



**METAL OKSİT TAKVİYELİ MİNAREL VE SODYUM
SİLİKAT ESASLI MASTİK MATRİS
KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE
RADYASYON KALKANI ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Muhammed ÇİMEN

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Ana Bilim Dalı
2025
(Her hakkı saklıdır.)**

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

**METAL OKSİT TAKVİYELİ MİNAREL VE SODYUM SİLİKAT ESASLI MASTİK
MATRİS KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE RADYASYON KALKANI
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Development of Metal Oxide-Reinforced Mineral and Sodium Silicate-Based Mastic Matrix
Composites and Investigation of Radiation Shielding Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed ÇİMEN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET

Erzurum
Temmuz, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Muhammed Çimen tarafından hazırlanan “Metal Oksit Takviyeli Mineral ve Sodyum Silikat Esaslı Mastik Matris Kompozitlerinin Geliştirilmesi ve Radyasyon Kalkanı Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışması 28/07/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Atom ve Moleküler Fiziği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Yüksel ÖZDEMİR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Bünyamin AYGÜN <i>Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi</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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğretim Üyesi Esra CİNAN danışmanlığında sunulan “Metal Oksit Takviyeli Mineral ve Sodyum Silikat Esaslı Mastik Matris Kompozitlerinin Geliştirilmesi ve Radyasyon Kalkanı Özelliklerinin Araştırılması” 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	1	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Metot	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	3	20
Tezin Geneli	4	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
Muhammed ÇİMEN	Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN
28.7.2025	28.7.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* 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 değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Yüksel ÖZDEMİR'e ve Sayın Doç. Dr. Bünyamin AYGÜN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde önerileri, fikirleri ve yol gösterici yorumlarıyla çalışmama katkılar sağlayan danışman hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET'e teşekkür ederim.

Tez yazım sürecinde destekleriyle yanımda olan değerli arkadaşım Öğr. Gör. Dr. Vedat SOLA'ya teşekkür ederim.

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

Ayrıca hayatım her alanında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen eşim ve aileme gönülden teşekkür ederim.

Muhammed ÇİMEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAL OKSİT TAKVİYELİ MİNERAL VE SODYUM SİLİKAT ESASLI MASTİK MATRİS KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE RADYASYON KALKANI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MUHAMMED ÇİMEN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç LEVET

Amaç: Bu çalışma, nükleer teknolojilerde ve radyasyonun yoğun olarak kullanıldığı uygulamalarda değerlendirilebilecek yüksek radyasyon direncine sahip mastik matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, kompozit yapıya takviye fazı olarak Fe_2O_3 , Cr_2O_3 ve NiO gibi metal oksitler eklenerek, gama ışınlarına karşı koruyucu özellikleri artırılmış malzemeler tasarlanmıştır.

Yöntem: Kompozit numuneler, toz metalürjisi yöntemiyle Specac baskı cihazında pelletler halinde oluşturulmuştur. Bağlayıcı malzeme olarak Kalekim ve Colofer Solvent yapı malzemeleri kullanılmıştır. Nikel (Ni), Krom (Cr) ve Demir (Fe) oksitleri içeren beş farklı kompozit formülasyonu (K1, K2, K3, K4 ve K5) 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.

Bulgular: Kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı, ortalama serbest yol, yarı değer kalınlığı, onda bir kalınlık, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğu gibi parametrelerin gelen foton enerjisine bağlı değerleri WinXCOM yazılımı yardımıyla teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca numunelerin foton çoğalma faktörleri 0,1-15 MeV enerji aralığında teorik olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç: Oluşturulan kompozitlerin radyasyon zırhlama özellikleri başarılı bulunmuş, özellikle düşük enerjili fotonlara karşı yüksek etkinlik sergilemiştir. K1 numunesi tüm enerjilerde en iyi performansı göstermiştir. Elde edilen veriler, metal oksit takviyeli mastik matrisli kompozitlerin, nükleer uygulamalarda kurşun bazlı malzemelere çevre dostu bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Radyasyon zırhlama, Kütle soğurma katsayısı, Kompozit malzemeler, Foton çoğalma faktörü

Temmuz 2025, 96 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DEVELOPMENT OF METAL OXIDE-REINFORCED MINERAL AND SODIUM SILICATE-BASED MASTIC MATRIX COMPOSITES AND INVESTIGATION OF RADIATION SHIELDING PROPERTIES

Muhammed ÇİMEN

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Esra CİNAN

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

Purpose: This study aims to develop mastic matrix composite materials with high radiation resistance, suitable for use in nuclear technologies and applications where radiation is intense. In this context, materials with enhanced gamma-ray protection properties were designed by adding metal oxides, such as Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , and NiO , as reinforcement phases to the composite structure.

Method: Composite samples were formed into pellets using the powder metallurgy method in a Specac pressing machine. Kalekim and Colofer Solvent were used as binders. Five different composite formulations (K1, K2, K3, K4, and K5) containing nickel (Ni), chromium (Cr), and iron (Fe) oxides were prepared. WinXCOM software was utilized to theoretically determine the radiation shielding properties of the composite samples. Gamma spectroscopy with an HPGe detector was used for experimental measurements with gamma radiation.

Findings: The values of parameters such as mass attenuation coefficient, linear absorption coefficient, mean free path, half-value layer, tenth-value layer, effective atomic number, and effective electron density, as a function of incident photon energy, were calculated theoretically using WinXCOM software and compared with experimental results. Furthermore, the photon buildup factors of the samples were theoretically evaluated in the energy range of 0.1-15 MeV

Results: The radiation shielding properties of the composites were found to be successful, exhibiting particularly high effectiveness against low-energy photons. Sample K1 demonstrated the best performance at all energies. The data obtained demonstrated that metal oxide-reinforced mastic matrix composites could provide an environmentally friendly alternative to lead-based materials in nuclear applications

Keywords: Radiation shielding, Mass attenuation coefficient, Composite materials, Photon build-up factor

July 2025, 96 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.....	6
Kompozit Malzemeler.....	6
Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	8
Radyasyon	10
Oluşumuna Göre Radyasyon Türleri	10
Doğal radyasyon.....	11
Kozmik radyasyon	12
Karasal radyasyon	13
Yiyecek ve içeceklerle alınan radyasyon (İngestion yoluyla maruziyet).....	14
Solunan radyasyon (İnhalasyon yoluyla maruziyet)	15
Yapay radyasyon.....	16
Enerjisine Göre Radyasyon Türleri.....	18
Alfa parçacıkları.....	20
Beta parçacıkları.....	21
X- ışınları	23
Gama ışınları	26
Madde Foton Etkileşimi.....	27
Fotoelektrik olay	27
Compton saçılması	28
Çift oluşumu.....	30
Radyasyonun Etkileri	32

Radyasyonun olumlu etkileri	32
Radyasyonun olumsuz etkileri ve temel faktörler.....	33
Radyasyon ışınlarının biyolojik etkileri	34
Radyasyonun hücreler üzerindeki etkisi	35
Radyasyondan Korunma Yolları.....	36
Zaman kuralı	37
Mesafe kuralı.....	37
Zırhlama kuralı.....	38
Radyasyondan Korunmanın Gerekçeleri	40
MATERYAL VE METOT	41
WinXCOM Programı	41
Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	41
Metaloksik Takviyeli Kompozitler	44
Radyasyon Zırhlama Parametreleri.....	45
Kütle soğurma katsayısı	45
Lineer soğurma katsayısı.....	46
Yarı değer ve onda-bir değer kalınlığı (HVL/TVL)	47
Ortalama serbest yol (MFP).....	47
Etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}).....	48
Eşdeğer atom numarası (Z_{eq}).....	48
Foton çoğalma faktörleri	49
Gama Spektroskopi Sistemi	51
HPGe Dedektörlerin Çalışma Prensipleri.....	52
Sayım Sistemi	52
Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi	55
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	58
Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri	58
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR.....	77

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Dünyada ve Ülkemizdeki Bazı Bölgelerin Radyasyon Seviyeleri	14
Tablo 2. Radyasyon Türlerinin Enerjiye Göre Sınıflandırılması.....	18
Tablo 3. Numuneler Hazırlanırken Kullanılan Malzemelerin Kütle Birleşim Oranları (%) ...	57
Tablo 4. Kütle Soğurma Katsayısı, MAC (μ/ρ , cm^2/g).....	58
Tablo 5. Lineer Soğurma Katsayıları (LAC)	60
Tablo 6. Yarı Değer Kalınlık (HVL)	61
Tablo 7. Onda Bir Değer Kalınlık (TVL)	62
Tablo 8. Ortalama Serbest Yol (MFP).....	63
Tablo 9. Etkin Atom Numarası (Z_{eff}).....	65
Tablo 10. Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff})	66
Tablo 11. Eşdeğer Atom Numarası (Z_{eq}).....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Takviye elemanına göre çeşitleri	7
Şekil 2. Kompozit malzemeler ve sınıflandırılması	9
Şekil 3. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına ait genel sınıflandırma.....	11
Şekil 4. Radyasyonun yüksekliğe göre etkisi.....	13
Şekil 5. Radonun yapı içine transfer süreci	15
Şekil 6. Radyasyona maruziyetin potansiyel etkileri	20
Şekil 7. Alfa bozunumu.....	21
Şekil 8. Beta parçacık oluşumu	23
Şekil 9. İlk X ışını görüntülemesi.....	24
Şekil 10. X-ışını tüpü	25
Şekil 11. Elektromanyetik dalga tayfı	26
Şekil 12. Fotoelektrik soğurma olayının gösterimi	28
Şekil 13. Compton saçılması	29
Şekil 14. Çift oluşum.....	30
Şekil 15. Farklı enerji düzeylerinde fotoelektrik etki, compton saçılması ve çift oluşumun baskınlık dağılımı.....	31
Şekil 16. Foton enerjisinin artışına bağlı olarak maddeyle etkileşim türlerinin lineer soğurma katsayısına etkisi	32
Şekil 17. Radyasyon biyolojik etkileri	34
Şekil 18. Radyasyonun direkt ve indirekt etkileri	35
Şekil 19. İyonize radyasyona bağlı kromozal yapılar	36
Şekil 20. Radyasyondan korunma yolları zaman	37
Şekil 21. Ters kare kanunu	38
Şekil 22. Radyasyondan korunma yolları uzaklık.....	38
Şekil 23. Radyasyon korunma yolları zırhlama	39
Şekil 24. Gelen fotonların enerjisinin malzemenin kalınlığına bağlı olarak değişimi	47
Şekil 25. Gama spektroskopinin şeması.....	51
Şekil 26. Gama ölçümlerinde kullanılan kaynak.....	54
Şekil 27. K1 sayım grafiği.....	55
Şekil 28. Numunelerin üretim ve hazırlanma sürecine ait görseller	56
Şekil 29. Üretilen kompozit numunelere ait görseller.....	57
Şekil 30. Numunelerin enerjiye bağlı kütle soğurma katsayısı değerlerinin değişimi	59
Şekil 31. Numunelerin enerjiye bağlı lineer soğurma katsayısı değerlerinin değişimi.....	60

Şekil 32. Numunelerin enerjiye bağlı yarı kalınlık (HVL) değerlerinin değişimi	61
Şekil 33. Numunelerin enerjiye bağlı onda bir kalınlık (TVL) değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 34. Numunelerin enerjiye bağlı ortalama serbest yol değerlerinin değişimi	64
Şekil 35. Numunelerin enerjiye bağlı etkin atom numarası değerlerinin değişimi	65
Şekil 36. Numunelerin enerjiye bağlı etkin elektron yoğunluğu değerlerinin değişimi	67
Şekil 37. Numunelerin enerjiye bağlı eşdeğer atom numarası değerlerinin değişimi.....	69
Şekil 38. 1, 10, 40 mfp derinliklerinde enerjilere bağlı EABF ve EBF değişimi.....	70
Şekil 39. 0.015, 0.15, 1.5, 15 MeV enerjilerinde penetrasyon derinliğe bağlı EABF değişimi	72
Şekil 40. 0.015, 0.15, 1.5, 15 MeV enerjilerinde penetrasyon derinliğe bağlı EBF değişimi..	73



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

α	: Alfa Parçacığı
λ	: Dalga Boyu
ν	: Frekans
γ	: Gama Parçacığı
θ	: Kütle Merkezi Sistemindeki Saçılma Açısı
μ	: Lineer Soğurma Katsayısı
τ	: Lineer Toplam Soğurma Katsayısı
μ_m	: Kütle Soğurma Katsayısı
σ_t	: Toplam Tesir Kesiti
$\text{\AA}$	: Angström ($10^{-10} m$)
$B^+ - B^-$	: Beta Parçacığı
C	: Coulomb
c	: Işık Hızı
Cr	: Krom
e	: Elektron
E	: Enerji
EABF	: Enerji Soğurma Birikim Faktörü
EBF	: Maruz Kalma Birikim Faktörü
eV	: Elektron Volt
h	: Planck Sabiti
HVL	: Yarı Kalınlık Değeri
I	: Şiddet
keV	: Kilo Elektron Volt
LAC	: Lineer Soğurma Katsayısı
LET	: Lineer Enerji Salınımı
M	: Nötronun Çarptığı Çekirdeğin Kütlesi
m_0	: Elektronun Durgun Kütlesi
MAC	: Kütle Soğurma Katsayısı
m_e	: Elektron Kütlesi
MeV	: Mega Elektron Volt
MFP	: Ortalama Serbest Yol

N_{eff}	: Etkin Elektron Yoğunluğu
p	: Proton
R	: Röntgen, Radyasyon Şiddet Birimi
SI	: Uluslararası Birim Sistemi
Sv	: Sievert, Eşdeğer Doz Birimi
TVL	: Onda Bir Kalınlık Değeri
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
UV	: Ultraviyole Işınları
Z	: Atom Numarası
Z_{eff}	: Etkin Atom Numarası



GİRİŞ

Nükleer teknolojiler, günümüzün artan küresel enerji talebini karşılamada kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, bu enerjiyi kullanma sürecinde, insanları ve çevreyi yüksek düzeyde radyasyona maruz bırakarak önemli riskler bulunmaktadır. Radyasyon, kozmik ışınlar, toprak, su ve hatta insan vücudu gibi kaynaklardan doğal olarak ortaya çıkmakla birlikte, son yıllarda insan faaliyetleri nedeniyle yapay radyasyon kaynaklarında önemli bir artış olmuştur. Bu artış, tıp ve endüstri alanlarında yaygın uygulamalarla daha da belirgin hale gelmiştir. Bu nedenle, radyasyonun insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak için etkili koruma stratejileri geliştirmek, günümüzde öncelikli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Nükleer santrallerde, tıbbi görüntüleme cihazlarında, endüstriyel uygulamalarda ve iletişim teknolojilerinde kullanılan ekipmanlar elektromanyetik radyasyon yayarak bireyleri sürekli radyasyona maruz bırakmaktadır. Bilimsel araştırmalar, yapay radyasyonun doğal radyasyona göre canlı organizmalar üzerinde daha kalıcı ve zararlı etkilere neden olabileceğini göstermiştir. Bu etkiler arasında DNA hasarı, hücre dejenerasyonu ve çeşitli sağlık sorunları bulunmaktadır (Jia et al. 2021; Yeyin 2015). Bu nedenle, nükleer tesislerde çalışan personeli radyasyonun biyolojik etkilerinden korumak, sağlık ve güvenlik açısından hayati önem taşımaktadır. Aynı zamanda, bu koruyucu önlemler hem çevresel sürdürülebilirlik hem de operasyonel güvenilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda, radyasyondan koruyucu özelliklere sahip malzemeler geliştirmek, sadece bireysel sağlığı korumakla kalmaz, aynı zamanda nükleer operasyonların verimliliğini ve güvenilirliğini de artırır. Bu malzemeleri yüksek kalite ve etkinlikle üretmek, nükleer güvenlik standartlarını karşılamak için gereklidir. Radyasyon kalkanı uygulamaları için geliştirilen malzemeler hem mekanik mukavemet hem de radyasyon geçirmezlik açısından optimize edilmelidir. Bu nedenle, geleneksel kurşun bazlı kalkan malzemelerine alternatif olabilecek çevre dostu ve çok işlevli kompozit sistemlere olan ilgi giderek artmaktadır (Sürücü ve Subaşı 2021).

Literatürde kompozit malzemeler üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Örneğin, Bastuğ (2025) çalışmasında modifiye edilmemiş ABS (Katkı malzemesi olmayan kompozit) malzemeye farklı ağırlık yüzdeleriyle (%5, %10 ve %20) molibden disülfür (MoS_2) ve kalsiyum tungstat (CaWO_4) metal tozları ekleyerek yeni bir kompozit yapı geliştirmiştir. Bu numunelerin koruma özellikleri deneysel ölçümler, teorik hesaplamalar ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Farklı dozaj oranlarında bu katkı maddelerinin uygulanmasından kaynaklanan koruma kapasitesindeki değişiklikler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar,

%20 katkı maddesi içeriğine sahip numunelerin, özellikle düşük enerji seviyelerinde güçlü gama radyasyonu koruma performansı sergilediğini göstermiştir.

