1 (100% epoksi) grubunun basınç altında en yüksek ortalama dayanımı ($\approx 88,1$ MPa) verdiği; buna karşın $Sb_2 O_3$ ilavesinin (RT2→RT4) oran arttıkça basınç dayanımını kademeli biçimde düşürdüğü ($\approx 85,6 \rightarrow 82,2$ MPa) görülmüştür. Bu düşüş, partikül–matris ara yüzey bağlarının sınırlı dayanımı ve artan partikül içeriğine bağlı mikro boşluk/topaklanma ihtimaliyle ilişkilendirilebilir. Hibrit katkıları (RT5: %3 $Sb_2 O_3$ + %0,1 C + %0,1 bazalt; RT6: %3 $Sb_2 O_3$ + %0,2 C; RT7: %3 $Sb_2 O_3$ + %0,2 bazalt) basınç dayanımını belirgin biçimde artırmamıştır. RT6’da karbon elyaf oranının artmasıyla ortalama $\approx 80,7$ MPa ile en düşük değer elde edilmiştir, bu da fazla karbonun ara yüzeyi zayıflatıp gözenekliliği artırabildiğini düşündürmüştür. RT7’de bazaltın %0,2 düzeyindeki katkısı yük aktarımına sınırlı bir katkı sunarak $\approx 81,3$ MPa’a çıkarmış ancak saf epoksinin gerisinde kalmıştır.

Eğilme dayanımı incelendiğinde saf epoksi numunesi (PRT1) 96.8 MPa ile en yüksek değeri göstermiştir. Ancak $Sb_2 O_3$ katkısı %1–3 seviyelerinde bu değer hızlı bir düşüşle 53–54 MPa aralığına gerilemiştir. %5 katkıda eğilme dayanımı kısmen yükselerek 63.1 MPa seviyesine çıkmıştır. Karbon elyaf ve bazalt elyaf katkısı yapılan PRT5, PRT6 ve PRT7 numunelerinde ise eğilme dayanımı daha da düşerek sırasıyla 51.3 MPa, 49.1 MPa ve 36.0 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle eğilme dayanımı açısından katkı malzemelerinin matris sürekliliğini bozarak mekanik performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Tablo 18 ve Şekil 32’de Kompozit numunelere ait iletim süresi ve darbe hızı değerleri hata payları ile beraber bir görseli sunulmuştur.

Tablo 18. Kompozit Numunelere Ait İletim Süresi ve Darbe Hızı Sonuçları

	İletim süresi (ms)	Ortalama	Darbe hızı (m/s)	Ortalama
PRT1-1	19.2		2604	
PRT1-2	19.2	19.20±0.00	2604	2604.00±0.00
PRT1-3	19.2		2604	
PRT2-1	19.2		2604	
PRT2-2	19.2	19.23±0.05	2604	2599.67±6.13
PRT2-3	19.3		2591	
PRT3-1	19.4		2577	
PRT3-2	19.4	19.40±0.00	2577	2577.00±0.00
PRT3-3	19.4		2577	
PRT4-1	19.4		2577	
PRT4-2	19.5	19.47±0.05	2564	2568.33±6.13
PRT4-3	19.5		2564	
PRT5-1	19.3		2591	
PRT5-2	19.3	19.33±0.05	2591	2586.33±6.60
PRT5-3	19.4		2577	
PRT6-1	19.3		2591	
PRT6-2	19.3	19.30±0.00	2591	2591.00±0.00
PRT6-3	19.3		2591	
PRT7-1	19.6		2551	
PRT7-2	19.5	19.50±0.08	2564	2564.00±10.61
PRT7-3	19.4		2577	



Şekil 32. Kompozit numuneler için iletim süresi ve darbe hızı değerleri

Kompozit numunelerde darbe hızı değerleri 2604 m/s ile 2551 m/s arasında değişmektedir. Saf epoksi (PRT1) 2604 m/s ile en yüksek darbe hızına sahip olurken, en düşük değer 2551 m/s ile PRT7 numunesinde elde edilmiştir. Darbe hızı, malzemenin ani yükler karşısında enerjiyi iletme kapasitesini göstermesi açısından önemli bir parametredir. Bu bağlamda PRT1 numunesi, matris sürekliliğinin bozulmadığı ve katkı malzemesi içermediği için en iyi sonuçları vermiştir.

$Sb_2 O_3$ katkısı yapıldığında (PRT2–PRT4) darbe hızında kademeli bir düşüş gözlenmiştir. Örneğin, %1 $Sb_2 O_3$ içeren PRT2 numunesi 2599.7 m/s değerine sahipken, %5 $Sb_2 O_3$ içeren PRT4 numunesinde bu değer 2568.3 m/s'ye kadar gerilemiştir. Bu durum, artan $Sb_2 O_3$ oranının matris yapısını sertleştirmesine rağmen enerji iletim yollarında süreksizliklere yol açarak darbe hızını olumsuz etkilediğini göstermiştir. Karbon elyaf ve bazalt katkılarının birlikte veya ayrı ayrı kullanımı farklı etkiler yaratmıştır. PRT5 numunesi ($Sb_2 O_3$ + karbon elyaf + bazalt) 2586.3 m/s ile saf $Sb_2 O_3$ katkılı numunelere göre daha yüksek darbe hızı göstermiştir. Benzer şekilde, yalnızca karbon elyaf katkısı içeren PRT6 numunesi 2591 m/s ile en iyi sonuçlardan birini vermiştir. Bu durum, karbon elyafın matris içinde yük transferine katkıda bulunarak darbe hızını iyileştirdiğini göstermektedir. Buna karşın yalnızca bazalt katkısı içeren PRT7 numunesinde darbe hızı 2564 m/s ile en düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu sonuç, bazaltın epoksi matrisle yeterince güçlü bir bağ kuramaması nedeniyle enerji iletim yollarında süreksizliklere yol açtığını düşündürmektedir.

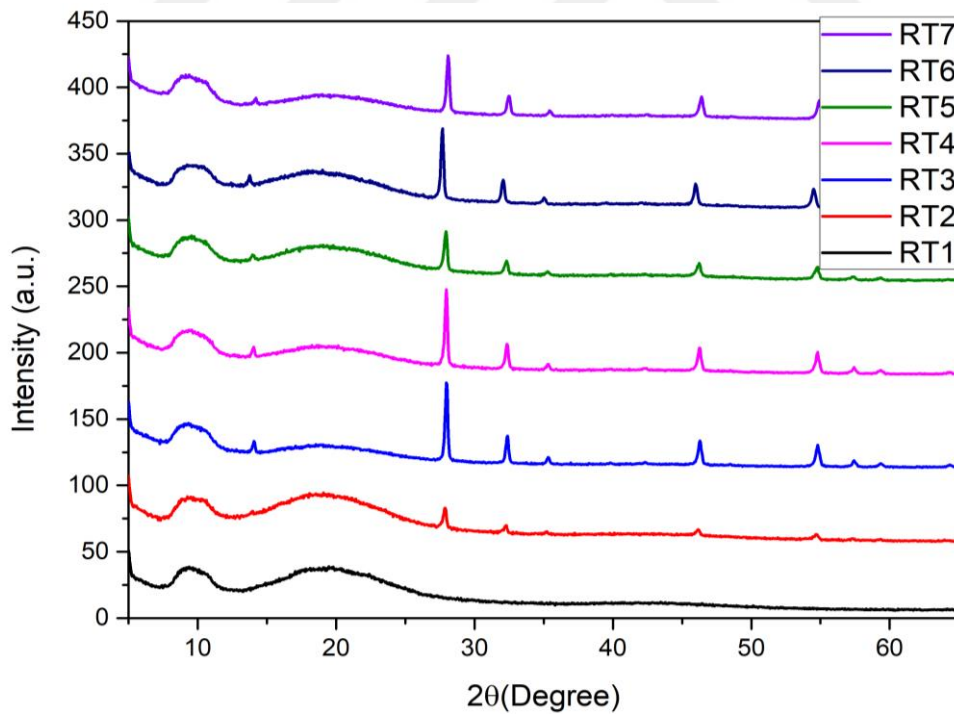
Tablo 18 de kompozit numunelere ait iletim süresi değerleri 19.2–19.6 ms aralığında değiştiği görülmektedir. Saf epoksi (PRT1) numunesi 19.20 ms ile en kısa iletim süresine sahiptir. Bu sonuç, katkı malzemesi bulunmayan epoksi matrisin enerji iletiminde daha hızlı davrandığını ve süreksizlikten kaynaklı gecikmelerin minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. $Sb_2 O_3$ katkısı yapıldığında iletim sürelerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. PRT2 (%1 $Sb_2 O_3$) 19.23 ms, PRT3 (%3 $Sb_2 O_3$) 19.40 ms ve PRT4 (%5 $Sb_2 O_3$) 19.47 ms değerlerine sahiptir. Bu eğilim, artan katkı oranının matris sürekliliğini bozarak enerji transferi yollarını uzattığını ve dolayısıyla iletim süresini artırdığını göstermektedir. Özellikle %5 $Sb_2 O_3$ katkılı PRT4 numunesinde saf epoksiye kıyasla yaklaşık %1.4'lük bir artış meydana gelmiştir.

Karbon elyaf katkısının tek başına bulunduğu PRT6 numunesinde iletim süresi 19.30 ms olarak ölçülmüş ve %3 $Sb_2 O_3$ katkılı PRT3'e kıyasla daha düşük kalmıştır. Bu sonuç, karbon elyaf katkısının matris içinde enerji iletimini kolaylaştırıcı bir rol üstlenmiş olabileceğini göstermektedir. Buna karşın bazalt katkısının tek başına bulunduğu PRT7 numunesinde iletim süresi 19.50 ms ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, bazaltın epoksi

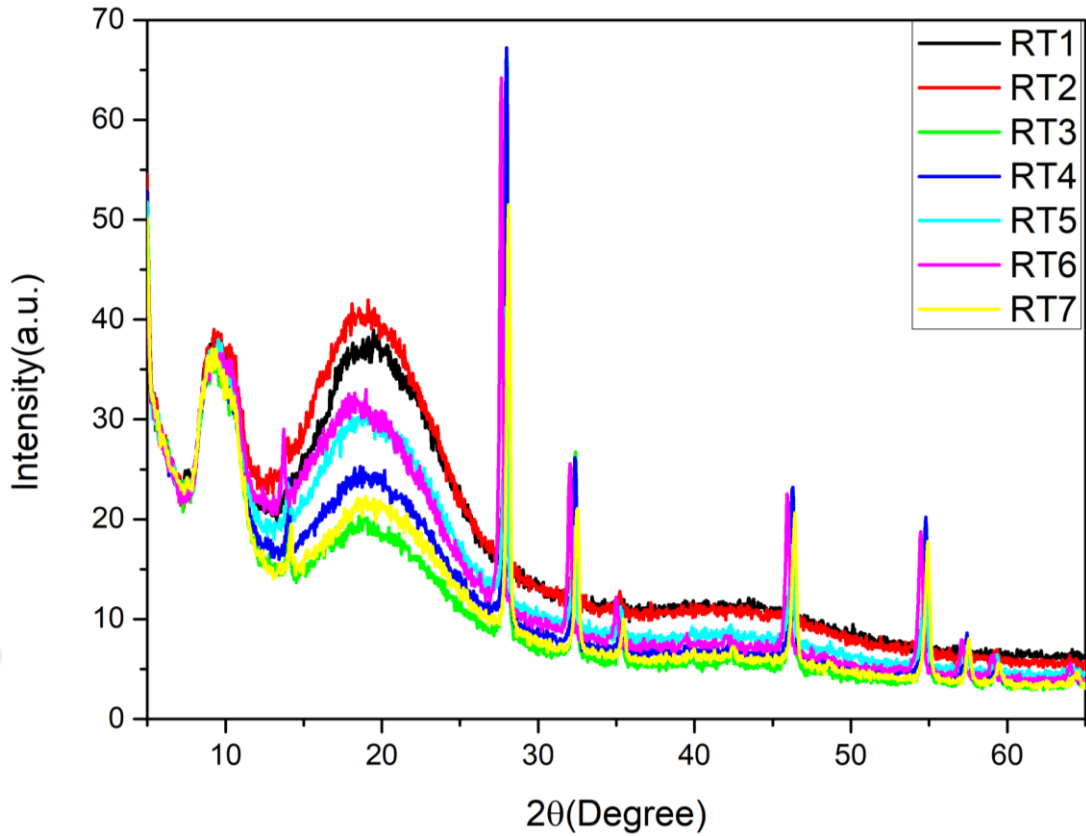
matrisle zayıf ara yüzey bağlanması nedeniyle enerji transferini yavaşlattığını ortaya koymaktadır. Karbon elyaf ve bazaltın birlikte bulunduğu PRT5 numunesinde ise iletim süresi 19.33 ms olup, yalnızca Sb_2O_3 katkısı içeren numunelere kıyasla daha düşük bir değer vermiştir. Bu sonuç, karbon elyafın enerji transferini hızlandırıcı etkisinin, bazaltın olumsuz etkisini kısmen dengelediğini göstermektedir.