Akkaş (2015) yapmış olduğu çalışmada; değişen hacimsel bor karbür oranlarına sahip alüminyum-bor karbür bazlı kompozitlerin gama, beta ve nötron koruma davranışını araştırmıştır. Bu sonuçlardan yararlanarak, alüminyum-bor karbür-tungsten karbür takviyeli kompozitlerin koruma özellikleri daha ileri bir düzeyde analiz edilmiştir. Çalışma, geliştirilen kompozitin radyasyon koruma uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, malzeme bileşiminin optimizasyonunun zırhın başarısını doğrudan etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Büyük (2013) doktora tezinde, gama ve nötron ışıınımı altında tungsten, titanyum ve bor içeren kompozitlerin zayıflama katsayılarını incelemiştir. Bu katsayılar XCOM programı kullanılarak hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bulgular hem bor hem de tungstenin radyasyon kalkanı uygulamalarında etkili malzemeler olduğunu ortaya koymuştur. Böylece hem teorik hem de deneysel veriler kullanılarak kapsamlı bir analiz yapılmıştır.

Kalkan (2025) yüksek lisans tezinde, nanometre ölçeğinde gümüş (Ag) parçacıkları içeren epoksi bazlı kompozitlerin radyasyon koruma etkilerini incelemiştir. On dört farklı kompozit numune, 81 keV ve 356 keV enerjili fotonlarla ışıınlanmıştır. Elde edilen veriler, mikro ve nano ölçekli gümüş ilavesinin doğrusal zayıflama katsayısı, yarı değer kalınlık ve ortalama serbest yol gibi parametrelerde koruma performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu tür katkı maddelerinin özellikle düşük enerjili gama fotonlarına karşı etkili olduğu belirtilmiştir.

Aytimur (2024) yapmış olduğu çalışmasında, etilen vinil asetat kopolimer yerine toz halindeki baryum sülfat, baryum karbonat, tungsten, tungsten karbür, kobalt ve nikel tungsten oksit tozlarını hafif mineral dolgu maddeleri olarak kullanmıştır. Elde edilen kompozit malzemelerin geleneksel kurşun bazlı malzemelere kıyasla daha hafif olduğu ve daha yüksek koruma sağladığı belirlenmiştir. Bu yapıların özellikle taşınabilir radyasyon kalkanlarının üretiminde avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Kural (2019) çalışmasında bor karbürün (B_4C) kırılkan yapısının tek başına kullanımını sınırladığını belirtmiş ve bu nedenle titanyum matris malzemelerine çeşitli oranlarda B_4C ilave edilerek kompozitler üretmiştir. Toz metalurjisi yoluyla elde edilen bu kompozitler, teorik ve deneysel radyasyon kalkanı testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, B_4C içeriğinin artırılmasının kalkan performansını iyileştirdiğini ve radyasyon koruma uygulamaları için umut vaat ettiğini göstermiştir. B_4C 'nin hafif yapısı nedeniyle, yüksek performanslı koruma sağlayan düşük yoğunluklu kompozitler geliştirmek için tercih edilen seçenek haline gelmiştir.

Orbeyi (2018) çalışmasında GEANT4 Monte Carlo simülasyonları kullanarak nükleer yakıt çubuklarında kullanılmak üzere geliştirilen çelik numuneleri analiz etmiştir. Bu numuneler hızlı nötronlar, termal nötronlar ve gama ışınları ile test edilmiş, ardından farklı çelik bileşimleri de deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, nükleer zırhta kullanım için en uygun çelik yapıyı belirlemektir. Bu kapsamlı yaklaşım, malzeme geliştirme ve simülasyon yöntemlerini bir araya getirmiştir.

Kavas (2010) çalışmasında elektromanyetik radyasyonu emebilen nanomalzemeler içeren yapıları araştıran bir çalışmada, nano boyutlu manyetik heksaferritler ve metal kaplı kumaşlar kullanılarak geliştirilen kompozitlerin koruyucu özellikleri değerlendirilmiş, bu yapılar hem askeri hem de sivil uygulamalar için önemli bir potansiyel barındıran neticeler elde edilmiştir.

Eren (2014) çalışmasında nano boyutlu nikel oksit ve demir oksit parçacıkları içeren fiber bazlı kompozitlerin radyasyon koruma etkilerini araştırmıştır. %1 ve %2 oranlarında katkı maddelerinin emilim kapasitesini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu katkı maddelerinin, özellikle düşük dozlu radyasyon ortamlarında etkinliklerini korudukları belirlenmiştir.

Soylu (2014) çalışmasında %50, %60 ve %70 konsantrasyonlarda tungsten karbür içeren disk şeklindeki numunelerin farklı gama kaynaklarına karşı koruyucu performansını test etmiştir. Sonuçlar, özellikle ^{137}Cs kaynağına karşı yüksek verimlilik göstermiş ve tungsten karbürün gama ışınlarına karşı etkili bir koruma malzemesi olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek konsantrasyonlu katkı maddelerinin koruma performansı üzerindeki doğrudan etkisi açıkça gözlemlenmiştir.

Peker (2024) çalışmasında çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilmiş karbon fiber takviyeli epoksi kompozitleri radyasyon koruması açısından değerlendirmiştir. Farklı oranlarda karbon nanotüpler (CNT) ve bor nitrür (BN) nanopartiküllerinin eklenmesiyle oluşturulan numuneler, gama ve nötron kaynaklarına karşı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu yapıların yüksek emilim özellikleri sergilediğini ve etkili koruma adayları olduğunu göstermiştir. Bu tür yapılar, hafiflik ve etkili koruma özelliklerinin bir arada arandığı uygulamalarda tercih edilebilir.

Doğan (2020) çalışmasında esnek ve granüler kopolimer yapıları kullanarak gama radyasyonuna karşı davranışlarını değerlendirmek için deneysel çalışmalar yürütmüştür. Elde edilen veriler, bu tür yapıların hem gama hem de nötron radyasyonuna karşı etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, kompozit yapının morfolojik özellikleri ile koruma etkinliği arasındaki ilişki de analiz edilmiştir.

Radyasyon koruma teknolojileri, nükleer enerji üretimi, tıbbi görüntüleme sistemleri, savunma sanayi ve uzay teknolojileri gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Kurşun gibi atom numarası yüksek metaller geleneksel olarak bu amaçla yaygın olarak kullanılsa da toksik etkileri, çevresel zararları ve işleme zorlukları nedeniyle alternatif malzemeler arayışı hız kazanmıştır. Özellikle, çevre dostu, hafif ve işlevsel kompozit malzemeler son yıllarda öne çıkmıştır.

Kompozit yapılar, matris fazı ve takviye fazının sinerjik özelliklerinden yararlanarak geliştirilen çok bileşenli sistemlerdir. Radyasyon kalkanında kullanılan matrisler arasında çimento, cam, seramik ve sodyum silikat gibi inorganik malzemeler bulunurken, takviye olarak metal oksitler, ağır element parçacıkları ve seramik tozları tercih edilmektedir. Bu tür sistemlerde, yüksek atom numarası ve yoğunluğa sahip takviye malzemeleri, foton etkileşimi yoluyla gama radyasyonunun etkili bir şekilde emilmesini sağlar. Literatürde, Fe_2O_3 , Cr_2O_3 ve NiO gibi geçiş metali oksitlerin radyasyon kalkanında kullanılabilirliği konusunda çok sayıda teorik ve uygulamalı çalışma bulunmaktadır (Tan et al. 2023). Cr_2O_3 ilavesi, özellikle düşük ve orta enerjili gama fotonlarına karşı emilim kapasitesini artırırken, NiO farklı enerji bölgelerinde etkileşim avantajları sağlar. Fe_2O_3 ise manyetik ve kalkan özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu oksitlerin bir kombinasyonu kullanılarak geliştirilen kompozitlerde, katkı maddesi oranlarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, koruma performansını doğrudan etkiler.

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, çevre dostu olmaları, ekonomik uygulanabilirlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle mineral bazlı bağlayıcılar ve silikat bazlı sistemlere olan ilginin arttığını göstermiştir. Özellikle, sodyum silikat bazlı matrislerin camsı yapısı, ağır metal oksitlerin homojen dağılımını kolaylaştırarak yapısal stabilite ve yüksek zırhlama özelliği sağlar. Bu tür sistemlerde cam elyaf, kaolin ve alümina gibi Colofer bileşenlerinin katkı maddesi olarak kullanılması, performansı ve dayanıklılığı daha da artırır. Kalekim gibi çimento bazlı bağlayıcılar da silika, kalsiyum karbonat ve yeniden dağılabilir polimer içeriği sayesinde mastik tipi bir yapının oluşumuna katkıda bulunur. Bu tür matrislerin Colofer Solvent ile kullanılması, mineral ve cam bazlı hibrit mastik yapısı ile sonuçlanır. Bu yapıyı Cr_2O_3 , NiO ve Fe_2O_3 gibi metal oksitlerle güçlendirmek, teorik olarak zırh performansını artırabilir ve mekanik bütünlüğü güçlendirebilir. Ancak, literatürde bu kombinasyonları belirli oranlarda sistematik olarak inceleyen deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmanın amacı, nükleer uygulamalar için yüksek radyasyon koruma performansına sahip mineral ve sodyum silikat bazlı mastik matrisli metal oksit kompozit malzemeler geliştirmektir. Bu doğrultuda, Kalekim ve Colofer Solvent gibi bağlayıcı özelliklere sahip malzemeler kullanılmış ve krom oksit (Cr_2O_3), nikel oksit (NiO) ve demir oksit

(Fe₂O₃) gibi metal oksitlerin belirli kombinasyonları ile kompozit numuneler hazırlanmıştır. Kompozitlerde kullanılan metal oksit katkı maddelerinin oranının değiştirilmesinin koruma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu numuneler daha sonra radyasyon koruma kapasiteleri açısından değerlendirilmiş ve potansiyel nükleer uygulamalar için uygunlukları araştırılmıştır. Geliştirilen kompozitlerin gama radyasyonu koruma performansı, bileşenlerin element bileşimine bağlı olan foton etkileşim kesitleri ve zayıflama katsayıları gibi parametreler temel alınarak WinXCOM yazılımı kullanılarak teorik olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, Cr₂O₃ ve NiO oranlarını karşılıklı olarak değiştirerek deneysel olarak sentezlenen numunelerin radyasyon koruma performansı analiz edilmiştir. Çalışma sadece teorik bir değerlendirme değil, aynı zamanda doğrudan deneysel üretim, karakterizasyon ve hesaplama süreçlerini de içermektedir. Bu bakımdan, literatürdeki bilgi boşluğunu doldurmanın yanı sıra, yeni nesil, kurşunsuz, çok bileşenli koruma malzemelerinin geliştirilmesine de katkıda bulunmaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

Kompozit Malzemeler

Makro ölçekte farklı fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan yapılar “kompozit malzemeler” olarak tanımlanır. Bu tür malzemeler, bileşenlerinin özelliklerinden farklı ve genellikle onlardan daha üstün özellikler sergileyebilir. Kompozit malzemeler, metaller, plastikler, organik veya inorganik katkı maddeleri içerecek şekilde tasarlanabilir. Bu, mukavemet, sertlik, kütle-hacim oranı ve yüksek sıcaklık direnci gibi istenen özelliklerin elde edilmesini sağlar ve bu malzemeleri çok çeşitli uygulamalarda kullanıma uygun hale getirir. Bu çok yönlü avantajlar, mühendislik, savunma, inşaat, otomotiv ve havacılık gibi birçok sektörde tercih edilen seçenek olmalarını sağlar (Aytimur 2024).

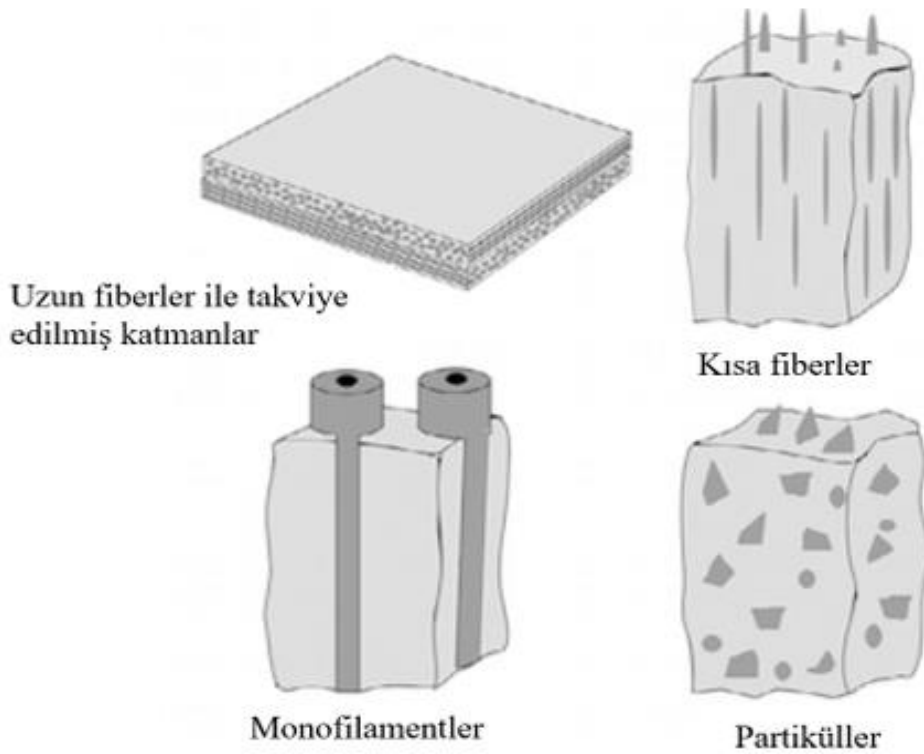
Kompozit yapının merkezinde iki ana bileşen bulunur: takviye elemanı ve matris malzemesi. Takviye elemanı, mekanik mukavemet ve sertlik sağlamak için yapıya dahil edilirken, matris takviye elemanlarını bir arada tutar, üzerlerindeki yükleri eşit olarak dağıtır ve yapının bütünlüğünü korur. Ayrıca matris, takviye elemanlarını çevresel etkilerden (nem, sıcaklık, kimyasal etkileşim vb.) koruyan bir ortam oluşturur. Böylece, yapıya sadece mekanik olarak değil, aynı zamanda termal ve kimyasal direnç açısından da katkıda bulunur. Takviye elemanı ve matrisin birlikte oluşturduğu yapı, kompozit malzemenin mukavemet, dayanıklılık ve hafiflik gibi kritik özelliklerini belirler (Akın 2007).

Takviye malzemesinin matris içinde nasıl konumlandırıldığı ve dağıtıldığı, kompozit malzemenin performansı için çok önemlidir. Uygun dağılım, yük altında gerilme yoğunlaşmasını azaltarak sertliği ve mekanik stabiliteyi artırır. Ancak, matris ve takviye olmak üzere bu iki bileşen birbirleriyle kimyasal bir bağ oluşturmamalıdır. Bu, kompozit yapının istenmeyen deformasyon veya hasara karşı daha dirençli olmasını sağlar. Ayrıca, bileşenlerin farklı termal genleşme katsayıları da dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde, sıcaklık değişiklikleri sırasında yapısal uyumsuzluklar ortaya çıkabilir (Akın 2007).

Kompozit yapılar, arayüzlerle ayrılmış iki veya daha fazla bileşenin birleştirilmesiyle oluşturulur. Her bileşen kendi başına belirli sınırlamalara sahip olabilir; ancak birlikte kullanıldıklarında, bu bileşenler tek başlarına sağlayamadıkları özellikler sergileyebilirler. Böylece, kompozit malzemeler bileşenlerinin bireysel performansının ötesinde avantajlar sağlayabilirler. Betonarme yapılar, ahşap kompozitler ve polimer bazlı kompozitler bu grubun

örnekleridir. Benzer yapılar doğada da mevcuttur. Örneğin, ahşap selüloz liflerinden oluşan doğal bir matris yapısıdır. Kemik, bir matris içindeki inorganik kristallerin birleşmesiyle oluşan doğal bir kompozittir. Bu tür doğal kompozitler tarih boyunca çömlek, tuğla ve yapı malzemeleri gibi alanlarda kullanılmıştır ve günümüzde yapay olarak geliştirilmektedir. Modern kompozitlerin istenen özellikleri, matris içindeki bileşenlerin doğası, oranı, şekli ve dağılımına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, malzeme tasarlanırken hem fiziksel hem de kimyasal uyumluluk dikkate alınmalıdır.

Kompozit yapının ana bileşenlerinden biri olan matris, sadece yapısal bir bağlayıcı görevi görmekle kalmaz, aynı zamanda liflerin doğru hizalanmasını ve etkili yük taşıma kapasitesini de sağlar. Matris ayrıca lifleri dış çevre koşullarından korur. Öte yandan, takviye malzemeleri kompozit yapıya gerekli sertlik ve mukavemeti sağlar. Bazı durumlarda, matrise eklenen dolgu malzemeleri maliyetleri düşürebilir ve mekanik ve termal özellikleri iyileştirebilir. Matris içindeki dolgu malzemelerinin şekli, boyutu ve homojen dağılımı, kompozit malzemenin genel performansını doğrudan etkiler (Peker 2024).



Şekil 1. Takviye elemanına göre çeşitleri

Kompozit malzeme tasarımının temel ilkeleri, sertlik, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık direnci, elektrik iletkenliği, çekme mukavemeti, hafiflik, aşınma ve korozyon direnci, ekonomik üretim olanakları, estetik görünüm ve termal iletkenlik gibi çeşitli özellikleri bir araya getirmeyi amaçlamaktadır (Akbulut 2010).

Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, çok yönlü özellikleri ve yapısal çeşitlilikleri nedeniyle çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma genellikle kullanılan matris malzemesi ve takviye elemanının türüne dayanır. Her sınıf, kompozit malzemeye farklı özellikler kazandırır ve uygulama alanlarını doğrudan etkiler. Kompozitlerin temel sınıflandırması aşağıdaki Şekil 2’de özetlenmiştir (Süral 2025).