X-ışını Difraksiyonu (XRD), Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin kristal yapısı, θ -2 θ Bragg Brentana konfigürasyonunda (CuK α ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) bir X-ışını difraktometresi kullanılarak XRD ile analiz edildi. 5° ile 65° arasında bir 2θ açısı aralığında gerçekleştirilen RT1, RT2, RT3, RT4, RT5, RT6 ve RT7 yapı örnekleri için X-ışını kırınımı analizinin sonuçları Şekil 32 ve 33 de sunulmuştur. Referans Kodu 00 005 0534'e göre, yaklaşık $27,97^\circ$, $32,42^\circ$, $46,26^\circ$ ve $54,79^\circ$ 'de gözlenen belirgin pikler sırasıyla (222), (400), (440) ve (622) kristal düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu desenler, a, b ve c uzunluklarının 11,15 Å (Zheng *et al.* 2025; Bai *et al.* 2025). Ayrıca, tüm yapıların XRD desenlerinde gözlenen $9,23^\circ$ ve $19,22^\circ$ derecelerdeki iki belirgin tepe, 00-008-0594 koduyla referans alınan cis-9,10-epoksioktadekanol yapısına atfedilmektedir.



Şekil 33. Kompozit numuneler için XRD deseni



Şekil 34. Kompozit numuneler için XRD deseni

Kompozit numuneler için Şekil 33 ve Şekil 34 te yer alan X-ışını kırınımı (XRD) desenleri aynı eksen boyunca ve tutarlı koşullar altında analiz edildiğinde, tepe yoğunlukları ve bu kırınım desenlerinin ortaya çıktığı açılar kısmen yorumlanabilir. XRD kırınım deseninin ve kompozit bileşimini özetleyen Tablo 1'in daha yakından incelenmesi, RT1 yapısının yalnızca epoksiden oluştuğunu ve cis-9,10-epoksioktadekanol yapısına atfedilen iki geniş tepeye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, yapının muhtemelen nanopartiküllere veya amorf malzemelere benzediğini düşündürmektedir.

RT2 yapısında, nispeten düşük antimon miktarı, tepelerinin daha düşük yoğunluğuna katkıda bulunmuş olabilir. Antimon miktarları RT3, RT5, RT6 ve RT7 yapıları arasında tutarlıdır. RT3 ve RT5 yapılarının merkezi tepe noktası referans olarak kullanıldığında, RT6 tepe noktasının daha küçük açılara kaydığı görülmektedir. Bu, nispeten yüksek karbon elyaf içeriğinin kristal tane boyutundaki artışla ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, RT7 tepe noktası daha büyük açılara kaymıştır ve bu da kristal boyutunun artan bazalt içeriği nedeniyle azaldığını göstermektedir. Karbon elyaf ve bazalt elyaf varlığının zıt etkileri, RT3 ve RT5 yapılarında neredeyse aynı özelliklere sahip tepe noktalarının oluşmasına yol açmıştır.

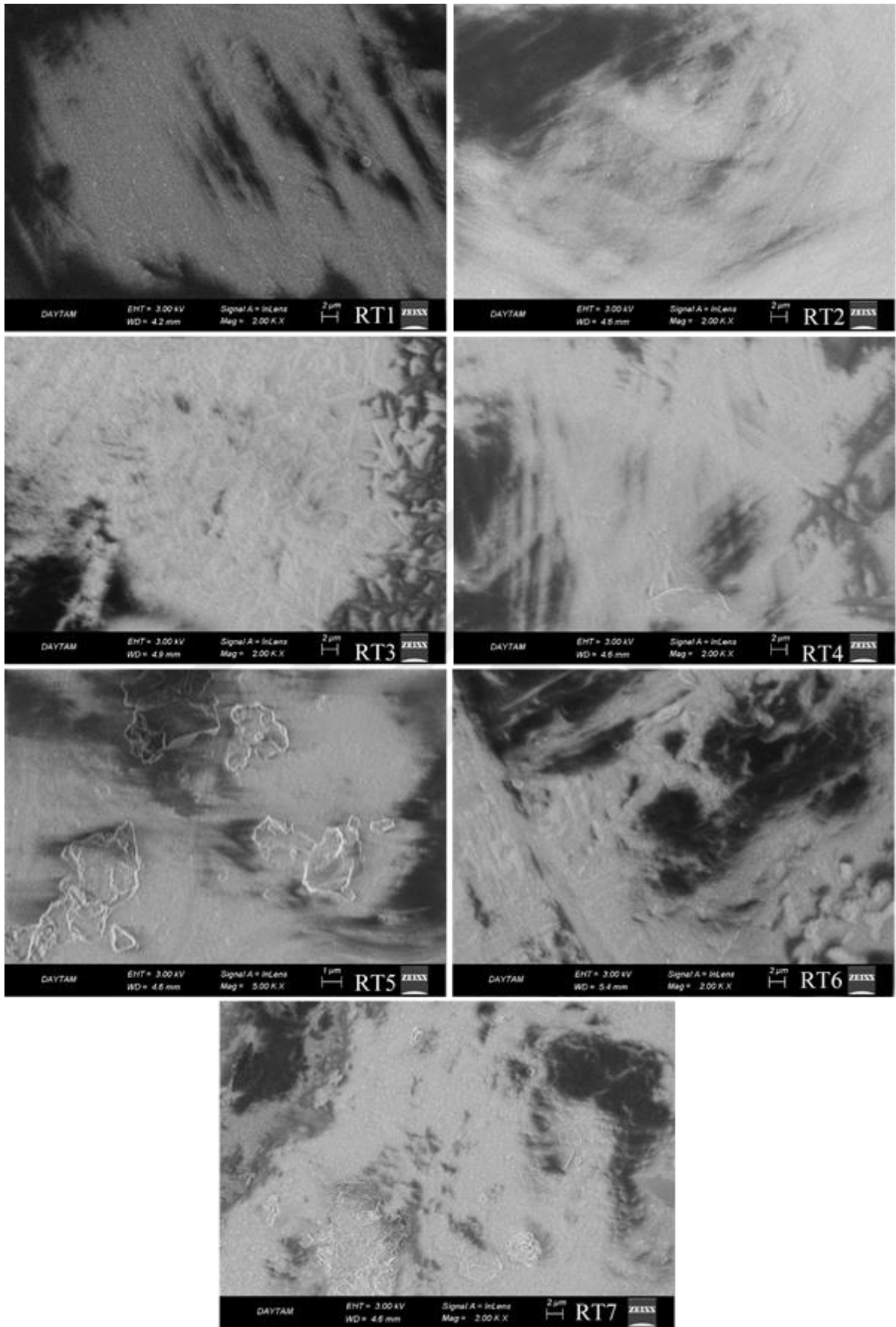
Debye Scherrer denklemi, $D = K\lambda / \beta \cos\theta$, nanopartiküllerin kristal boyutunu hesaplamak için kullanılır. Burada D yapının kristal boyutu, K Scherrer sabitini (0,98), λ dalga boyunu (1,54) ve β maksimum yarı genişlik (FWHM) değerini ifade eder.