Metal Matris Kompozitler: Yapıları içinde metal bazlı matris malzemeleri içerir. Bu sınıf, takviye elemanının etkisiyle kompozite yüksek sertlik, mukavemet ve dayanıklılık gibi özellikler kazandırır. Mekanik performansın öncelikli olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Otomotiv, havacılık, uzay ve nükleer sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Hem hafiflik hem de yüksek mukavemet gerektiren bu alanlarda, metal matris kompozitler önemli bir alternatif sunar.

Polimer Matris Kompozitler: genellikle fiber takviye ile güçlendirilir. Hafiflikleri, yüksek mukavemetleri ve üretim kolaylıkları nedeniyle en yaygın kullanılan kompozit sınıfı olarak öne çıkarlar. Elektrik iletkenliği, darbe direnci ve işlenebilirliği ile öne çıkan bu grup, havacılık, uzay, savunma sanayi, inşaat ve denizcilik gibi çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Polimer matris kompozitler, çok çeşitli yapısal ve işlevsel özellikler sunar.

Seramik Matris Kompozitler: Yüksek sıcaklık direnci gerektiren ortamlarda tercih edilmektedir. Matriste seramik yapıların kullanılması, bu malzemelere yüksek oksidasyon direnci kazandırmaktadır. Seramik matris kompozitler, metal veya karbon bazlı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha kararlı özellikler sergilerler, bu da onları nükleer enerji sistemleri, gaz türbinleri, uzay ve havacılık gibi ileri teknoloji alanlarında kullanıma uygun hale getirir (Akın 2007).

Son yıllarda, mastik matris kompozitler inşaat kimyasalları, sızdırmazlık sistemleri ve radyasyon kalkanı alanlarında da ön plana çıkmıştır. Mastik malzemeler genellikle elastomerik veya inorganik bağlayıcılara dayalı viskoz matrislerden oluşur. Bu kompozitlerde, mekanik mukavemet ve fonksiyonel özellikleri (örneğin radyasyon soğurma) geliştirmek için matris seramik tozları veya metal oksitlerle güçlendirilir.

Özellikle sodyum silikat bazlı mastik kompozitler, yüksek termal stabilite ve kimyasal direnç gibi avantajlar sunar, bu da onları özel mühendislik uygulamaları için tercih edilir kılar. Ayrıca, silikon karbürle güçlendirilmiş asfalt mastiklerle ilgili yapılan bir çalışmada, mikrodalga ısıtma ile kendi kendini onarma özellikleri gözlemlenmiş ve optimal güçlendirme oranının %40 olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, mastik matris kompozitlerinin sadece

sızdırmazlık veya yalıtım amaçlı değil, aynı zamanda mekanik mukavemeti artıran ısı ile aktive olan fonksiyonel yapılar olarak da geliştirilebileceğini göstermektedir (Sur 2008).



Şekil 2. Kompozit malzemeler ve sınıflandırılması

Elyaf Takviyeli Kompozitler: Matris malzemesine uygulanan yük, lif takviyesine aktarılır ve böylece numuneye esneklik ve kırılma tokluğu kazandırır. Lifler farklı yönlerde ve çeşitli şekillerde kullanılabilir. Bu esneklik, kompozit yapının istenen mekanik özelliklere göre şekillendirilmesini sağlar. Takviye elemanı dokuma, şerit veya levha şeklinde olabilir ve yönelimi kompozitin mukavemet davranışını doğrudan etkiler. Matris uygulanan kuvveti fibere iletirken, fiber bu kuvvetleri taşıyarak yapısal bütünlüğe katkıda bulunur. Fiber takviye sayesinde malzeme sadece dayanıklı değil, aynı zamanda hafif ve enerji emici hale gelir.

Tabakalı Kompozitler: Bunlar, farklı fiber düzenlemelerine sahip kompozitlerin belirli bir sırayla birleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Bu yapıların amacı, kompozit katmanların birbirleriyle uyum içinde çalışarak sertlik ve mukavemet sağlamaktır. Katmanlı yapılar, farklı yönlerden gelen yüklerin eşit dağılımını sağlayarak yapı boyunca dengeli bir mukavemet elde edilmesini sağlar. Liflerin yönlü düzeni, gerilim, eğilme ve burulma gibi çok eksenli yükleme koşulları altında malzemenin performansını artırır. Bu tür kompozitler, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri gerektiren mühendislik uygulamalarında özellikle tercih edilir.

Parçacık Takviyeli Kompozitler: Bunlar, matris içinde dağılmış parçacıklar şeklinde takviye elemanları eklenerek elde edilen kompozit yapılardır. Bu sistemde yük hem matris hem de takviye parçacıkları tarafından paylaşılır. Amaç, dengeli mekanik özellikler geliştirmek için homojen bir dağılım elde etmektir. Bu tür kompozitler, mukavemetin yanı sıra aşınma direnci,

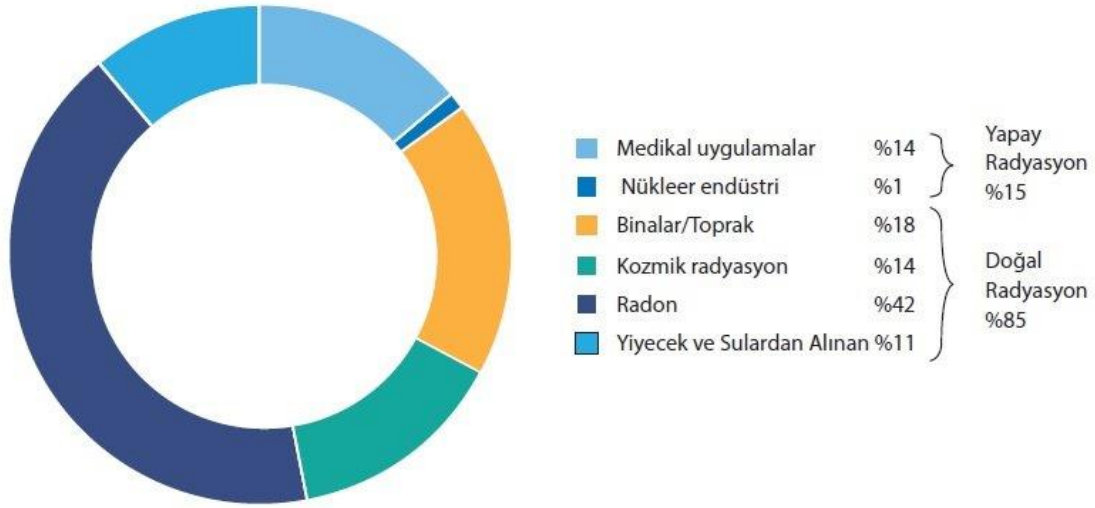
termal iletkenlik veya elektriksel iletkenlik gibi belirli özellikleri de geliştirmek için tasarlanmıştır. Bu yapılar, özellikle seramik veya metal bazlı takviyelerle elde edilenler, çeşitli mühendislik alanlarında uygulama bulmaktadır (Aslan 2017).

Radyasyon

Radyasyon, atom çekirdeklerinin kararsız hale gelmesi sonucunda çevreye yayılan enerji taşıyan parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar şeklinde tanımlanır. Kökenine göre radyasyon, doğal kaynaklardan oluşanlar ve yapay kaynaklardan oluşanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Doğal radyasyon; kozmik ışınlar ve toprakta bulunan radyoaktif maddelerden kaynaklanırken, yapay radyasyon tıbbi cihazlar ve nükleer santraller gibi insan yapımı kaynaklardan kaynaklanır. Enerji açısından ise radyasyon, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere sınıflandırılır. İyonlaştırıcı radyasyon, atomlardan elektronları koparabilme yeteneğine sahiptir ve bu özelliğı nedeniyle canlı hücrelerde DNA hasarına, mutasyonlara ve çeşitli sağık sorunlarına yol açabilir. Buna karşılık, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon daha düşük enerji taşır, doğrudan iyonlaşma meydana getirmez ancak yüksek yoğunluklarda ısı oluşumuna bağılı olarak dokularda termal hasarlara neden olabilir. Radyasyonun canlı organizmalar üzerindeki etkileri, maruz kalma süresi, doz ve radyasyon türüne bağılı olarak değışiklik gösterir; etkiler hücresel seviyeden organ düzeyine kadar farklı biçimlerde ortaya çıkabilir. Bu nedenlerle, radyasyonun biyolojik etkilerinin iyi anlaşılması, etkili koruyucu yöntemlerin geliştirilmesi ve güvenli kullanım standartlarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Omer 2021; Wang et al. 2008).

Oluşumuna Göre Radyasyon Türleri

Radyasyon, kaynağına göre doğal radyasyon ve yapay radyasyon olarak ikiye ayrılır. Doğal radyasyon, kozmik ışınlar ve yeryüzündeki radyoaktif maddelerden meydana gelirken, yapay radyasyon insan faaliyetleri sonucu oluşmaktadır. Bu sınıflandırma, radyasyonun özelliklerini ve etkilerini anlamada temel bir adımdır. Araştırmalara göre, insanların maruz kaldığı toplam radyasyonun yaklaşık %85'i doğal, %15'i ise yapaydır. Bu dağılım aşağıdaki şekilde özetlenmiştir (Afad 2021).



Şekil 3. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarına ait genel sınıflandırma

Doğal radyasyon

Doğal radyasyon, insan etkisi olmadan doğada bulunan radyoaktif elementler ve kozmik ışınlar tarafından yayılan enerji türüdür. İnsanlar yaşamları boyunca çeşitli doğal kaynaklardan belirli düzeylerde radyasyona maruz kalırlar; bu maruziyet, yaşamın var olduğu her ortamda kaçınılmazdır. Güneş ve uzaydan gelen kozmik ışınlar, doğal radyasyonun önemli kaynaklarındandır. Bu ışınlar, Dünya atmosferi ve manyetik alanı tarafından büyük ölçüde filtrelenmekle birlikte özellikle yüksek rakımlı bölgelerde yaşayanlar ve sık sık uçakla seyahat edenler üzerinde daha belirgin etkiler yaratır. Kişi başına düşen yıllık ortalama kozmik radyasyon dozu yaklaşık 0,39 milisievert (mSv) civarındadır.

Bunun yanı sıra, Dünya yüzeyindeki toprak ve kayalarda bulunan radyoaktif izotoplar da çevresel radyasyonun önemli bir kaynağıdır. Bu doğal elementlerin yaydığı radyasyon, yılda ortalama 0,46 mSv’lik bir maruziyete yol açar. İnsan vücudundaki biyokimyasal süreçler sonucu ortaya çıkan iç radyasyon ise kişi başına yıllık yaklaşık 0,23 mSv katkı sağlar. Doğal radyasyon kaynakları arasında en yüksek maruziyet oranı, yer kabuğundaki radyum elementinin radyoaktif bozunmasıyla oluşan radon gazına aittir. Radon, kapalı alanlarda birikebilen renksiz, kokusuz ve kimyasal olarak inert bir gazdır ve solunması halinde vücuda zarar verebilir. Dünya genelinde bu gazdan kaynaklanan yıllık ortalama maruziyet dozu yaklaşık 1,3 mSv’dir. Toplam doğal radyasyon maruziyeti, kişinin bulunduğu çevre koşullarına göre değişse de günlük hayatın doğal ve kaçınılmaz bir parçası olarak kabul edilir (Gökharman vd 2016).

Radyoaktivite ise kararsız atom çekirdeklerinin enerji yayarak daha kararlı hale gelme sürecidir. Bu süreçte çekirdek, alfa, beta veya gama ışınları gibi farklı radyasyon türleri yayar. Radyoaktivitenin temel sebebi, çekirdek içindeki proton ve nötron sayılarının dengesizliği olup,

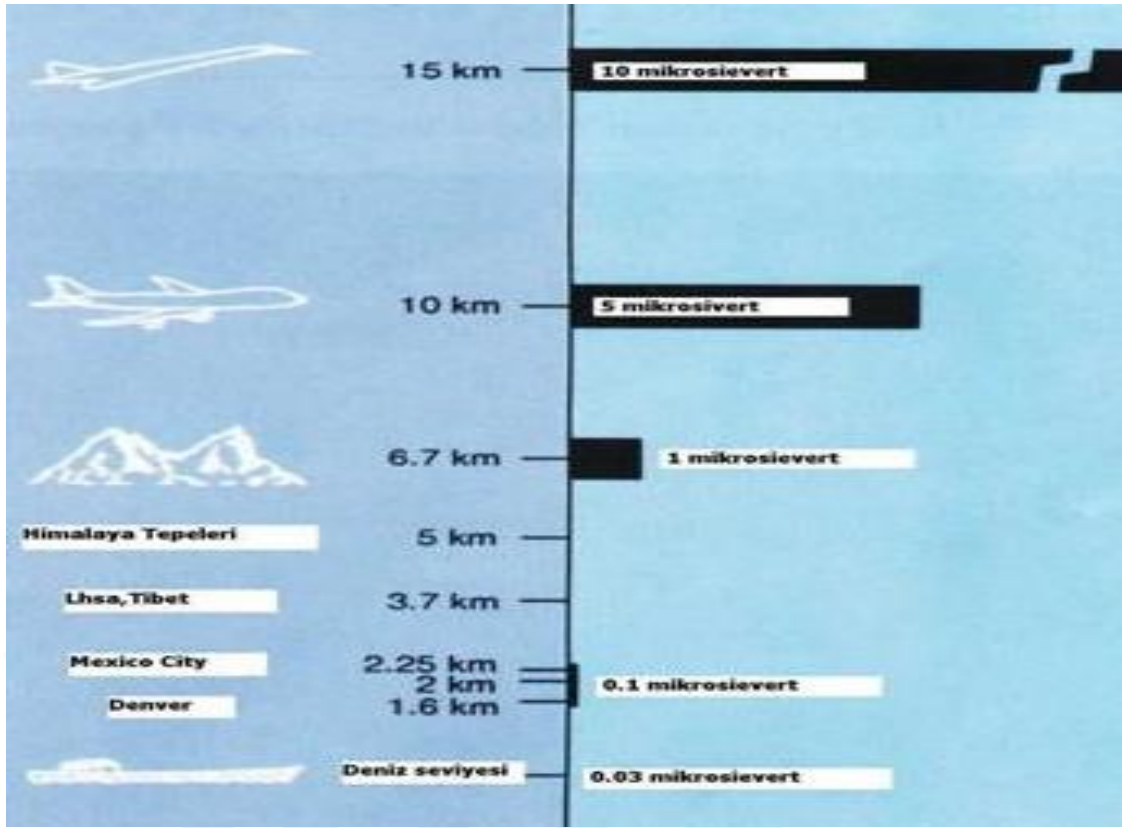
bu durum çekirdeğin kararsızlaşmasına yol açar. Zamanla çekirdek, daha kararlı bir yapı kazanmak için bozunur ve bu bozunma sırasında enerji açığa çıkar. Doğada uranyum, toryum ve radyum gibi elementlerde kendiliğinden gerçekleşen bu süreç, çevre ve canlılar için önemli bir radyasyon kaynağıdır (Turşucular ve Varol 2023).

Doğal radyasyonun önemli bir kısmı, gıda, içme suyu ve çevre yoluyla alınan radyoaktif elementlerden kaynaklanır. Özellikle potasyum gibi doğal radyoaktif izotoplar, besin zinciri aracılığıyla vücuda girebilir. Ayrıca, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), doğal radyasyon kaynaklarını kozmik radyasyon, karasal kozmik radyasyon, karasal radyasyon, solunan radyasyon ve yiyeceklerle alınan radyasyon olarak beş ana gruba ayırmaktadır (Hacıosmanoğlu 2017).

Kozmik radyasyon

Kozmik radyasyon, evrendeki yüksek enerjili olaylar tarafından üretilen ve Dünya'nın atmosferine ulaşabilen parçacıklardan oluşur. Bu parçacıklar genellikle süpernova patlamaları, yıldız çarpışmaları ve Güneş'ten gelen koronal kütle atımları gibi şiddetli olaylar sırasında yayılır. Dünya'ya ulaşan kozmik radyasyonun yaklaşık %98'i pozitif yüklü protonlardan oluşurken, geri kalan %2'si negatif yüklü elektronlardan ve çok az miktarda alfa parçacıklarından oluşur. Bu yüksek enerjili parçacıklar atmosferin üst katmanlarıyla çarpışarak ikincil parçacıklar üretir ve bu süreç radyasyonun enerji seviyesini ve etki alanını doğrudan etkiler. Sağlık açısından, özellikle Güneş'ten gelen düşük enerjili ışınlar, maruz kalma süresi ve dozu yeterliyse risk oluşturabilir. Dünya'nın atmosferi, kozmik ışınların büyük bir kısmını filtreleyerek yüzeydeki canlıları korur. Ancak, atmosfer yoğunluğunun azaldığı yüksek rakımlı bölgelerde bu koruyucu etki zayıflar ve kozmik radyasyon dozu artar (Burak 2024). Bu, özellikle yüksek rakımlı bölgelerde çalışan kişiler için kritik bir husustur.

Şekil 4, rakım ve kozmik radyasyon dozu arasındaki ilişkiyi açıkça göstermektedir. Deniz seviyesinde kozmik radyasyon dozu yaklaşık 0,03 mikrosievert iken, 1,6-2,25 kilometre rakımda bulunan Denver ve Mexico City gibi şehirlerde bu değer yaklaşık 0,1 mikrosievert'e yükselir. Lhasa (Tibet) ve Himalayalar gibi daha yüksek bölgelerde, 3,7 ile 6,7 kilometre arasındaki irtifalarda doz 1 mikrosievert'e ulaşır. Ticari uçakların seyir irtifası olan 10 kilometre yükseklikte maruz kalma yaklaşık 5 mikrosievert, 15 kilometre yükseklikte ise 10 mikrosievert seviyelerine ulaşabilir. Bu veriler, havacılık personeli, pilotlar ve sık seyahat edenlerin daha yüksek kozmik radyasyon seviyelerine maruz kaldığını açıkça göstermektedir (Özgen 2016).



Şekil 4. Radyasyonun yüksekliğe göre etkisi

Karasal radyasyon

Yer radyasyonu, radyoaktif elementlerin doğal bozunması sonucu Dünya yüzeyine yayılan bir tür iyonlaştırıcı radyasyondur. Dünya doğal olarak çok sayıda radyoaktif izotop içerir. Bu izotopların en yaygın olanları Karbon-14 (^{14}C), Potasyum-40 (^{40}K), Uranyum-238 (^{238}U) ve Toryum-232 (^{232}Th) 'dir. Bu izotoplar, kararsız nükleer yapıları nedeniyle sürekli olarak alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonu yayarlar ve böylece çevredeki radyasyon seviyelerine katkıda bulunurlar.

Uranyum-238 ve Toryum-232, yer kabuğundaki toprak ve kayalarda ve ayrıca yeraltı sularında doğal olarak düşük konsantrasyonlarda bulunurlar. Buna karşılık, potasyum-40 ve karbon-14, organik yapının bir parçası oldukları için tüm canlı organizmaların dokularında yaygın olarak bulunurlar. Bu, insanların yaşamları boyunca iç radyasyona maruz kalmalarına neden olur. Ayrıca, tarımda fosfat içeren gübrelerin yaygın kullanımı, toprağa ek radyoaktif elementler katarak yerel radyasyon seviyelerini artırabilir.

Bu radyoaktif maddelere maruz kalma, sadece çevresel temas yoluyla değil, aynı zamanda besin zinciri, içme suyu ve solunum gibi yollarla da gerçekleşebilir. Bu yollarla vücuda giren radyoaktif izotoplar, özellikle hücresel düzeyde biyolojik etkilere neden olma potansiyeline sahiptir. Uzun süreli maruz kalmanın belirli sağlık risklerini artırabileceği bilinmektedir (Yüksel 2024).

Dünyanın ve Türkiye'nin belirli bölgelerinde ölçülen doğal radyasyon seviyeleri, jeolojik yapı ve yerel jeolojik özelliklere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu farklılıklar, toprak türü, mineraloji ve insan kaynaklı etkiler gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Örnek radyasyon seviyelerine ilişkin veriler Tablo 1'de sunulmuştur (Hacıosmanoğlu 2017).

Tablo 1. Dünyada ve Ülkemizdeki Bazı Bölgelerin Radyasyon Seviyeleri

MERSİN (AKKUYU)	0,53 mSv/yıl
ANKARA	0,44 mSv/yıl
IĞDIR	0,88 mSv/yıl
ÇANAKKALE	1,23 mSv/yıl
KARS	1,58 mSv/yıl
HİNDİSTAN (KERELA)	15,80 mSv/yıl
İRAN (RAMSAR)	148,92 mSv/yıl
BREZİLYA	788,40 mSv/yıl

Yiyecek ve içeceklerle alınan radyasyon (İngestion yoluyla maruziyet)

Gıdalar yoluyla radyasyona maruz kalma, radyoaktif maddelerin ağız yoluyla vücuda girmesiyle meydana gelen bir tür iç maruziyettir. Bu maruziyetin ana kaynakları, toprak, su ve atmosferde doğal veya yapay olarak bulunan radyoaktif izotoplardır. Bu izotoplar, tarım ürünleri, hayvansal gıdalar ve içme suyu yoluyla insan besin zincirine girer. Gıda üretim süreçlerinin çevresel kirlenmeye karşı duyarlılığı, özellikle nükleer kazalar veya uzun süreli çevresel kirlilik durumunda önemli bir risk oluşturur.

Doğal radyoaktif izotoplar arasında Potasyum-40 (K-40), Karbon-14 (C-14), Uranyum-238 (U-238) ve Toryum-232 (Th-232) bulunurken, yapay radyoaktif izotoplar arasında Sezyum-137 (Cs-137), Strontium-90 (Sr-90) ve Iodine-131 (I-131) bulunur. Bu yapay izotoplar çoğunlukla nükleer santral kazaları, nükleer silah testleri veya tıbbi ve endüstriyel faaliyetler sonucunda çevreye salınır. İnsanlar bu izotopları süt, et, sebze, meyve ve su gibi temel gıda maddeleri yoluyla doğrudan vücutlarına alabilirler.

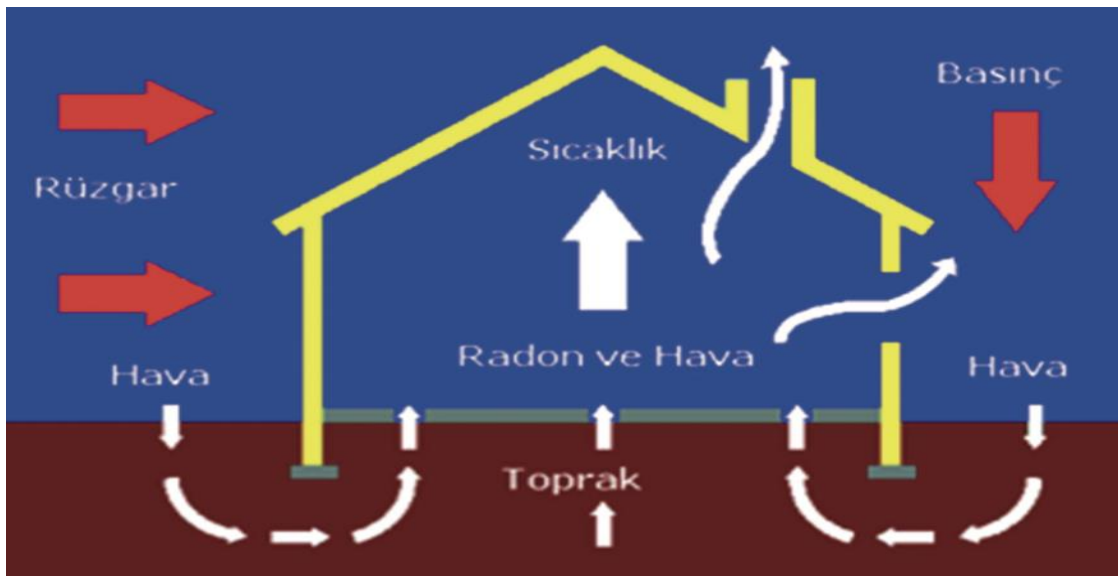
Bazı izotoplar vücudun belirli dokularında birikme eğilimindedir. Örneğin, stronsiyum-90 kalsiyumun yerini alarak kemik dokusunda birikme eğilimindedir ve bu da uzun vadede lösemi gibi hematolojik kanserlere yol açabilir. Benzer şekilde, sezyum-137 özellikle kas dokusunda birikebilir ve uzun bir süre boyunca düşük dozda radyasyon yayabilir (Yüksel 2024). Yutulmanın (oral maruziyet) etkisi, tüketilen gıdanın türüne, içerdiği radyonüklidlerin konsantrasyonuna, söz konusu izotopların biyolojik yarı ömürlerine ve kişinin yaşı, cinsiyeti ve metabolizma hızı gibi kişisel özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Radyoaktif maddeler, besin zincirinde ilerledikçe hem biyobirikim hem de biyomagnifikasyon yoluyla etkilerini artırabilir.

Bu, özellikle besin zincirinin tepesindeki organizmalar için daha yüksek bir risk oluşturur (Yüksel 2024).

Solunan radyasyon (İnhalasyon yoluyla maruziyet)

Solunum yoluyla emilen radyasyon, çevrede bulunan radyoaktif maddelerin solunum sistemi yoluyla vücuda girmesi sonucu meydana gelen bir tür iç maruziyettir. Bu maruziyetin en önemli kaynağı, havada serbest halde bulunan radon (Rn) gazı ve kısa ömürlü bozunma ürünleridir. Solunum yoluyla akciğerlere ulaşan bu radyoaktif maddeler, zamanla dokularda birikerek hücresel düzeyde zararlı etkilere neden olabilir. Radon gazı, yer kabuğunda bulunan radyum-226 ($Ra-226$) elementinin radyoaktif bozunmasıyla oluşan renksiz, kokusuz ve tatsız bir soy gazdır. Granit ve fosfat içeriği yüksek kayalarda ve topraklarda doğal olarak bulunur. Doğal bir radyasyon kaynağı olmasına rağmen, kapalı ve havalandırması yetersiz ortamlarda biriktiğinde ciddi sağlık riski oluşturur.

Radon gazı çevrenin doğal bir bileşeni olmasına rağmen, maruz kalmanın artması akciğer kanseri gibi hastalıkların riskini artırabilir. Bu nedenle, yaşam alanlarının düzenli olarak havalandırılması, iç mekanlardaki radon seviyelerini azaltmanın en etkili yollarından biridir. Ayrıca, bina yalıtımında kullanılan bazı malzemelerin iç mekanlarda radon birikmesine neden olabileceği unutulmamalıdır. Bodrum katları ve zemin seviyesine yakın alanlar özellikle risk altındadır. Küresel olarak, radon gazına maruz kalma yıllık ortalama dozunun yaklaşık 1,2 milisievert (mSv) olduğu bildirilmektedir (Hacıosmanoğlu 2017). Bu miktar, toplam doğal radyasyon dozunun en büyük bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Aşağıdaki şekilde radon gazının yerden ev ortamına sızabileceği yolları ve iç mekanlarda nasıl birikebileceğini görsel olarak göstermektedir (Afad 2021).



Şekil 5. Radonun yapı içine transfer süreci

Radon gazının ana kaynağı yer kabuğudur. Ancak bununla sınırlı değildir, çünkü radon gazı doğal olarak yeraltı sularında, doğal gazda, inşaat malzemelerinde, binaların bodrum ve zeminlerindeki çatlaklarda ve belirli toprak ve kaya türlerinde de bulunabilir. Radon yayılımının kaynakları aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir:

- Toprak ve kayadan kaynaklanan radon
- İnşaat malzemelerinden yayılan radon
- Doğal gaz yoluyla taşınan radon
- İçme suyu ve yeraltı sularından gelen radon
- Binalardaki çatlak ve sızıntılardan gelen radon

Şekil 5'te gösterildiği gibi, radon gazı oluşum yerlerinin coğrafi haritalandırılması, bu gazın binalara sızmasını önlemek için mühendislik çözümleri ve kentsel planlama önlemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunur. Özellikle kırsal alanlarda, radon bakımından zengin topraklarda inşa edilmiş binalar veya zemine doğrudan temas eden evler, radona maruz kalma riskini artırabilir. Bu nedenle, bu tür binalarda radon seviyelerinin düzenli olarak ölçülmesi halk sağlığı açısından büyük önem taşır.

Radon ölçümleri, maruziyeti tespit etmek için değil, aynı zamanda iç mekân hava değişim oranlarını tahmin etmek, yapısal iyileştirme gereksinimlerini belirlemek ve havalandırma sistemlerini optimize etmek için de değerli bilgiler sağlar. Ancak, aynı bölgedeki ve görünüşte benzer fiziksel koşullara sahip binalar arasında bile radon seviyelerinin önemli ölçüde değişebileceği dikkat çekicidir. Bu farklılıklar, binanın inşaat malzemeleri, temel yalıtımı, toprak geçirgenliği, hava sirkülasyon seviyesi ve çatlakların varlığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Ayrıca, radon gazı havadan daha ağır olduğu için alt katlarda, bodrumlarda ve zemin seviyesine yakın kapalı alanlarda birikme eğilimindedir. Bu fiziksel özelliği nedeniyle, iç ortamlarda radon konsantrasyonunu azaltmak için uygun şekilde tasarlanmış havalandırma sistemlerinin uygulanması çok önemlidir. Etkili havalandırma ve yapısal iyileştirmeler, radonla ilişkili sağlık risklerini en aza indirebilir (Gelgün 2010).

Yapay radyasyon

İnsanlar, teknolojik ve bilimsel ilerlemeler doğrultusunda çeşitli yapay radyasyon kaynaklarına maruz kalmaktadır. Bu kaynaklar, insan eliyle oluşturulan radyasyon türleri olup, genellikle yaşam kalitesini artırmaya yönelik sağlık, enerji ve endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Yapay radyasyon kaynaklarından alınan dozlar, genel olarak doğal radyasyon kaynaklarından alınan dozlara göre daha düşük seviyelerde olmasına karşın, bu dozların bilinçli

olarak üretilmesi ve ölçülebilir olması, onları çevresel radyasyon açısından önemli hâle getirmektedir (Gelgün 2010).

Yapay radyasyonun bir diğer ayırt edici özelliği ise kaynağın üretilebilir, kontrol edilebilir ve gerektiğinde durdurulabilir olmasıdır. Bu durum, bireylerin aldığı dozun izlenmesini ve sınırlandırılmasını mümkün kılar. Bu özellik, doğal radyasyon kaynaklarıyla karşılaştırıldığında yapay radyasyonun yönetilebilirliğini ön plana çıkarır. Modern teknolojiler sayesinde yapay kaynaklardan yayılan radyasyon düzeyleri genellikle belirlenen sınır değerler içinde tutulabilmektedir. Bununla birlikte, radyasyon güvenliği ilke ve protokollerine uyulması, özellikle sağlık hizmetlerinde çalışan personel ve radyasyon içeren cihazlarla temas hâlindeki bireyler için hayati öneme sahiptir (Bakar 2012).

Yapay radyasyon, insanlar tarafından üretilen ve çeşitli teknolojik, tıbbi veya endüstriyel amaçlarla kullanılan iyonlaştırıcı radyasyonu ifade eder. Bu tür radyasyon doğal olarak oluşmaz, ancak insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yapay radyasyonun ana kaynakları arasında tıbbi uygulamalar, yapay olarak üretilen radyoaktif maddeler, tüketici ürünlerindeki radyoaktif bileşenler, endüstride kullanılan X ışınları ve nükleer testlerden kaynaklanan radyoaktif serpinti yer alır (Özgen 2016).

Nükleer santraller, yüksek düzeyde radyasyon yayma potansiyeli nedeniyle en önemli yapay kaynaklardan biri olarak kabul edilir. Bu tesislerde, uranyum-235 gibi ağır çekirdekli elementlerin fisyonu yoluyla büyük miktarda enerji elde edilir ve bu enerji elektrik üretimi gibi amaçlar için kullanılır. Ancak, bu süreçte oluşan fisyon ürünlerinin çoğu, zamanla iyonlaştırıcı radyasyon yayan kararsız (radyoaktif) çekirdeklerdir. Bu durum, çevre ve insan sağlığı için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Poyarkov 2018).

Tıbbi uygulamalar, yapay radyasyon kaynaklarının en yaygın kullanım alanlarından biridir. Özellikle, iyonlaştırıcı radyasyon, kanser tedavisinde kullanılan tanısal görüntüleme teknikleri (X-ışınları, bilgisayarlı tomografi) ve radyoterapi prosedürlerinde kaçınılmazdır. Bu uygulamalarda X-ışınları ve gama ışınları yoğun olarak kullanılmaktadır. Araştırmalara göre, bireylerin yapay radyasyon kaynaklarından aldıkları toplam dozun önemli bir kısmı bu tıbbi prosedürlerden kaynaklanmaktadır. Ancak, tıbbi radyasyon uygulamaları uygun doz ve süre ile kontrol edildiğinde, fayda-risk dengesi sağlanabilir.

Endüstriyel uygulamalarda, X ışınları ve gama ışınları, malzeme kusurlarının tespiti, kalınlık ölçümü, yoğunluk analizi ve kalite kontrolü gibi birçok alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda genellikle yüksek enerjili radyasyon kaynakları tercih edilir ve bu, çalışanlar için mesleki maruziyet açısından özel önlemler alınmasını gerektirir (Hacıosmanoğlu 2017).

Tüketici ürünleri de az miktarda yapay radyasyon içerebilir. Örneğin, fosforlu saatler, duman dedektörleri, bazı floresan lambalar ve eski tip televizyon tüpleri eser miktarda radyoaktif bileşenler içerebilir. Ayrıca, fosfat gübreleri, kömür ve bazı inorganik hammaddeler doğal olarak düşük seviyelerde uranyum ve toryum içerebilir. Bu malzemelerden elde edilen ürünlerin kullanımı da yapay radyasyona ikincil maruziyete neden olabilir (Burak 2024).