Scherrer ilişkisi İnce filmdeki kristalit boyutunu, merkezi kırınım tepe noktasının yarı genişliğini analiz ederek tahmin etmek için kullanılır. Bu denklemde, λ X-ışınının dalga boyunu, β kırınım desenindeki keskin tepe noktasının yarı maksimumdaki tam genişliğini (FWHM) (radyan cinsinden ifade edilir), θ kırınım açısını ve D kristalit çapını temsil eder. En az antimon içeren RT2 yapısının kristalit boyutu 34 nm olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, en fazla antimon içeren RT4 yapısının kristalit boyutu 40 nm olarak ölçülmüştür.

Tablo 19. Kompozit Numunelere Ait EDX Analiz Sonuçları

Numuneler	C(%)			O(%)			Cl(%)			Sb(%)		
	Ağırlık	Atomik	Hata	Ağırlık	Atomik	Hata	Ağırlık	Atomik	Hata	Ağırlık	Atomik	Hata
RT1	68.49	74.57	4.36	30.76	25.16	10.69	0.75	0.27	8.27	-	-	-
RT2	74.2	79.49	3.86	25.29	20.34	12.38	0.45	0.16	16.38	0.07	0.01	62.7
RT3	73.88	79.36	4.28	25.16	20.29	12.38	0.93	0.34	7.54	0.03	0	54.24
RT4	65.98	72.27	4.07	33.68	27.7	10.61	-	-	-	0.34	0.04	56.18
RT5	70.36	76.11	3.99	29.27	23.77	11.19	0.3	0.11	20.27	0.07	0.01	61.5
RT6	71.32	77.05	4.19	27.96	22.68	11.67	0.57	0.2	14.8	0.15	0.02	62.42
RT7	65.83	72.07	4.1	33.96	27.91	10.63	-	-	-	0.21	0.02	49.06

Yapıların kimyasal bileşimi, Tablo 19'da gösterildiği gibi enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizi kullanılarak doğrulandı. Tablo 19'daki EDX sonuçları, RT4 numunesinin en yüksek antimon kütlesini içerdiğini göstermektedir; bu, kristalin boyutu ile ilgili XRD bulgularıyla örtüşmektedir. Tablo 19'da gösterildiği gibi, bu sonuçlar Tablo 6'daki sonuçlarla kısmen tutarlıdır. Bazı farklılıklar, nanometre ölçekli bir alandan alınan EDX ölçümlerinden kaynaklanıyor olabilir. Ek olarak, yapı içindeki klor, bazalt ve antimon kütlesindeki değişiklikler, yüzde sonuçlarını etkileyerek yarı nicel ölçümlere yol açmış olabilir. RT1 yapısı için XRD deseninde antimon oksidin yokluğu ve RT4'ün XRD desenindeki daha yüksek pik yoğunluğu, EDX bulgularını desteklemektedir. Ayrıca, RT2'den RT7'ye kadar olan yapılarda belirgin antimon oksit piklerinin, ilgili miktarlarıyla orantılı olarak yoğunluklarının arttığı görülmektedir.



Şekil 35. Kompozit numuneler için SEM görüntüleri

Yüzey ve morfolojik inceleme için Zeiss Sigma300 model SEM kullanılmıştır. Şekil 35, RT1 ila RT7 yapılarının yüzey morfolojisini gösteren 2000x büyütmeli bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünü sunmaktadır. SEM ölçümleri için uygun olmadıkları için bu yapılar daha küçük ölçeklerde incelenmiştir. Numunelerin yüzey morfolojileri, katkı maddelerinin dağılım özellikleri ve matris ile etkileşimleri değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri RT1'den RT7'ye kadar farklı katkı oranlarını göstermekte olup, mekanik test sonuçları ile paralel değerlendirilmiştir.

RT1 numunesine ait SEM görüntüsü homojen ve pürüzsüz bir yüzey yapısı sergilemektedir. Belirgin faz ayrımı veya boşluk gözlenmemektedir. Bu yapı, saf epoksinin matris sürekliliğinin yüksek olduğunu ve katkı malzemeleri ile bozunmadığını göstermektedir. RT2 numunesinde matris içinde dalgalı ve lif benzeri yapılar gözlenmektedir. $Sb_2 O_3$ parçacıkları homojen şekilde dağılmış olup belirgin aglomerasyon gözlenmemektedir. Düşük orandaki katkı, matris sürekliliğini kısmen bozmuş ve enerji transfer yollarında hafif etkiler yaratmıştır. RT3 numunesinde parçacık kümelenmeleri ve heterojen bir yüzey yapısı göze çarpmaktadır. $Sb_2 O_3$ oranı arttıkça parçacıkların bir araya toplanma eğilimi artmış ve matris içinde süreksizlikler oluşmuştur. Bu durum, özellikle eğilme dayanımındaki düşüş ile uyumludur. RT4 numunesi belirgin faz ayrımı ve gözenek oluşumu sergilemektedir. Yüksek $Sb_2 O_3$ oranı, epoksi ile uyumsuzluğu artırmış ve matris sürekliliğini zayıflatmıştır. Bu yapı, darbe hızı ve iletim süresi değerlerindeki olumsuz değişimlerle ilişkilidir. RT5 numunesinde yüzeyde düzensiz ve farklı boyutlarda parçacık kümelenmeleri gözlenmiştir. Karbon elyaf ve bazaltın homojen dağılmadığı, bazı bölgelerde aglomerasyon oluşturduğu görülmektedir. Bu yapı, mekanik dayanımın düşmesine ve malzemenin gevrekleşmesine neden olmuştur. RT6 numunesinde karbon elyaf parçacıklarının matris içerisinde daha homojen dağıldığı görülmektedir. Aglomerasyon RT5'e kıyasla daha azdır. Bu durum, darbe hızının PRT6 numunesinde nispeten daha yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Karbon elyaf katkısı, bazalt katkısına kıyasla daha düzenli bir yapı sağlamıştır. RT7 numunesinde bazalt partikülleri belirgin düzensizlikler oluşturmuş ve yüzey oldukça heterojen bir görünüm almıştır. Bazaltın epoksi matrisle zayıf ara yüzey etkileşimi, enerji transferini olumsuz etkilemiştir. Bu yapı, iletim süresinin artması ve darbe hızının en düşük seviyeye ulaşması ile uyumludur.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında epoksi esaslı kompozit malzemeler farklı oranlarda $Sb_2 O_3$, karbon elyaf ve bazalt katkıları ile üretilmiş, numunelerin mekanik özellikleri, darbe davranışları, mikroyapısal karakterizasyonları ve radyasyon zırhlama performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