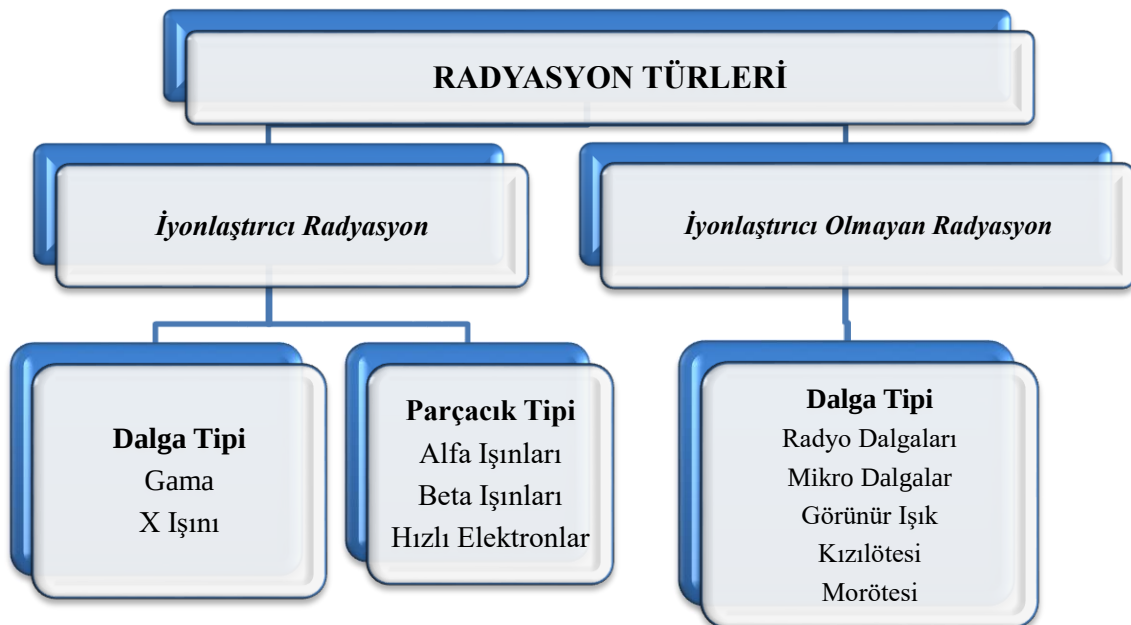
Hem atmosferde hem de yeraltında gerçekleştirilen nükleer silah testleri, yaygın çevresel etkiye neden olan yapay radyasyon kaynakları arasındadır. 20. yüzyılın ortalarında yoğunlaşan bu testler sırasında, atmosferik radyoaktivite seviyelerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. Sonuçta ortaya çıkan radyoaktif serpinti, toprak, su ve hava yoluyla canlı organizmaları doğrudan etkilemiş ve uzun vadeli çevresel ve genetik sonuçlara yol açmıştır (Özgen 2016).

Sonuç olarak, yapay radyasyon kaynakları sıkı kontrol altında kullanılabilen, ölçülebilen ve genellikle yararlı uygulamalarda rol oynayan unsurlar olsa da güvenlik protokolleri uygulanmadığında ciddi sağlık ve çevre riskleri oluşturabilirler. Bu nedenle, yapay radyasyonun kullanıldığı tüm alanlarda, düzenli doz ölçümleri, maruz kalma sınırları, koruyucu ekipman kullanımı ve eğitilmiş personel gibi önlemler sıkı bir şekilde uygulanmalıdır.

Enerjisine Göre Radyasyon Türleri

Aşağıda sunulan tabloda da belirtildiği üzere, radyasyon temel olarak iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Soylu 2014).

Tablo 2. Radyasyon Türlerinin Enerjiye Göre Sınıflandırılması



İyonlaştırıcı radyasyon, temas ettiği madde üzerinden elektron kopararak iyonlaşmaya neden olan yüksek enerjili bir radyasyon türüdür. Bu tür radyasyon, maddeyle etkileşime girdiğinde elektrik yüklü parçacıklar (iyonlar) oluşmasına yol açar. X-ışınları ile radyoaktif elementlerden yayılan gama ışınları, bu grupta yer almakta ve iyonlaştırıcı radyasyon olarak tanımlanmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun maddeyle teması, maddenin elektron kaybetmesine veya kazanmasına neden olur; bu süreç iyonlaşma olarak adlandırılır ve canlı dokularda önemli biyolojik etkiler yaratabilir (Şenlik 2010).

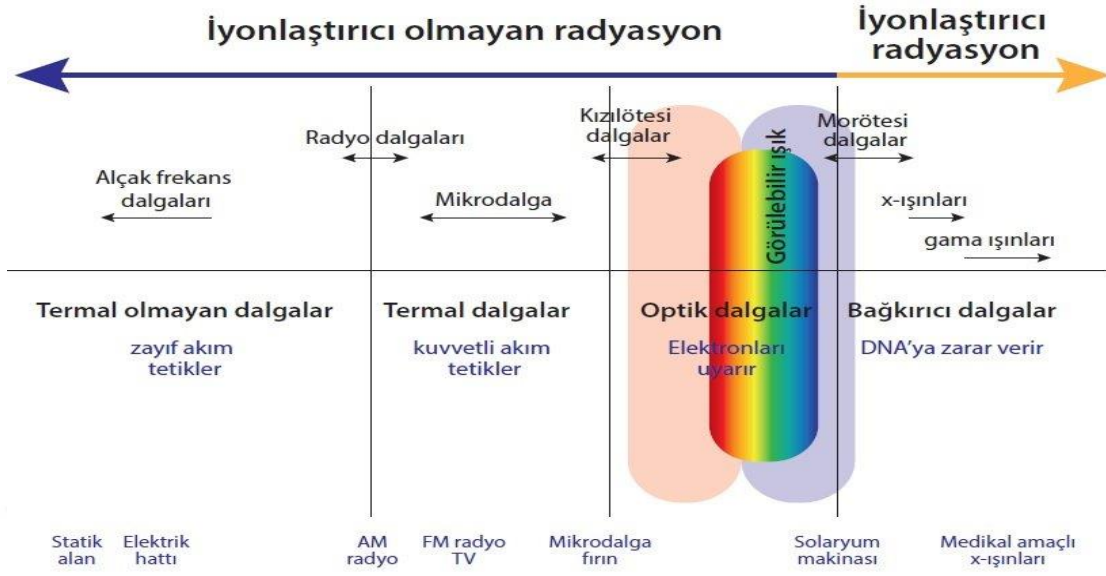
İyonlaştırıcı radyasyon genel olarak dalga özelliği gösterenler ve parçacık özelliği gösterenler olmak üzere iki gruba ayrılır. Dalga karakteri taşıyanlar X-ışınları ve gama ışınlarıdır. Parçacık radyasyonuna örnek olarak ise alfa ve beta parçacıkları verilebilir (Şenlik 2010). Öte yandan, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon, daha düşük enerjiye sahip olup iyonlaşmaya neden olamaz. Güneşten gelen görünür ışık ve kızılötesi ışınlar bu grupta yer almaktadır. Ayrıca, yıldızlar, galaksiler ve diğer gök cisimlerinden yayılan radyo dalgaları, iyonlaştırıcı olmayan radyasyon kaynakları arasında yer alır. Dünyanın çekirdeğindeki hareketlerden kaynaklanan manyetik alanlar da bu gruba dâhildir. Günlük yaşamda insanlar bu tür radyasyona; yüksek gerilim hatları, trafolar, elektrikli ev aletleri, baz istasyonları, cep telefonları ve bazı tıbbi cihazlar aracılığıyla maruz kalmaktadır (Koralay 2023).

İyonlaştırıcı olmayan radyasyon; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi ışınlar, görünür ışık ve ultraviyole ışıklardan oluşur. Görünür ışık, insan gözü tarafından algılanabilen elektromanyetik dalgalar olup, atomları ısı yoluyla uyararak enerji yayılımına neden olur. Ultraviyole ışınlar ise uzak, orta ve yakın UV olarak üçe ayrılır. Kızılötesi ışınlar, maddeler tarafından soğurulduğunda ısı oluşumuna yol açar ve ısı radyasyonu meydana gelir. Mikrodalgalar, mikrodalga fırınlar, iletişim sistemleri ve radar teknolojilerinde kullanılırken; radyo dalgaları, düşük enerjiye ve uzun dalga boyuna sahip olmaları nedeniyle en az ısı yayan radyasyon türüdür (Baykal 2019).

İyonlaştırıcı parçacık radyasyonu; alfa, beta, proton, nötron ve elektron gibi kütleli ve enerjik parçacıklardan oluşur. Bu parçacıklar oldukça yüksek hızlarda hareket ederler. Buna karşılık, iyonlaştırıcı dalga radyasyonu, ışık hızına yakın hareket eden ve enerji paketçikleri (fotonlar) şeklinde yayılan X ve gama ışınlarından oluşmaktadır (Baykal 2019).

İyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığı üzerindeki etkileri; radyasyon türüne, yoğunluğuna ve maruziyet süresine bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle yüksek dozda radyasyona uzun süre maruz kalınması, ciddi sağlık sorunlarına neden olabileceğinden dolayı, bazı temel korunma yöntemleri hayati önem taşır. Bu önlemler arasında; temas süresini

sınırlamak, kaynağa olan mesafeyi artırmak ve uygun zırhlama malzemeleri ile korunmak yer alır (Yüksel 2024).Radyasyon etkilerine örnek görsel Şekil 6’da verilmiştir (Afad 2021).



Şekil 6. Radyasyona maruziyetin potansiyel etkileri

Şekil 6’da sunulan içerik, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türlerini, bu radyasyonların kullanım alanlarını ve kaynaklandıkları materyalleri açık biçimde göstermektedir. Bu tür bir görsel anlatım, farklı radyasyon türlerinin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirme açısından önemlidir. Çünkü farklı kaynaklardan yayılan radyasyonların, biyolojik dokularla etkileşimi, kalıcı sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Özellikle tıbbi uygulamalar, endüstriyel faaliyetler, tüketici ürünleri ve nükleer santraller gibi alanlarda maruz kalınan radyasyonun etkilerini azaltmak amacıyla, ilgili önlemlerin alınması ve maruziyetin mümkün olan en düşük seviyede tutulması büyük önem arz etmektedir (Yüksel 2024).

Alfa parçacıkları

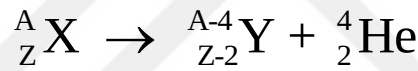
Elektromanyetik radyasyon, foton adı verilen enerji paketleri tarafından taşınırken, parçacık radyasyonu proton ve elektron gibi maddi parçacıklar tarafından iletilir. İyonlaştırıcı radyasyon türleri arasında alfa ve beta parçacıkları, gama ve X ışınları ile nötronlar bulunur.

Alfa parçacıkları iki proton ve iki nötrondan oluşur ve pozitif yüklü bir helyum çekirdeği yapısına sahiptir. Alfa parçacığı emisyonu, yüksek atom numarasına sahip doğal olarak oluşan radyoaktif izotopların çekirdekleri kararsız hale geldiğinde meydana gelir. Bu emisyon sırasında, parçacığın taşıdığı enerji madde ile etkileşimini artırır. Alfa parçacıkları güçlü bir iyonlaştırıcı etki yaratma kapasitesine sahip olsalar da penetrasyon kabiliyetleri oldukça düşüktür. Başka bir deyişle, ortamda çok kısa bir mesafe kat edebilirler. Örneğin, bir kağıt

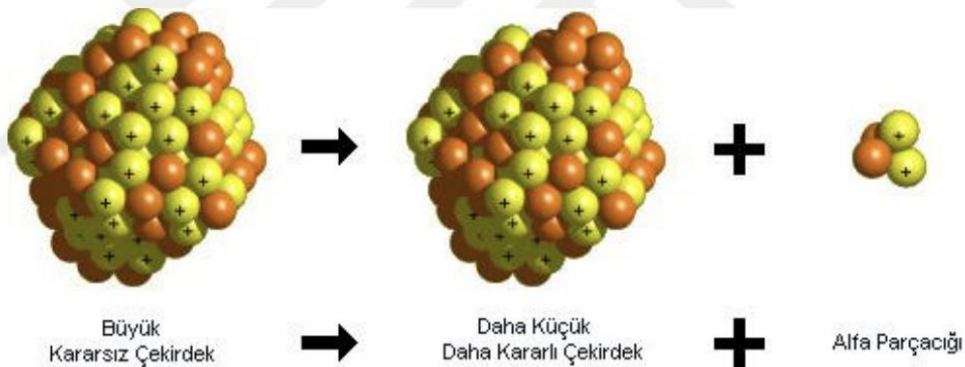
parçası bile alfa parçacıklarını durdurabilirken, beta parçacıkları daha yoğun malzemeler (ince metal levhalar gibi) gerektirir. Buna karşılık, gama ışınları ve X ışınları çok daha yüksek penetrasyon kabiliyetine sahiptir, ancak iyonlaşma güçleri alfa parçacıklarınınkinden daha zayıftır.

Alfa parçacıkları, yüksek elektrik yükleri nedeniyle çevrelerinde yoğun iyonlaşma oluşturur. Ancak, bu yüksek iyonlaşma etkisi, parçacığın enerjisini hızla kaybetmesine neden olur. Bu nedenle, insan derisi veya giysiler tarafından kolayca engellenebilirler. Ancak, solunum veya sindirim yoluyla vücuda girerlerse, hücresel düzeyde ciddi biyolojik hasara neden olabilirler. Alfa bozunumu, genellikle ağır ve kararsız çekirdeklerin daha kararlı bir duruma geçiş yaparken meydana gelen bir parçalanma sürecidir. Bu süreçte çekirdek, helyum çekirdeği şeklinde bir alfa parçacığı yayar. Yayılan bu parçacık, helyum (He) atomunun çekirdeği ile kimyasal olarak aynıdır.

Alfa parçacıkları, sınırlı penetrasyon özellikleri nedeniyle tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunun nedeni, bu parçacıkların vücut dokuları üzerinde sadece yüzeysel bir etki yaratması ve derin dokulara ulaşamamasıdır. Bu özellik, klinik alanda uygulama potansiyellerini sınırlamaktadır. Alfa bozunumu aşağıdaki denklemle temsil edilir:



Burada X, alfa bozunumu geçiren radyoaktif çekirdeği; He, yayılan alfa parçacığını; Y ise bozunumdan sonra oluşan yeni çekirdeği temsil eder (Yüksel 2024). Alfa bozunumunun şematik gösterimi aşağıdaki gibidir (Boyacıoğlu 2025).



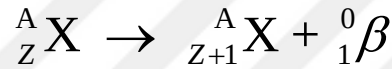
Şekil 7. Alfa bozunumu

Beta parçacıkları

Beta parçacıkları, atom çekirdeğinin kararsız hale gelmesi sonucunda meydana gelen, yüksek enerjili ve negatif yüklü parçacıklardır. Bu parçacıkların kütlesi ve yükü, elektronunkine

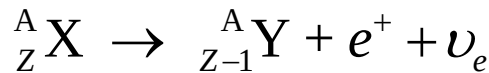
eşittir. Kütlelerinin düşük olması nedeniyle, alfa parçacıklarına kıyasla daha hızlı hareket ederler ve maddenin içinden geçerken daha uzun mesafeler kat edebilirler. Ayrıca, iyonlaştırma kapasiteleri de oldukça yüksektir. Beta bozunumu, çekirdekteki proton/nötron oranının 1'e yaklaşması ya da bu dengeyi aşması sonucu meydana gelen kararsızlıktan kaynaklanır. Bu dengesiz yapı, çekirdekte bir elektron (β^-) ya da pozitron (β^+) yayılması yoluyla dengeye ulaşır. Bu süreçte, çekirdekte bulunan bir nötronun protona ya da bir protonun nötrona dönüşmesi gerçekleşir ve bu dönüşüm sonucunda beta bozunumu meydana gelir. Beta bozunumu başlıca iki şekilde gerçekleşir:

1. Beta eksi (β^-) bozunumu: Çekirdekte bulunan nötron fazlalığından dolayı nötronun protona dönüşmesiyle proton sayısının artmasına ve atom numarasının değişmesine neden olur. Bir nötronun, bir protona dönüşmesi sürecinde bir elektron (β^- parçacığı) ve bir antinötrino yayılır. β^- bozunumun denklemi;



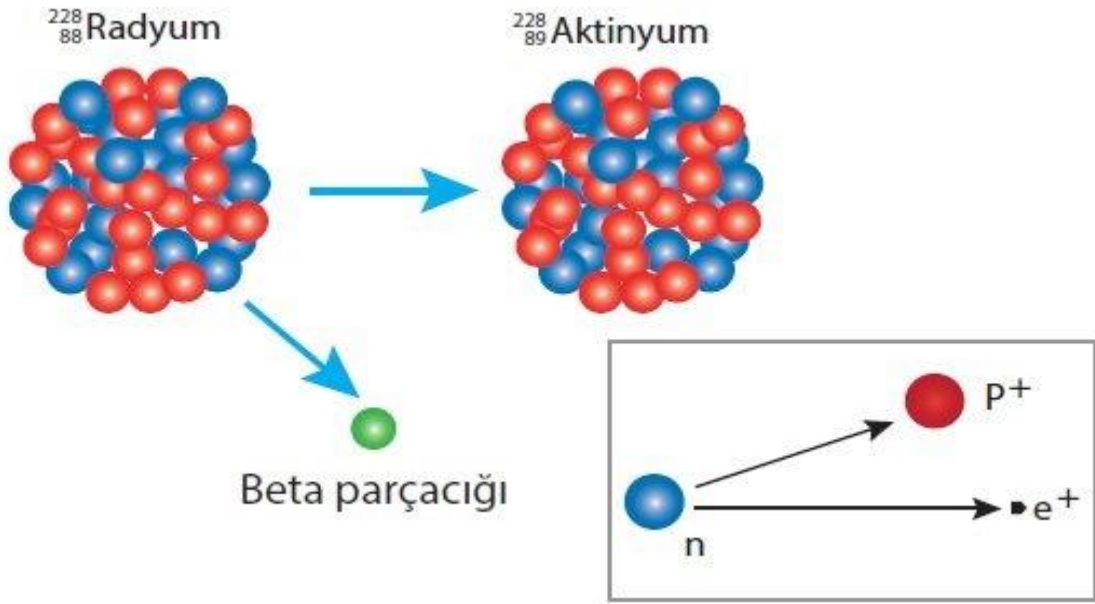
ile verilir.