Saf epoksi (RT1), düşük yoğunluğu ve düşük atom numarası nedeniyle en zayıf zırhlama performansına sahip olmuştur. Lineer zayıflama katsayısı (μ) düşük, HVL ve MFP değerleri ise yüksek bulunmuştur. $Sb_2 O_3$ katkısı arttıkça μ değerleri artmış, HVL ve MFP değerleri azalmıştır. %5 $Sb_2 O_3$ katkılı RT4 numunesi en iyi zırhlama performansını göstermiştir. Z_{eff} değeri, $Sb_2 O_3$ katkısı ile anlamlı biçimde artmıştır. RT4 numunesi, yüksek-Z katkısı sayesinde en yüksek Z_{eff} değerine ulaşmıştır. Karbon elyaf katkısı (RT6), Z_{eff} üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuş ancak mekanik performansa katkı sağlamıştır. Bazalt katkısı (RT7), Z_{eff} 'i belirgin şekilde artırmamış ve zırhlama performansına sınırlı katkı sağlamıştır. Karbon ve bazalt katkılı numunelerde HVL ve MFP değerleri, saf $Sb_2 O_3$ katkılı numunelere kıyasla daha yüksek çıkmış ve etkin zırhlama sağlanamamıştır. Genel olarak en iyi zırhlama RT4 (%5 $Sb_2 O_3$) numunesinde, en zayıf zırhlama ise RT1 (saf epoksi) numunesinde elde edilmiştir.

Saf epoksi (PRT1) numunesi, basınç (88.1 MPa) ve eğilme dayanımı (96.8 MPa) açısından en yüksek değerlere ulaşmıştır. Katkı malzemesi bulunmadığında matris sürekliliği bozulmamış, yük taşıma kapasitesi yüksek olmuştur. $Sb_2 O_3$ katkısı ile basınç dayanımı kısmen azalmış, eğilme dayanımı ise belirgin şekilde düşmüştür. %3 $Sb_2 O_3$ içeren PRT3 numunesinde eğilme dayanımı 53 MPa seviyelerine kadar gerilemiştir. Karbon elyaf katkısı (PRT6), darbe hızını artırarak mekanik davranışta olumlu etki göstermiştir. Ancak eğilme dayanımı açısından saf epoksiye kıyasla daha düşük değerler vermiştir. Bazalt katkısı (PRT7) mekanik özelliklerde en düşük değerlere yol açmıştır. Özellikle eğilme dayanımı 36 MPa seviyelerine kadar düşmüştür.

Saf epoksi (PRT1), 2604 m/s darbe hızı ve 19.20 ms iletim süresi ile en iyi sonuçları vermiştir. $Sb_2 O_3$ katkısı arttıkça darbe hızı azalmış, iletim süresi artmıştır. %5 $Sb_2 O_3$ katkılı PRT4 numunesi 2568.3 m/s darbe hızı ve 19.47 ms iletim süresi ile en zayıf sonuçlardan birini vermiştir. Karbon elyaf katkısı (PRT6), 2591 m/s darbe hızı ve 19.30 ms iletim süresi ile

$Sb_2 O_3$ 'un olumsuz etkisini kısmen dengelemiştir. Bazalt katkısı (PRT7), 2564 m/s darbe hızı ve 19.50 ms iletim süresi ile en düşük performansı göstermiştir.

Saf epoksi (RT1), homojen ve süreksizlik içermeyen bir yapı sergilemiştir. $Sb_2 O_3$ katkısı arttıkça matris sürekliliği bozulmuş, özellikle %5 katkıda parçacık kümelenmeleri ve gözenekler belirginleşmiştir. Karbon elyaf katkısı (RT6), matris içinde daha homojen dağılım sağlamış ve aglomerasyon eğilimini azaltmıştır. Bazalt katkısı (RT7), heterojenlik oluşturmuş ve epoksi ile zayıf ara yüzey etkileşimi sergilemiştir. Bu yapı, darbe ve mekanik performanstaki düşüşlerle uyumludur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, epoksi matrisli kompozitlerde katkı malzemelerinin radyasyon zırhlama ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin birbirinden farklı yönlerde evrildiğini göstermektedir. Antimon trioksit ($Sb_2 O_3$) katkısı, özellikle düşük enerjili foton etkileşimlerinde etkin rol oynayarak radyasyon soğurma kapasitesini artırmış, fakat artan katkı oranı mekanik özelliklerde belirgin zayıflamalara yol açmıştır. Bu nedenle, ileride yapılacak çalışmalarda nano boyutta veya yüzey modifikasyonu uygulanmış $Sb_2 O_3$ partiküllerinin kullanımı ile matris uyumunun geliştirilmesi önerilmektedir. Karbon elyaf katkısı, darbe hızı ve iletim süresi üzerinde olumlu etki göstermiştir; bu durum karbon elyaf esaslı katkıların yük transferi mekanizmalarını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda grafen, karbon nanotüp veya benzeri ileri karbon yapılarının kullanımı, mekanik özellikler ile birlikte elektriksel ve termal özelliklerde de iyileştirme sağlayabilir. Bazalt katkısı ise mevcut haliyle mekanik ve mikroyapısal açıdan olumsuz sonuçlar doğurmuş, ancak uygun yüzey işlemleri ya da daha ince partikül boyutlarının tercih edilmesiyle epoksi matrisle uyumu artırılarak performansının iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Uygulama alanları açısından değerlendirildiğinde, yüksek-Z katkılı numuneler radyasyon güvenliği için öne çıkarken, karbon elyaf katkılı numuneler darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda avantajlı hale gelmektedir. Gelecek çalışmaların yalnızca gama ışınları ile sınırlı kalmayıp nötron zırhlama performanslarını da içermesi, ayrıca bu kompozitlerin ısı dayanım, çevresel etkilere karşı direnç ve uzun dönemli kararlılık gibi mühendislik açısından kritik özelliklerinin test edilmesi önem arz etmektedir. Böylelikle, geliştirilen kompozitlerin hem yapısal hem de radyasyon güvenliği uygulamalarında daha geniş bir kullanım potansiyeline sahip olması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Abdelhameed, M. M., Al-Ghamdi, S. A., Alajerami, Y. S., & Sayyed, M. I. (2024). Epoxy/Sb₂O₃ composites for radiation shielding applications: *Experimental and simulation study. Radiation Physics and Chemistry*, 215, 110580.
- Agarwal, A., Keshavamurthy, R., & Singh, A. K. (2024). Nano-ceramic materials for radiation shielding applications. *Ceramics International*, 50(12), 13141–13146. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.001>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2019). Toxicological profile for antimony. U.S. Department of Health and Human Services.
- Akbay, I. A., & Evcin, A. (2022). Polyethylene-based boron composites for neutron shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 195, 11000
- Akçin Ergün, Y. (2019). Mechanical properties of epoxy composite materials produced with different ceramic powders. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 7(4), 23–35. <https://doi.org/10.4236/msce.2019.74003>
- Akkurt, I., Basyigit, C., & Kilincarslan, S. (2010a). Radiation shielding properties of concrete containing zeolite. *Radiation Measurements*, 45(7), 827–830
- Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B. (2010b). Radiation shielding of concretes containing barite. *Progress in Nuclear Energy*, 52(7), 620–623
- Alam, M., Rahman, M., & Karim, M. (2024). Sustainable algae-derived carbon particles reinforced epoxy composites: *Mechanical and thermal characterization. Polymers*, 16(2), 271. <https://doi.org/10.3390/polym16020271>
- Al-Bahrani, M. A. M., Alajerami, Y. S. M., Sayyed, M. I., Al-Hadeethi, Y., & Hamad, M. K. (2022). Recent advances in heavy metal–polymer composites for gamma-ray shielding applications. *Materials Today Communications*, 33, 104347. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104347>
- Al-Hadeethi, Y., Alajerami, Y. S. M., Mahdi, M. A., & Al-Buriahi, M. S. (2020). A comprehensive review on radiation shielding properties of polymer-based composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 176, 108464.
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- Arpaç, N., 2023, CoCrFeNiTiAl_x yüksek entropili alaşımların radyasyon zırhlama parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Arslan, İ., 2023, Nükleer enerji uygulamalarında kullanılabilecek nikel tabanlı bazı önemli alaşımların radyasyon zırhlama karakteristiklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Attix, F. H. (2004). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Wiley-VCH
- Aydın, A. C., Demir, A., & Kurt, B. (2015). Investigation of radiation shielding properties of different heavyweight concrete aggregates. *Applied Radiation and Isotopes*, 105, 42–45