2. Beta artı (β^+) bozunumu: Çekirdekte bulunan proton fazlalığından dolayı protonun nötrona dönüşmesiyle nötron sayısının artmasına atom numarasının değişmesine sebep olur. Bir protonun, bir nötrona dönüşmesi sürecinde bir pozitron (β^+ parçacığı) ve bir nötrino yayılır ve denklemi aşağıdaki gibidir.



Her iki bozunma sonucunda da çekirdek daha kararlı bir duruma geçer. Bu dönüşümler esnasında oluşan beta parçacıkları, yüksek hızlı hareket eden, elektrik yüklü ve küçük kütleli parçacıklardır. Elektronlar negatif yüklü oldukları için β^- olarak, pozitronlar ise pozitif yüklü oldukları için β^+ olarak sembolize edilir (Dubbers and Märkisch 2021).

Beta parçacıkları alfa parçacıkları gibi iyonlaştırıcı özelliğe sahip olmakla beraber alfaya göre büyüklükleri küçük olduğu için sapmalar olmaktadır. Bu sebeple bir beta ile bir alfa enerjileri aynı olsa dahi betanın alfaya göre daha hızlı hareket etmektedir. Beta parçacıklarının atom çekirdeği içindeki karışık etkilerin aydınlatılmasında önemli bir rol oynar (Yüksel 2024). Beta parçacığı oluşum görseli aşağıdaki gibidir (Afad 2021).



Şekil 8. Beta parçacık oluşumu

X- ışınları

Modern tıpta yaygın olarak kullanılan görüntüleme teknolojilerinin temeli, 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen'in X ışınlarını keşfetmesiyle atılmıştır. Röntgen, o dönemde doğası tam olarak anlaşılmamış olan bu ışınları, hızlı hareket eden elektronların madde ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan, güçlü penetrasyon gücüne sahip yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar olarak tanımladı. Deneysel çalışmaları, bu ışınların yoğunluğunun ve maddeyi geçme kabiliyetinin elektronların hızıyla doğru orantılı olduğunu ortaya koydu.

X-ışınlarının oluşum mekanizması, esasen fotonların madde ile çarpışmasıyla başlar. Bu çarpışmanın sonucu olarak, elektronlar atomlardaki yörüngelerinden çıkar. Bu yerinden çıkan elektronlar orijinal enerji seviyelerine geri dönerken enerji yayılır ve radyasyona neden olur. X ışınları, hızlı hareket eden bir elektronun kinetik enerjisinin bir kısmı veya tamamı fotonlara dönüştüğünde de benzer şekilde üretilir. Özellikle bu elektronlar aniden yavaşladığında veya durduğunda, dedektörler tarafından algılanabilen görünmez radyasyon oluşur. Bu ışınlar, fotoğraf plakaları veya dedektörler üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

1906 yılında Charles Barkla, X ışınlarının doğasını daha iyi anlamak için bir deney yaptı. Bu deneyde, X ışınları bir karbon bloğa yönlendirildi; karbon atomlarının elektronları bu etkileşim sonucunda titreşmeye ve tekrar ışık yaymaya başladı. Barkla'nın gözlemleri, bu yayılımın yalnızca belirli bir yönde, örneğin +x yönünde gerçekleştiğini ve elektrik vektörlerinin y eksenine yönünde olduğunu ortaya çıkardı. Ayrıca, bu emisyonların sadece x-z düzleminde yayıldığı ve y yönünde yayılma olmadığı da belirlendi. Bu deneysel bulgular, X ışınlarının sadece parçacık özelliklerine değil, aynı zamanda dalga özelliklerine de sahip

olduğunu kanıtladı (Önder 2013). Röntgen'in yaptığı ilk deneysel uygulama sonucu elde edilen X-ışını görüntüsü, 1895 yılında eşinin eline ait olup literatürde ilk tıbbi X-ışını görüntüsü olarak kabul edilmektedir (Röntgen 1949). Şekil 9'da bu tarihi görüntü sunulmaktadır.



Şekil 9. İlk X ışını görüntülemesi

Wilhelm Röntgen, Crookes gaz tüpü kullanarak ilk kez X ışınlarını gözlemledi. Bu özel tüpteki hava boşaltılarak neredeyse vakum ortamına dönüştürüldü ve tüpün içine bir anot ve bir katot olmak üzere iki elektrot yerleştirildi. Elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulandığında, katottan yayılan elektronlar anotla çarpışarak X ışınlarının oluşmasına neden oldu. Röntgen'in önemli keşfinin ardından, Marie Curie'nin radyoaktif elementlerden biri olan radyumu keşfi, radyasyonun çeşitli alanlarda kullanılmasına yeni kapılar açtı (Bakar 2012).

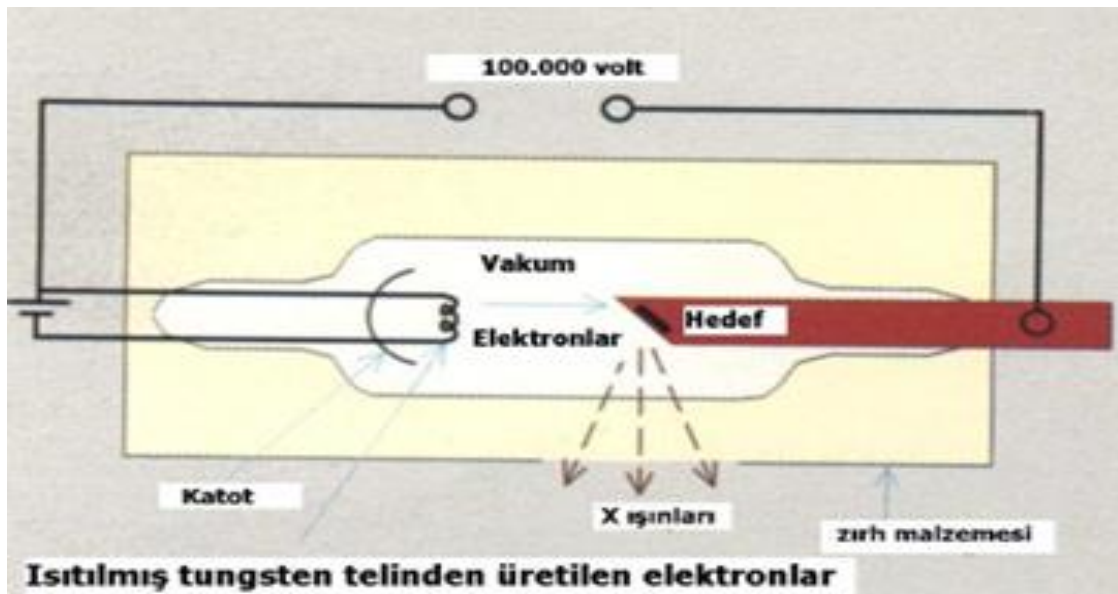
X ışınları, dalga boyları yaklaşık 0,04 ila 1000 Å arasında değişen elektromanyetik spektrumdaki dalgalardır. Dalga boyları yaklaşık 0,5 Å olan X ışınları, tıbbi görüntüleme alanında tanı amaçlı olarak özellikle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ışınlar, görünür ışık gibi uzayda düz çizgiler halinde ilerler ve kütleleri olmadığı için ağırlıkları da yoktur. Ayrıca, elektrik yükü taşımadıkları için manyetik alanlardan etkilenmezler ve doğrudan düz yollar izlerler. X ışınları, aynı ışın içinde farklı enerji seviyelerine sahip X fotonlarının varlığı nedeniyle heterojen bir yapıya sahiptir. Mesafe arttıkça, bu ışınların yoğunluğu azalır ve yayılma özellikleri değişir.

X ışınları iyonlaştırıcı etkiye sahiptir; geçtikleri ortamdaki oksijeni ozona dönüştürerek çevresel ve biyolojik hasara neden olabilirler. Bu nedenle, X ışınlarının kullanıldığı ortamlarda

etkili havalandırma sağlanmalı ve gerekli güvenlik önlemleri büyük bir özenle alınmalıdır. Ayrıca, X ışınlarının gümüş tuzları üzerinde karartma özelliği nedeniyle, bu ışınlar kimyasal işlemlerle fotoğraf filmi üzerinde görünür hale getirilebilir. Ayrıca, X ışınları su moleküllerinde kimyasal etkiler yaratarak moleküler yapıların bozulmasına neden olabilir; DNA gibi biyolojik moleküllerde genetik mutasyonlara ve hatta hücre ölümüne yol açabilecek değişikliklere neden olabilir. Ek olarak, belirli malzemelerle çarpıştıklarında ışık yayarak parlak ışıklar oluşturabilirler (Bakar 2012). X ışınları genel olarak iki ana gruba ayrılır bunlar doğal ve yapay kaynaklardır.

1. Doğal X-ışınları: Bu tür X-ışınları, atom çekirdeğinde gerçekleşen nükleer süreçler (alfa veya beta bozunumu, iç dönüşüm, elektron yakalama vb.) sonucu ortaya çıkar. Enerji seviyesi değişen elektronlar, orbital boşlukları doldurmak üzere daha düşük seviyelerden üst seviyelere geçerken X-ışını yayarlar. Bu süreç, özellikle elektronların enerji katmanlarında gerçekleşen geçişler sonucu açığa çıkan fotonlarla ilgilidir. Doğal yollarla oluşan bu ışınlar çevresel radyasyonun bir parçasıdır ve insanları sürekli olarak etkileyebilir (Borand 2016).

2. Yapay X-ışınları: Doğal kaynaklardan farklı olarak, yapay X-ışınları insanlar tarafından laboratuvar ortamında özel cihazlar kullanılarak üretilir. Bilimsel araştırma ve endüstride yaygın olarak kullanılan bu ışınlar, genellikle X-ışını tüpleri veya lineer hızlandırıcılar aracılığıyla elde edilir. Bu sistemlerde, elektronlar katottan ayrılır, yüksek voltajla hızlandırılır ve anot yüzeyine çarpar. Tungsten veya diğer ağır metallere yapılan anot yüzeyi, gelen elektronların kinetik enerjisini etkili bir şekilde X-ışınlarına dönüştürerek bu radyasyonu üretir (Yüksel 2024). Ortaya çıkan ışınlar, görüntüleme ve malzeme analizinden çok sayıda başka uygulamaya kadar birçok farklı alanda güvenle kullanılır. Aşağıda bir X-ışını tüpünün görsel bir temsili bulunmaktadır (Bakar 2012).

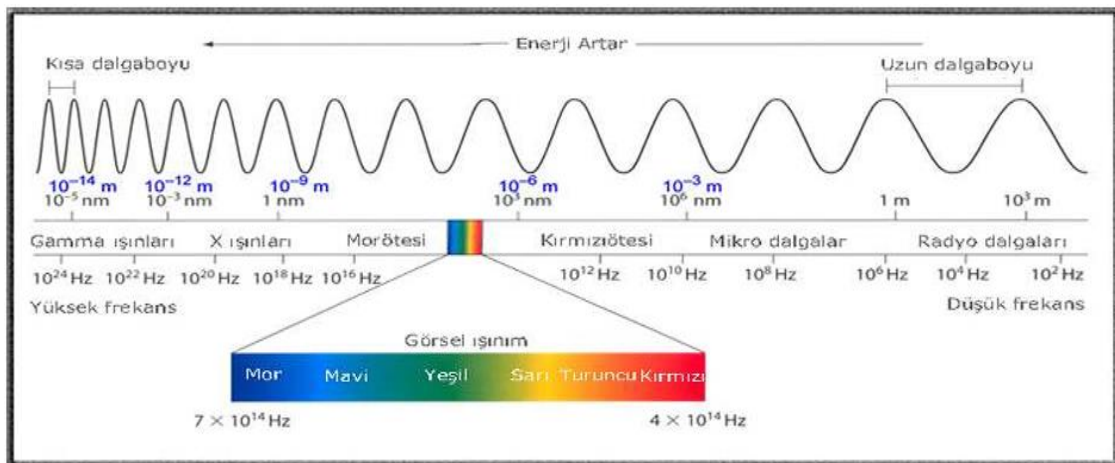


Şekil 10. X-ışını tüpü

Gama ışınları

Gama ışınları, radyoaktif bozunmalar sonucunda atom çekirdeğinin daha kararlı bir yapıya ulaşma eğilimiyle açığa çıkan, yüksek enerjili fotonlar ya da elektromanyetik radyasyon türüdür. Bu ışınlar, tıpkı alfa ve beta parçacıkları gibi nükleer bozunma süreçleri sırasında ortaya çıkarlar. Ancak elektromanyetik spektrum içerisinde en yüksek enerji ve frekansa sahip olmaları nedeniyle, diğer radyasyon türlerine kıyasla çok daha yüksek bir nüfuz etme kabiliyetine sahiptirler. Gama ışınları, atom çekirdeğinde meydana gelen enerji fazlası durumlarında, bu enerjinin dışarı atılması yoluyla yayılır ve böylelikle çekirdek daha kararlı bir hale gelir.

Gama ışınlarının oluşum kaynaklarına göz atıldığında; yüksek enerjili parçacıkların çarpışmaları, birbirine zıt özellikteki parçacıkların yok olması (örneğin pozitron-elektron yok oluşu) ve ivmeli hareket eden yüklü parçacıkların yarattığı elektromanyetik salınımlar gibi çeşitli mekanizmalar ön plana çıkmaktadır. Bu ışınlar özellikle uzayda gerçekleşen süpernova patlamaları, nükleer reaksiyonlar veya diğer kozmik olaylar neticesinde ortaya çıkmakta ve evrende oldukça yaygın bir biçimde dağılmaktadır. Bununla birlikte, Dünya atmosferinin üst katmanları bu ışınların büyük çoğunluğunu absorbe ederek, yeryüzüne ulaşmalarını önemli ölçüde sınırlar. Sahip oldukları yüksek enerji düzeyi sebebiyle gama ışınları hem bilimsel araştırmalarda hem de tıp, endüstri ve nükleer enerji alanlarında kritik uygulamalara sahiptir. Elektromanyetik spektrum içerisindeki konumlarını gösteren şematik açıklama aşağıda sunulmuştur (Bakar 2012).



Şekil 11. Elektromanyetik dalga tayfi

Gama ışınlarının bilimsel ve teknolojik alanlarda geniş ve çeşitli kullanım alanları vardır. Özellikle radyoterapi ile kanser hücrelerinin hedefli yıkımında olmak üzere tıp alanında yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca radyoaktif maddelerin analizinde ve tanımlanmasında kritik ve önemli bir rol oynarlar. Atom çekirdeğinde biriken fazla enerji, daha kararlı bir yapıya

ulaşmak için yüksek enerjili fotonlar şeklinde açığa çıkar; yayılan bu elektromanyetik enerjiye gama ışınları denir.

Bu tez kapsamında gama ışınlarının fiziksel özellikleri ve çeşitli maddelerle etkileşimleri ayrıntılı olarak incelenecektir. Özellikle farklı malzemelerin bu ışınları ne ölçüde emebildiği, yani zayıflatma kapasiteleri bilimsel yöntemlerle incelenecektir. Bu tür araştırmaların temel amacı gama radyasyonuna karşı etkili ve güvenilir koruyucu malzemelerin geliştirilmesini sağlamaktır. Nihai amaç, bu yüksek enerjili ışınların canlı organizmalar üzerindeki zararlı etkilerini en aza indirmek veya tamamen ortadan kaldırmaktır (Yüksel 2024).

Madde Foton Etkileşimi

Radyasyonun belirli bir frekansta taşıdığı tüm enerji paketleri eşittir. Bu çok küçük enerji paketlerine ise foton adı verilir. Fotonların enerjisi, fiziksel olarak $E=h\nu$ formülü ile ifade edilmektedir. Bu fotonların rastgele gerçekleşen etkileşimleri, ortamdan geçerken farklı değişiklikler gösterebilir. Bu olaylar aşağıdaki başlıklar altında sıralanabilir (Barınmaz 2009).

- Fotoelektrik olay
- Compton saçılımı
- Çift oluşum

Fotonun enerjisine bağlı olarak madde ile etkileşimi sonucu kırınım, yansıma, kırılma gibi optiksel olaylar meydana gelirken, aynı zamanda fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşum gibi süreçler de ortaya çıkabilmektedir. Eğer foton enerjileri 0,001 MeV ile 0,5 MeV arasında ise fotoelektrik olayın gerçekleşme olasılığı daha yüksektir; buna karşılık 1,02 MeV ve üzerindeki enerji seviyelerinde ise çift oluşum olayının meydana gelme durumu daha yaygın hale gelir (Sola 2015).

Düşük enerjili fotonlarda (10 keV- 1 MeV) yüksek atom numarasına sahip maddelerde fotoelektrik olay baskın olurken, orta enerjili fotonlarda (1 MeV- 10 MeV) Compton saçılımı etkinliği orta atom numaralı maddelerde belirginleşir; ancak atom numarası arttıkça fotoelektrik olay yeniden ön plana çıkmaya başlar. Yüksek enerjili fotonlarda (10 MeV ve üzeri) ise yalnızca yüksek atom numarasına sahip maddelerde çift oluşum olayı etkili olmaktadır (Kalkan 2025). Enerjiye bağlı olarak fotoelektrik olay, Compton saçılımı ve çift oluşum süreçleri bu bölümde izah edilmeye çalışılmıştır.