- Bai, L., Zhang, H., Zhao, Z., Wang, S., Guan, C., Zhao, X., ... & Sun, H. (2025). Tribological behavior of YSZ based composite coatings containing Ag, Sb₂O₃ and Ag/Sb₂O₃ from 25 to 800 oC. *Wear*, 206275.
- Baker, A. A., Dutton, S., & Kelly, D. (2016). Composite materials for aircraft structures. AIAA.
- Bastin, G. F., & Heijligers, H. J. M. (1991). Quantitative X-ray microanalysis of thin specimens. *Journal of Microscopy*, 161(1), 121–134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1991.tb03060.x>
- Belgin, E. E., 2017, Elektromanyetik radyasyon zırhlama uygulamaları için farklı metal tuz takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Berger, M. J., Coursey, J. S., Zucker, M. A., & Chang, J. (2017). ESTAR: Stopping power and range tables for electrons. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- Bichsel, H. (2019). Stopping power and range tables for electrons. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- Bilgiç, S. (2020) *Farklı Foton Enerjilerinde Bazı Mocu Alaşımlarının Radyasyon Soğurma Parametrelerinin Belirlenmesi*. Yüksek lisans tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020
- Billmeyer, F. W. (1984). Textbook of Polymer Science. 3rd Edition, Wiley-Interscience.
- Bozzola, J. J., & Russell, L. D. (1999). Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists. Jones & Bartlett Learning.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2012). The essential physics of medical imaging (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- Chadwick, M. B., Herman, M., Oblozinsky, P., Capote, R., Young, P. G., Goriely, S., ... & Sin, M. (2011). ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology. *Nuclear Data Sheets*, 112(12), 2887–2996. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- Cherkashina, N. V., & Pavlenko, L. E. (2019). Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*, 159, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.02.041>
- Cliff, G., & Lorimer, G.W. (1975). The quantitative analysis of thin specimens. *Journal of Microscopy*, 103(2), 203–207.
- Dağlı Ş.B., 2002. Endüstriyel Sıvılarda Gama Radyasyonunun Zayıflatılması. İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, İstanbul.
- DiJulio, D. D., Cooper- Jensen, C. P., Perrey, H., Fissum, K., Rofors, E., Scherzinger, J., & Bentley, P. M. (2017). A polyethylene- B₄ C based concrete for enhanced neutron shielding at neutron research facilities. arXiv
- Ding, B., Zhang, L., & Liu, J. (2022). Study on shielding and radiation resistance of basalt fiber to gamma ray. *Materials*, 15(7), 2522.
- Dlamini, L. N., Govender, V., Erasmus, R. M., Strydom, R., & Billing, D. G. (2018). Evaluation of ceramic composites for radiation shielding applications. *Ceramics International*, 44(1), 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.09.001>

- Ebrahimi, M., & Karami, H. (2023). Gamma-ray and neutron attenuation of carbon fiber/epoxy composites. *Polymer Composites*, 44(7), 2425–2433. <https://doi.org/10.1002/pc.29408>
- Egerton, R. F. (2011). *Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope*. Springer.
- El-Bakary, M. A., & Yassien, M. A. (2018). Effect of gamma irradiation on the physical and structural properties of basalt fiber. *Materials Science and Engineering: B*, 238, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2018.02.004>
- El-Jaby, S., Yediler, M., Al-Buriahi, M. S., & Sayyed, M. I. (2021). Investigation of borated polyethylene as a neutron shielding material. *Journal of Nuclear Materials*, 547, 152803. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152803>.
- El-Khatib, A. M., Abouhaswa, A. S., Al-Buriahi, M. S., Olarinoye, I. O., & El-Agawany, F. I. (2022). Gamma and neutron attenuation characteristics of Sb_2O_3 -filled polymer composites. *Nuclear Engineering and Design*, 389, 111661. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111661>
- Emco Plastics. (2023). Why choose borated HDPE over conventional shielding substrate? <https://www.emcoplastics.com/why-choose-borated-hdpe-over-conventional-shielding-substrate>
- Fadhel, M. I., Al-Khulaifi, M. M., Al-Sulaiti, H., & Abdelhamid, H. N. (2020). Development of boron-based polymer composites for neutron shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109191. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109191>
- Gilmore, G. (2008). *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. John Wiley & Sons.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.
- Guna, V., El-Khatib, A. M., Al-Buriahi, M. S., & Fadhel, M. I. (2022). Flexible natural rubber/ Sb_2O_3 composites for wearable radiation shielding. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(18), e52058. <https://doi.org/10.1002/app.52058>
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2018). *Radiobiology for the Radiologist* (8th ed.). Wolters Kluwer.
- Haque, E., Ahsan, A., Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2023). Lead-free polymer composites for gamma radiation shielding: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 204, 110730. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110730>
- Hubbell, J. H., & Seltzer, S. M. (1996). Tables of X-ray mass attenuation and mass energy-absorption coefficients (NIST SRD 126). *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.18434/T4D01F>
- IAEA. (2003). *Radiation protection and safety in industrial radiography* (Safety Reports Series No. 33). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- IEEE Access. (2023). Various articles on radiofrequency Technologies
- International Atomic Energy Agency. (2006). *Environmental consequences of the Chernobyl accident*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2022). *Fundamentals of radiation protection* (IAEA Safety Standards Series No. 115). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020a). *ICNIRP guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)*. *Health Physics*, 118(5), 477–499.