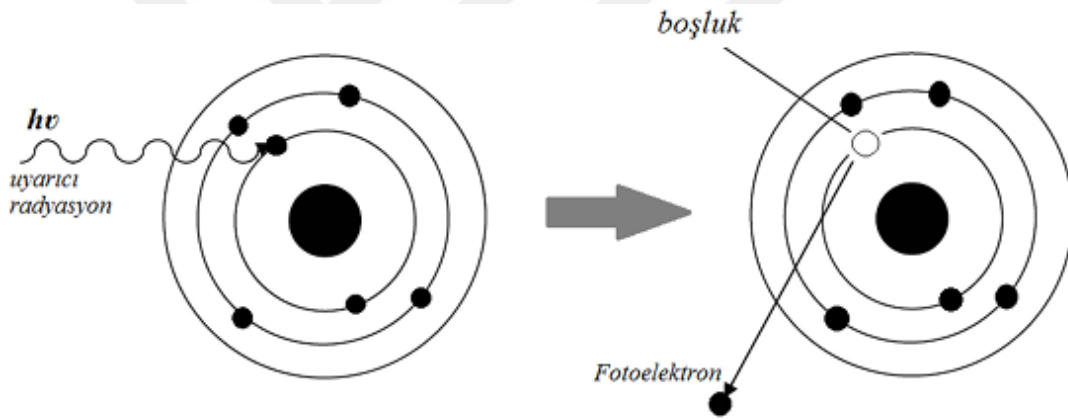
Fotoelektrik olay

Fotonun, yani ışığın atoma çarpması sonucu, atoma bağlı bir elektronu enerjisini alarak serbest bırakması olayı fotoelektrik olay olarak adlandırılır. Bu olay, ışığın enerji paketleri

taşıdığını gösterir; bu paketlere foton denir ve koparılan elektronlara da fotoelektron denir (Özgen 2016).

Fotoelektrik olay genellikle düşük enerjili fotonların madde ile etkileşmesi sonucu gerçekleşir. Fotonun enerjisi, elektronu atomdan koparmak için gereken bağlanma enerjisinden fazla olursa, elektron serbest kalır; bu duruma iyonlaşma da denir. Bu süreçte, foton tamamen kaybolur ve elektron aldığı enerjiyle hareket eder, başka foton oluşmaz. Fotoelektrik olayın özellikle yüksek atom numarasına sahip maddelerde daha kolay gerçekleşmesinin sebebi, atom numarası arttıkça elektron ile fotonun etkileşiminin kolaylaşmasıdır (Kalkan 2025).

Elektronun aldığı enerji bağlanma enerjisinden fazla olursa, bu enerji kinetik enerji olarak elektrona geçer. Fotoelektrik olay sonucu oluşan iyonlaştırıcı radyasyon, tıbbi görüntüleme gibi alanlarda kullanılabilir. Ancak bu ışınlar, DNA ve moleküllerde iyonizasyon yaparak genetik hasarlara yol açabilir (Kalkan 2025). Fotoelektrik olayın şeması aşağıda verilmiştir (Sola 2015).



Şekil 12. Fotoelektrik soğurma olayının gösterimi

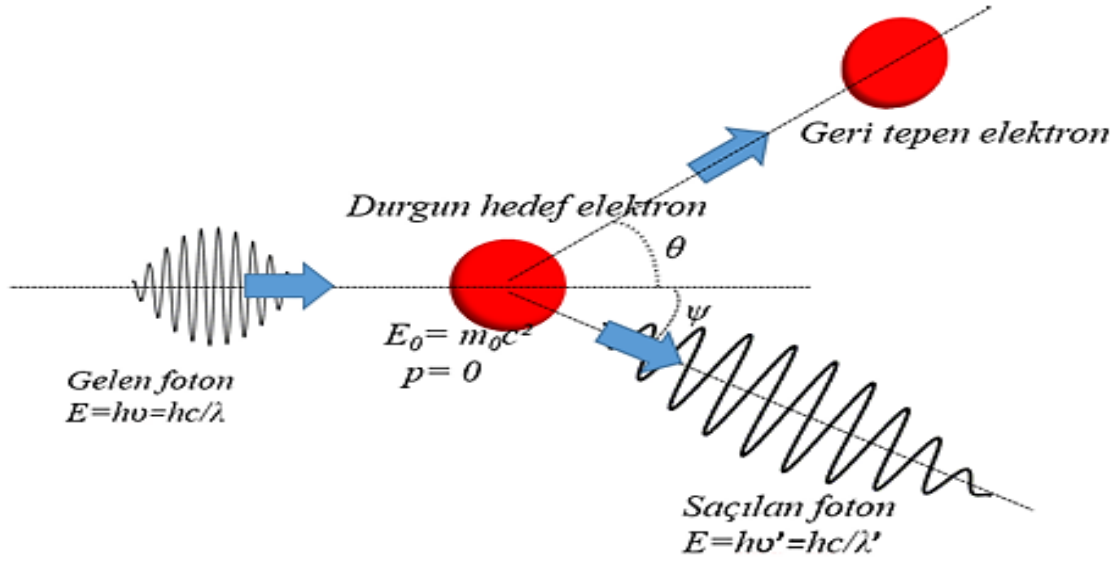
Elektronun serbest durumda bulunması halinde, enerji ve momentumun eş zamanlı korunumu sağlanamayacağından, serbest elektronların fotonları soğurması mümkün değildir. Bu nedenle fotoelektrik olay yalnızca atomun K, L ve M enerji seviyelerine bağlı elektronlar için gerçekleşir. Fotonun gelişine bağlı olarak atom geri teperek momentum korunur; ancak bu geri tepme enerjisi oldukça düşük olup genellikle ihmal edilmektedir. Gelen foton, ilgili enerji seviyesindeki elektrona enerjisini aktararak, elektronun atomdan kopmasını sağlar (Sola 2015).

Compton saçılması

Compton saçılması, genellikle 20-150 keV aralığında enerjilere sahip X-fotonlarının maddeyle etkileşime girip serbest veya zayıf bağlı bir elektronla çarpışmasıyla meydana gelir. Bu etkileşimde foton bir miktar enerji kaybeder, yön değiştirir ve çarpıştığı elektrona kinetik enerji

aktarır. Compton saçılması, orta atom numaralı maddelerde daha belirgin olsa da, atom numarası arttıkça bu olgunun etkisi azalır ve fotoelektrik etki devreye girmeye başlar (Kalkan 2025).

Zayıf bağlı bir elektronla bu etkileşimde, foton enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve kalan enerji farklı açılarda saçılarak yoluna devam eder (Kural 2019). Bu süreç, fotoelektrik etkiden farklı olarak, fotonun enerjisinin tamamını aktarmaması, bunun yerine elastik bir şekilde çarpışması durumunda meydana gelir (Kural 2019).



Şekil 13. Compton saçılması

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi (Sola 2015), elektron enerjisinin tamamını elektrona aktarmak yerine, momentum ve enerjinin korunumu ilkelerine uygun olarak saçılır (Kural 2019). Bu çarpışma sonucunda fotonun enerjisinin bir kısmı elektrona aktarılırken, kalan kısmı fotonun yeni yönünde taşınır. Böylece fotonun dalga boyu artarken frekansı azalır. Fotonun dalga boyundaki bu değişim, θ 'nin fotonun saçılma açısını temsil ettiği aşağıdaki formülle açıklanmaktadır (Peker 2024). Fotonun saçılma açısı, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır (Yüksel 2024).

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

λ : Saçılmadan önceki fotonun dalga boyu

λ' : Saçılmadan sonraki fotonun dalga boyu

h : Planck sabiti $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s

m_e : Elektronun durgun kütlesi $\approx 9.11 \times 10^{-31}$ kg

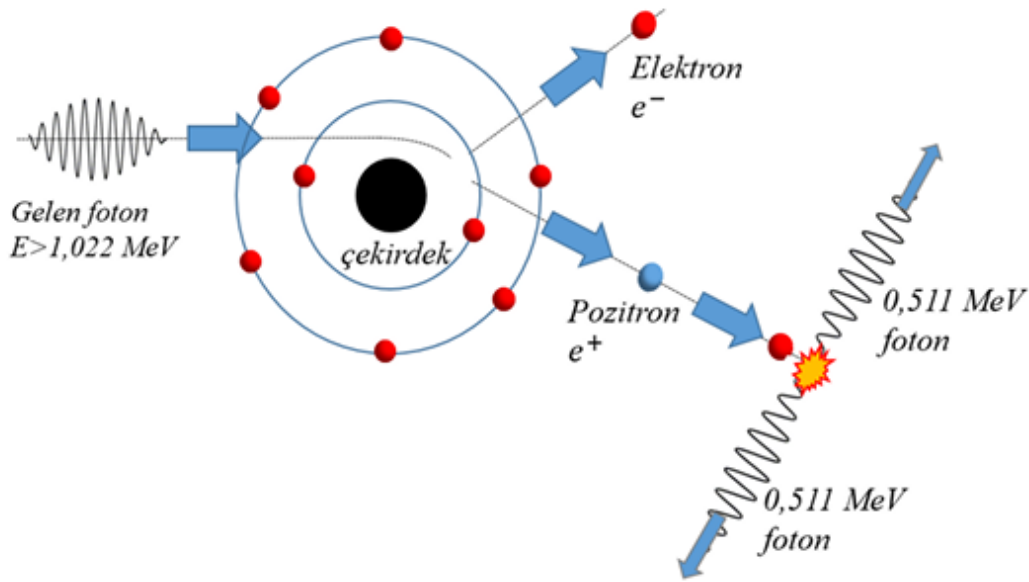
c : Işık hızı $\approx 3.00 \times 10^8$ m/s

θ : Fotonun saçılma açısı (0° – 180° arası)

Çift oluşumu

Yüksek enerjili bir foton, bir atom çekirdeğinin etrafındaki Coulomb alanıyla etkileşime girerek enerjisinin soğurulmasına ve bir elektron-pozitron çifti oluşmasına neden olur. Bu fiziksel olguya çift oluşumu denir. Çift oluşumunun gerçekleşmesi için foton enerjisinin en az 1,022 MeV olması gerekir. Bu değer, bir elektron ve bir pozitronun toplam durağan kütle enerjisine karşılık gelir. Her biri 0,511 MeV durağan enerjiye sahip olan bu parçacıklar, yalnızca bu eşik enerjisinin üzerindeki bir foton tarafından oluşturulabilir (Çağlar 2021).

Fotonun başlangıçta sıfır elektrik yükü olduğundan, ortaya çıkan elektron ve pozitronun toplam yükü de sıfırdır; böylece yük korunumu sağlanır. Çift oluşumu genellikle yüksek atom numaralı elementlerin çekirdeklerinin etrafında daha olasıdır çünkü çekirdeğin Coulomb alanı bu tür etkileşimleri kolaylaştırır. Çift oluşumunun şematik bir gösterimi aşağıda sunulmuştur (Sola 2015).

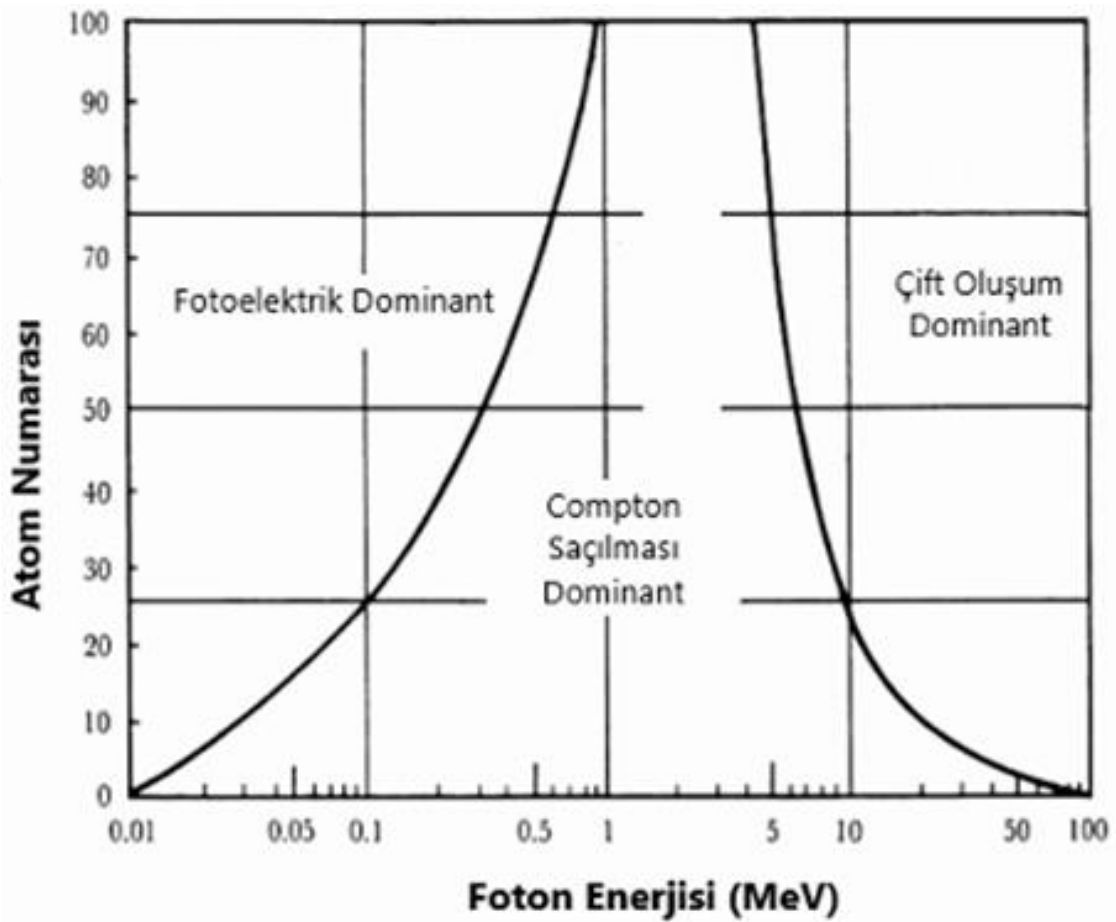


Şekil 14. Çift oluşum

Çift oluşumu yalnızca yüksek enerjili fotonlarda değil, aynı zamanda yüksek atom numaralı maddelerde de daha kolay gerçekleşir. Bu olgunun anahtarı, fotonun enerjisinin maddeye dönüşerek bir elektron-pozitron çifti oluşturmasıdır. Bunun gerçekleşmesi için, gelen fotonun enerjisinin belirli bir eşiği aşması gerekir. Bu eşik yaklaşık 1,022 MeV'dir; bu da elektronun durağan kütle enerjisinin iki katına eşittir. Hem elektronun hem de pozitronun durağan kütle enerjisi 511 keV olduğundan, bu iki parçacığın oluşması için foton enerjisinin en az 1,022 MeV olması gerekir.

Gelen fotonun enerjisi bu eşiği aşırsa, enerjinin bir kısmı elektron-pozitron çiftinin kütle enerjisine, geri kalanı ise bu parçacıkların kinetik enerjisine dönüşür. Kinetik enerjinin

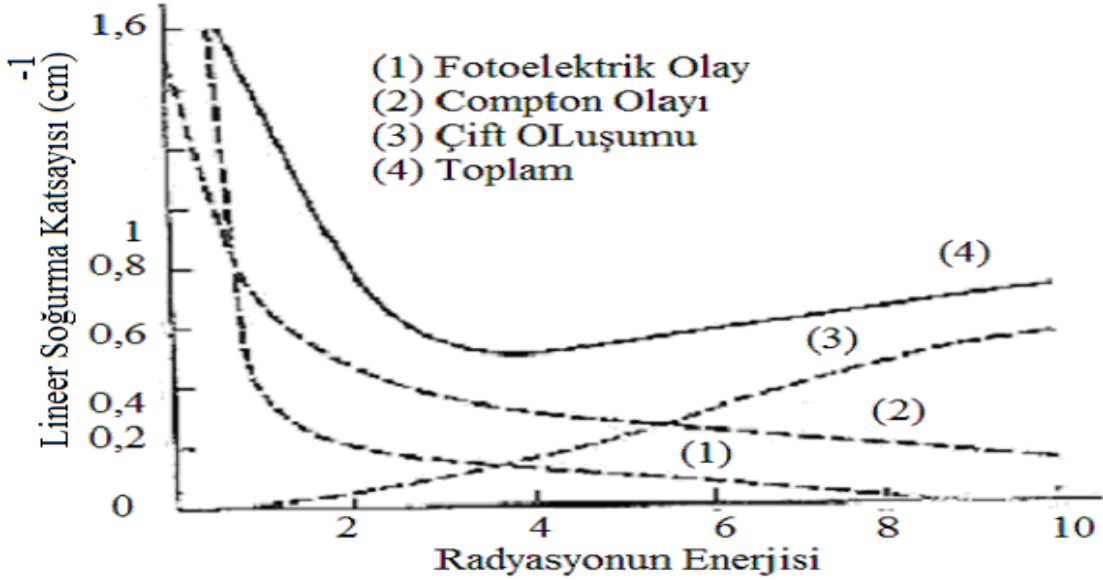
dağılımı, fotonun enerjisine ve ortam koşullarına bağlı olarak değişebilir. Ortaya çıkan elektron ve pozitron, farklı yönlerde hareket ettikçe çevreleriyle etkileşime girerek enerjilerini kademeli olarak kaybederler. Çift oluşumu, bir fotonun çekirdeğe çok yakın bir bölgede çekirdeğin elektrik alanıyla etkileşimi sonucunda meydana gelir. Çekirdek, enerji ve momentumun korunumu için gerekli fiziksel ortamı sağlar, ancak doğrudan enerji kazanmaz. Compton saçılması, fotoelektrik etki ve çift oluşumu olmak üzere üç temel etkileşimin farklı enerji aralıklarında ve atom numaralarında baskın olduğu gözlemlenmiştir. Bu üç etkileşimin karşılaştırmalı bir grafiği Şekil 15'te sunulmaktadır (Kalkan 2025).