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020b). *Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*. *Health Physics*, 118(5), 483–524.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. (2011). *Fundamental quantities and units for ionizing radiation* (ICRU Report 85).
- International Commission on Radiological Protection. (2007). *ICRP publication 103: The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP.
- Kaewkhao, J., & Limsuwan, P. (2012). A study of photon interaction and shielding properties of glasses containing heavy metal oxides. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 287, 105–112.
- Kaplan I., 1969. Nuclear Physics. Addison-Wesley Publishing Company, No: 62 9402, 770s. London.
- Kargar, F., Ghafouri, Y., Ghosh, S., Godziszewski, K., Seyedmahmoudbaraghani, S., Yashchyshyn, Y., Cywiński, G., Rumyantsev, S., Salguero, T. T., & Balandin, A. A. (2021). Radiation shielding properties of high-performance polymer composites with metal oxide nanoparticles. *Progress in Nuclear Energy*, 137, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103777>
- Kargar, M., Kaya, M., Kaya, S., & Yalçın Kuzu, S. (2022). Photon attenuation properties of high-Z-filled epoxy composites for radiation shielding. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 3734–3746. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.104>
- Kavaz, E., Tekin, H.O., Agar, O., Altunsoy, E.E., Kilicoglu, O., Kamislioglu, M., Abuzaid, M.M., Sayyed, M.I., 2019. The Mass stopping power/projected range and nuclear shielding behaviors of barium bismuth borate glasses and influence of cerium oxide, *Ceramics International*, 45(12), ss. 15348-15357
- Knoll, G. F. (2002). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement (4th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Krane, K. S.(1987), *Introductory nuclear physics*, John Wiley & Sons.
- Kumar, P., Singh, R., & Sharma, A. (2018). Mechanical and thermal properties of carbon fiber reinforced polymer composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), 14514-14522. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.093>
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2018). *Introduction to nuclear engineering (4th ed.)*. Pearson.
- Mahmoud, M. E., Kargar, F., Ali, A., & Balandin, A. A. (2021). Enhancement of gamma-ray shielding properties of polymer composites using high-Z fillers. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1211–1224.
- Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M., Thind, K. S., & Gerward, L. (2008). On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(18), 3906–3912.
- Martin, A., & Harbison, S. (2013). *An introduction to radiation protection*. CRC Press.
- Martin, A., & Harbison, S. (2018). *An introduction to radiation protection (7th ed.)*. CRC Press.
- Martin, J. E. (2006). *Physics for radiation protection*. Wiley-VCH.
- Messenger, George C., & Ash, Marvin S. (1992). *The effects of radiation on electronic systems*. Van Nostrand Reinhold.

- Midgley, Stephen M. (2004). A parameterization scheme for the x-ray mass attenuation coefficient and energy absorption coefficient. *Physics in Medicine & Biology*, 49(4), 307–322. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/4/016>
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2057–2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
- NASA. (2023). *Electromagnetic spectrum*. NASA Science. <https://science.nasa.gov/ems/>
- NASA. (2023). *Ultraviolet radiation: Types and effects*. NASA Science. <https://science.nasa.gov>
- National Council on Radiation Protection and Measurements. (2004). *NCRP report no. 147: Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities*. NCRP.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. (2005). *NCRP report no. 151: Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities*. NCRP.
- National Institute of Standards and Technology. (2023). NIST XCOM: Photon cross sections database. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
- Newbury, D. E., & Ritchie, N. W. M. (2015). Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative Scanning, 37(1), 1–22.
- Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., & Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Ouda, M. M. (2020). Ceramics as radiation shielding materials: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 170, 108666. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108666>
- Önen, S. (1993). *Radyasyon biyofiziği (112 s.)*. İstanbul Üniversitesi Basımevi.
- Özturan, T. (2013). Özel betonlar. *Beton 2013 Kongresi Bildirileri*, 70–83. <https://www.thbb.org/media/2118/etkinlikler113.pdf>
- Perişanoğlu, U. (2018) *Doktora Tezi Geçiş Metalli Nano Ferrit Alaşımlar İçin KX-Işını Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalı*
- Podgorsak, E. B. (2005). *Radiation physics for medical physicists*. Springer.
- Podgorsak, E. B. (2010). *Radiation physics for medical physicists (2nd ed.)*. Springer.
- Polk, C., & Postow, E. (Eds.). (1996). *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields* (2nd ed.). CRC Press
- Reimer, L. (1998). *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer.
- Reimer, L., & Kohl, H. (2008). *Transmission electron microscopy: Physics of image formation*. Springer.
- Sasidharan, R., Haque, E., Kumar, P., & Singh, A. K. (2023). Lead-free polymer composites for radiation shielding: A review. *Progress in Polymer Science*, 138, 101692. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101692>

- Sasidharan, R., Haque, E., Kumar, P., & Singh, A. K. (2023). Lead-free polymer composites for radiation shielding: A review. *Progress in Polymer Science*, 138, 101692. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101692>
- Schwank, J. R., Fleetwood, D. M., Winokur, P. S., & Dodd, P. E. (2008). Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(4), 1833–1853. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2005150>
- Seibert, J. A., Boone, J. M., & Samei, E. (2021). Monte Carlo simulations in diagnostic radiology. *Medical Physics*, 48(3), e569–e589. <https://doi.org/10.1002/mp.14730>
- Shahidan, S., Mohd, S., & Mohamad, R. (2017). A review on radiation shielding concrete. *Construction and Building Materials*, 137, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.080>
- Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2000). *Radiation Shielding*. American Nuclear Society
- Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2017). *Radiation shielding*. American Nuclear Society.
- Simon, S. L., & Linet, M. S., 2014, Radiation-exposed populations: who, why, and how to study. *Health Physics*, 106(2), 182-195.
- Singh, V. P., & Badiger, N. M. (2015). Radiation shielding effectiveness of hydrogen-rich materials. *Annals of Nuclear Energy*, 76, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.007>
- Singh, V. P., Badiger, N. M., & Gerward, L. (2015). Radiation shielding effectiveness of lead-free composites: An effective atomic number approach. *Annals of Nuclear Energy*, 76, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.12.014>
- Singh, V. P., Badiger, N. M., Kaewkhao, J. (2020). Radiation shielding characteristics of BaSO₄ -filled polymer composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 167, 108333.
- Singh, V. P., Medhat, M. E., & Badiger, N. M. (2016). Radiation shielding effectiveness of epoxy-based composite materials. *Journal of Nuclear Materials*, 471, 261–268.
- Smith, J., & Wang, P. (2025). Mechanical and electromagnetic shielding properties of carbon fiber composites. *Scientific Reports*, 15, 634. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-00634-x>
- Sobczak, J., Truszkiewicz, A., Cwynar, K. G., Ruczka, S., Kolanowska, A., Jędrysiak, R. G., Waśkiewicz, S., Dzida, M., Boncel, S., & Żyła, G. (2024). Soft, ternary, X- and gamma-ray shielding materials: paraffin-based iron-encapsulated carbon nanotube nanocomposites. *Materials Advances*, 5(14), 7327–7341. <https://doi.org/10.1039/D4MA00359D>
- Sperling, L. H. (2005). *Introduction to Physical Polymer Science*. Wiley.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press.
- Sweni, S., Meenakshisundaram, R., & Thirumalaikolundusubramanian, P. (2015). Chapter 17: Cardiovascular toxicity as a result of radiological imaging. In M. Ramachandran (Ed.), *Heart and toxins* (pp. 521–546). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801888-6.00017-1>
- Şen Baykal, D. (2021). *Radyoloji ünitelerinde kullanılabilecek cam zırhlama malzemelerine farklı kimyasal katkılamalarının etkisinin Monte Carlo yöntemi ile incelenmesi* (Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tariq, M., Khan, S., & Ahmed, F. (2023). Recent advances in polymer-based radiation shielding materials: A review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.12.003>

- Tekin, H. O., Manici, T., & Sayyed, M. I. (2018). Investigation of gamma radiation attenuation parameters of epoxy matrix composites containing Bi₂ O₃ and WO₃ particles. *Applied Radiation and Isotopes*, 141, 148–153.
- Thermo Fisher Scientific. (2020). Silicon Drift Detector (SDD) technology in energy-dispersive X-ray spectroscopy: *Technical note and application guide*. Thermo Fisher Scientific.
- Toto, E., Lucia Lambertini, Susanna Laurenzi, & Maria Gabriella Santonicola. (2024). Recent advances and challenges in polymer-based materials for space radiation shielding. *Polymers*, 16(3), Article 382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382>
- Tsoufanidis, N. (2013). *Measurement and Detection of Radiation (4th ed.)*. CRC Press.
- Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Wiley-VCH.
- Türkşan, S. S., Yılmaz, B., Aydın, F., & Özdemir, A. (2022). Evaluating the X-ray-shielding performance of graphene-based nanocomposite fabrics. *Materials*, 15(4), 1441. <https://doi.org/10.3390/ma15041441>
- Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK). (2010). *Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği*. Resmi Gazete, 26976.
- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK). (2023). *Radyasyon Güvenliği Uygulamaları*. <https://www.tenmak.gov.tr>
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, 2008
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (2010). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations.
- Uyar, E., Akay, D., & Pul, M. (2025). *Investigation of Radiation Shielding Properties of Al2024, ZA27 (Zamac) and Cu Composites Reinforced with Nano Graphene and Multi-Walled Carbon Nanotubes*. SSRN.
- Vira, A. D., Mone, E., Ryan, E., Connolly, P., Smith, K., Roecker, C., ... Mesick, K. (2022). Designing a boron nitride polyethylene composite for shielding neutrons. ArXiv.
- Wang, X., & Li, Y. (2020). Carbon fiber and its composites: a review on recent developments. *Journal of Composite Materials*, 54(15), 2057-2071. <https://doi.org/10.1177/0021998320914705>
- WHO. (2024). Electromagnetic fields and public health: Radiofrequency. World Health Organization.
- Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Springer.
- World Health Organization (WHO). (2006). Electromagnetic Fields and Public Health: Microwave ovens. Retrieved from <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs204/en/>
- World Health Organization. (2016) *Ionizing Radiation, Health Effects and Protective Measures*. WHO.
- World Health Organization. (2022). Ultraviolet radiation and health. WHO. <https://www.who.int>
- Yakubu, M. A., Oladipo, M. O. A., Osafire, O. E., Akinwumi, S. A., & Aboluwoye, C. O. (2021). *Comparative study of radiation shielding abilities of polymer-based composites for medical applications*. *Materials Today: Proceedings*, 47(1), 1745–1750. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.068>

- Yılmaz, M. (2024). PLA Tabanlı Kompozitlerin Radyasyon Zırhlama Performansı. *Int. J. of Pure and Applied Sciences*, DergiPark.
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers*. CRC Press.
- Zhan, Y., Lago, E., Santillo, C., Sakhno, O., & Wang, X. (2020). Anisotropic layer-by-layer carbon nanotubes/boron nitride/rubber composite and its application in electromagnetic shielding.
- Zhang, L., Li, X., & Chen, Y. (2017). Radiation resistance of carbon fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Nuclear Materials*, 518, 91–98.
- Zhang, W., Wu, J., Zheng, J., Shan, L., Huang, P., Wang, C., Yang, H., & Zhao, H. (2025). Simultaneously enhanced mechanical properties and electromagnetic interference shielding capabilities of graphene nanosheets reinforced magnesium matrix laminated composite using accumulative roll bonding process. *Coatings*, 15(3), 250. <https://doi.org/10.3390/coatings15030250>
- Zhang, X., Wang, Y., Li, J., Chen, H., & Zhao, L. (2022). High-Z ceramics for gamma ray shielding. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(5), 1821–1829. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.017>
- Zhang, Y., Sun, X., Li, S., Wang, X. (2019). Ceramic materials in nuclear energy applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661–671.
- Zheng, Y., Liu, C., Zhang, Z., Liao, H., Li, Z., Jiang, Y., ... & Gao, Y. (2025). Regulating (010) Exposed Facets of a Sb₂O₃ Anode to Achieve High-Performance Sodium-Ion Batteries. *Nano Letters*, 25(13), 5461-5468.
- Zorla, E., Ipbüker, C., Biland, A., Kiisk, M., Kovaljov, S., Tkaczyk, A. H., & Gulik, V. (2016). Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron. *Nuclear Engineering and Design*, 313, 306–318.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Kader GÜLEN
Doğum tarihi:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Nenehatun Kız Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	