Şekil 15. Farklı enerji düzeylerinde fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumun baskınlık dağılımı

Yukarıdaki grafik, fotonların maddeyle etkileşim mekanizmalarının hem foton enerjisine hem de maddenin atom numarasına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Düşük enerjili fotonlar, özellikle yüksek atom numaralı materyallerde fotoelektrik olayın baskın şekilde gerçekleşmesine neden olur. Orta enerji aralıklarında, özellikle düşük ve orta atom numarasına sahip elementlerde Compton saçılması öne çıkar. Ancak atom numarası arttıkça Compton etkisinin etkinliği azalır ve bu aralıkta bile fotoelektrik olay yeniden ön plana geçer.

Öte yandan, yüksek enerjili fotonlarla yapılan etkileşimlerde, özellikle atom numarası büyük olan maddelerde çift oluşumu daha yoğun olarak gözlenir. Bu durum, enerji düzeyi ve atom numarasına bağlı olarak üç temel etkileşim türünün göreceli katkılarının nasıl değiştiğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Kalkan 2025).



Şekil 16. Foton enerjisinin artışıyla maddeyle etkileşim türlerinin lineer soğurma katsayısına etkisi

Şekil 16, artan foton enerjisinin madde-foton etkileşimi üzerindeki etkisini, özellikle lineer soğurma katsayısındaki değişim üzerinden açıklamaktadır. Enerji düzeyi yükseldikçe, fotoelektrik etki ve Compton saçılması olaylarının katkısı giderek azalır ve bu da genel soğurma katsayısında belirgin bir düşüşe neden olur. Özellikle 1,022 MeV üzerindeki enerjilerde, fotonlar çift oluşumu gerçekleştirecek düzeye ulaşır. Bu noktadan sonra, çift oluşum giderek baskın etkileşim türü haline gelirken, fotoelektrik ve Compton olayları etkinliğini kaybeder. Böylece grafik, foton enerjisinin farklı aralıklarda hangi etkileşim türünü öne çıkardığını ve bu durumun madde tarafından soğurulan radyasyon miktarını nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir (Aygün 2010).

Radyasyonun Etkileri

Radyasyonun biyolojik etkileri hedef tarafından soğrulan doza, bu dozu alırken kalınan süreye, canlı dokunun özelliklerine, radyasyonun enerjisine ve tipine bağlı olarak değişmektedir (Gökharman vd 2016).

Radyasyonun olumlu etkileri

Radyasyon, doku ve hücrelerdeki oksijen seviyelerinin artması nedeniyle su moleküllerini iyonize eder ve bu da hücresel aktiviteyi etkiler. Hücrelerdeki oksijen artışının

belirli bir seviyede tutulması sorun yaratmaz; ancak oksijen seviyelerindeki düşüş, enzimlerin işleyişini olumsuz etkileyebilir. Bu durumun bir örneği, bazı kronik hastalıkların tedavisinde spa tedavilerinin kullanılmasıdır. Termal kaynaklar, hücresel düzeyde sınırlı oksijen desteği sağlayarak hücresel fonksiyonların artmasına yardımcı olur. Böylece, radyasyonun neden olduğu hücrelerdeki oksijen dengesinin korunmasına katkıda bulunurlar (Bakar 2012).

Güneşten gelen radyasyon, enzimlerin vitaminlerle etkileşimini ve hormonların düzenli salgılanmasını destekler. Bu etkiler, radyasyon belirli bir seviyede olduğunda mümkündür. Mikroorganizmalar güneş radyasyonuna duyarlıdır. Ayrıca, güneşten gelen radyasyon hava ile temas ettiğinde, hava moleküllerindeki elektronları iyonize eder. Bu iyonizasyonun sonucu olarak moleküller elektrik yükü kazanır. Elektrifikasyon belirli sınırlar içinde kaldığında sorun yaratmaz; ancak bu sınır aşıldığında baş ağrısı gibi olumsuz etkiler gözlemlenebilir. Bu bağlamda, kontrollü düzeyde radyasyonla havanın iyonlaşması zararsız kabul edilir (Bakar 2012).

Kanser vakalarında, radyasyon kanser hücrelerinin çoğalmasını önlemek için bir tedavi yöntemi olarak kullanılır. Bu durum, radyasyonun terapötik etkilerinin bir örneğidir. Ayrıca, kemik iliğini güçlendirdiği bilinen güneşten gelen radyasyonun süresi ve yoğunluğu büyük önem taşır. Ancak bu sınır aşıldığında kemik iliği tükenebilir, anemi gelişebilir ve bağışıklık sistemi zayıflayarak kansere veya ölümcül sonuçlara yol açabilir (Bakar 2012). Nitekim Dünya Sağlık Örgütü, iyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkilerinin doz-yanıt ilişkisine bağlı olarak ciddi sağlık sonuçlarına yol açabileceğini bildirmiştir (WHO 2023).

Radyasyonun olumsuz etkileri ve temel faktörler

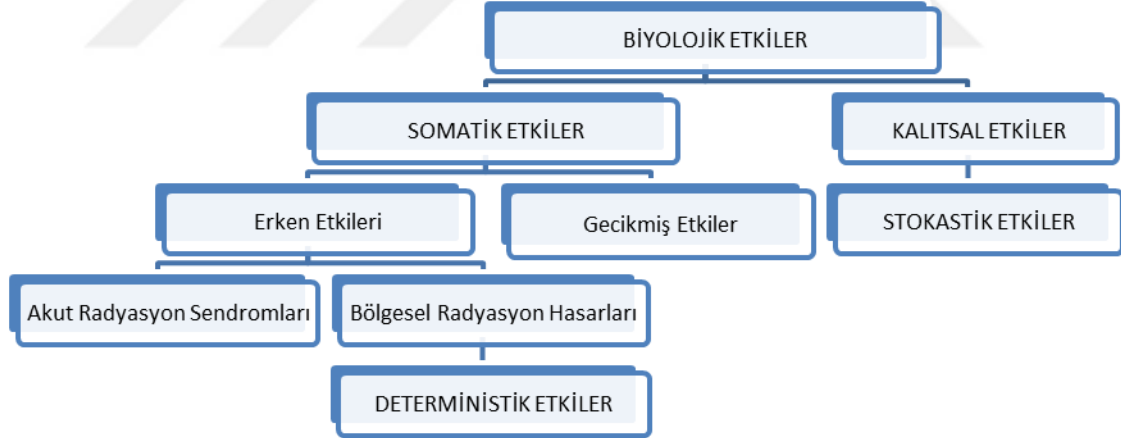
Radyasyonun canlı organizmalarda neden olduğu değişiklikler, radyasyona maruz kalma miktarı, süresi ve türüne göre değişir. İyonlaştırıcı radyasyon türleri arasında gama, alfa, beta, X ışınları ve nötronlar bulunur. Bu tür radyasyonlar, içinden geçerken canlı molekülleri iyonlaştırarak uyarır ve temel durumlarına dönmek için fazla enerjilerini moleküllere aktarır. Enerji, radyasyonun geçtiği yol boyunca serbest kalır ve bu sürece doğrusal enerji transferi (LET) denir. LET, radyasyonun yükü ve hızıyla ilgilidir; yük arttıkça ve hız azaldıkça LET değeri artar. Örneğin, alfa parçacıkları pozitif yüklüdür (iki pozitif yük ile) ve düşük hıza sahiptir, beta parçacıkları ise negatif yüklüdür ve yüksek hıza sahiptir. Bu nedenle, alfa parçacıklarının LET değeri beta parçacıklarınınkinden daha yüksektir. LET'in artması, radyasyonun canlı dokuya zarar verme potansiyelini de artırır (Bakar 2012).

Radyasyona maruz kalma dozu düşük olduğunda, bu etkileri doğrudan gözlemlemek mümkün olmayabilir. Ancak, düşük doz radyasyonun canlı organizmalar üzerindeki etkileri,

nükleer patlamalar gibi olayların ardından radyasyona maruz kalan bölgelerde incelenmiştir. Bu etkiler genetik hasara ve kanserojen sonuçlara neden olabilir. Radyasyon, kromozom kırılmaları, silinmeler veya terminal kırılmalar gibi genetik materyaldeki kromozomlara yapısal hasar verir. Bu mutasyonlar kanser oluşumunu tetikleyebilir. Ayrıca, bu etkilerin ortaya çıkması yaş ve cinsiyet gibi bireysel faktörlere bağlıdır (Bakar 2012).

Vücuttaki her hücre radyasyona farklı tepki verir. Yenilenme ihtiyacı yüksek olan hücreler, sürekli aktif oldukları için radyasyona daha duyarlı ve kırılıgandır. Bu durum en çok cilt dokusunda belirgindir. Radyasyonun etkileri, cildin canlı hücrelerini öldürerek başlar; radyasyonun yoğunluğu ve maruz kalma süresi arttıkça, ciltte yanıklar ve yaralar oluşur (Bakar 2012). Radyasyonun en olumsuz etkileri, yetişkinlere göre çocuklarda daha yaygındır. Gelişim aşamasındaki çocukların ince kafatası yapısı, radyasyonun beyin dokusuna daha kolay ulaşmasını ve orada daha ciddi hasara yol açmasını sağlar. Bu hasarlar, alınan radyasyon dozuna göre değişir. Yüksek dozda radyasyona maruz kalan çocuklar, ileriki yaşamlarında zihinsel engellilik, kanser, nörolojik bozukluklar, gelişimsel gecikmeler, doğuştan malformasyonlar ve hatta ölüm gibi ciddi sonuçlarla karşılaşabilirler (Göçmen 2016).

Radyasyon ışınlarının biyolojik etkileri



Şekil 17. Radyasyon biyolojik etkileri

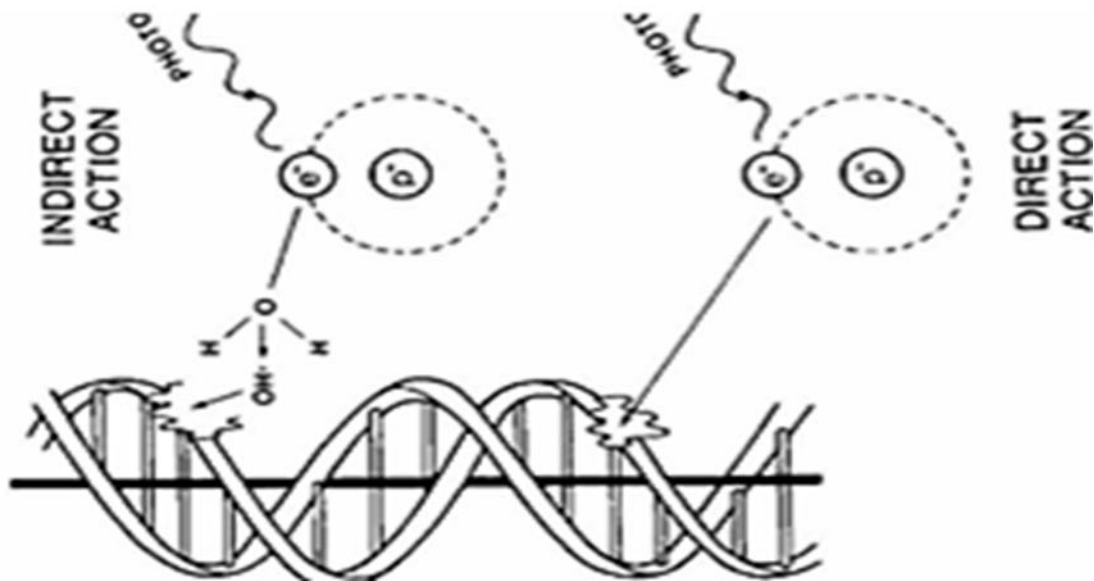
Radyasyon günümüzde etkilerini her alanda göstermektedir (Uzun 2016). Radyasyon, canlı organizmalar üzerinde biyolojik, fiziksel ve kimyasal etkilere sahiptir. Curie ve Becquerel bile radyoaktif deneyleri sırasında zarar görmüştür. Bu tür deneyler kaçınılmaz olduğundan, radyasyona karşı önlemler almak gerekli hale gelmiştir. Yaşam sisteminin sürekliliği için, bu sistemi oluşturan organların, dokuların ve hücrelerin merkezinde bulunan çekirdeğin radyasyona maruz kalması yıkıcı sonuçlar doğurur.

Her canlı organizmaya özgü, DNA ve RNA gibi genetik bilgileri nesilden nesile aktaran benzersiz kodlar vardır. Bu kodların bozulması genetik etkiler (stokastik etkiler) bırakır. Bu genetik etkilerin oluşması için radyasyonun bir eşik değeri veya hastalığa neden olacak belirli bir radyasyon dozu gerekmez. Hasar bir hücrede veya dokuda meydana gelirse, kansere yol açtığında nedenini belirlemek zordur. Belirleyici etkilerde, eşik değerde alınan radyasyon dozu, cildi besleyen hücrelerin ölümüne ve dökülmesine neden olur (Yüksel 2024).

Radyasyona maruz kalmanın etkilerinden korunmak için bilinmesi gereken en önemli faktör, doz miktarıdır. Bu doz miktarını en aza indirmek yeterli gibi görünse de tek başına sorunu çözmek için yeterli değildir. Bu nedenle, radyasyondan uzak durmak mümkün değilse, o alanda geçirilen süreyi sınırlamak ve bu da yeterli değilse koruyucu önlemlere başvurmak gerekir. Bu sistem, zaman, mesafe ve kalkanlama yoluyla radyasyonun etkilerini nötralize eder (Kalyon 2019).

Radyasyonun hücreler üzerindeki etkisi

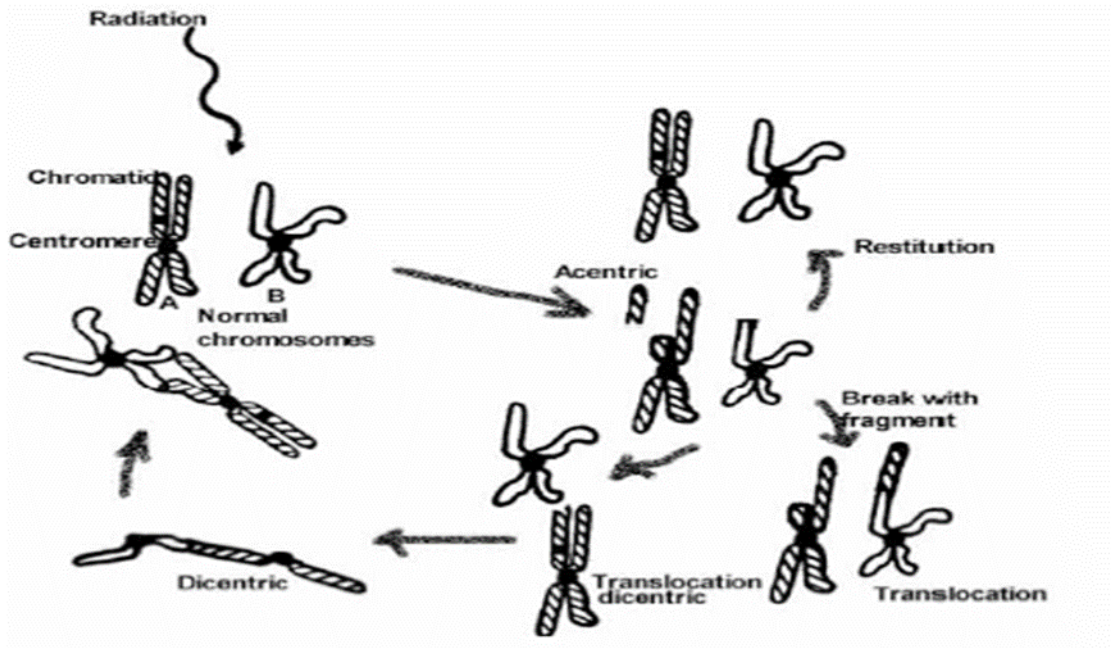
Radyasyonun canlı dokularda neden olduğu biyolojik hasar iki ana şekilde ortaya çıkar: doğrudan ve dolaylı. Doğrudan etkiler, radyasyon enerjisinin DNA molekülleri tarafından doğrudan emilmesi sonucu ortaya çıkar. Bu durumda radyasyon, genetik materyale doğrudan zarar vererek kalıtsal bozukluklara ve mutasyonlara yol açabilir. Dolaylı etki, enerji hücrenin içindeki su ve diğer moleküller tarafından emildiğinde ortaya çıkar. Bu süreçte ortaya çıkan serbest radikaller ve ara ürünler, DNA dahil olmak üzere hücrenin temel bileşenlerine zarar vererek işlev kaybına yol açar (Gökharman vd 2016).



Şekil 18. Radyasyonun direkt ve indirekt etkileri

Radyasyonun DNA ve kromozomlar üzerindeki etkisi, hücre çekirdeğine baskı uygulanmasıyla başlar. Bu, hücre bölünmesinin bozulmasına yol açar. Sonuç olarak, kromozomlarda bükülme, kırılma ve yapışma gibi yapısal anormallikler meydana gelir. Kırılan kromozom parçaları diğer kromozomlarla birleşerek anormal yapılar oluşturabilir ve bu da hücre ölümüne yol açabilir.

Radyasyonun moleküllerle etkileşimi hem doğrudan hem de dolaylı olarak gerçekleşir. Doğrudan etkileşimde, hedef molekül radyasyonla uyarıldığında yapısını kaybederken, dolaylı etkileşimde radyasyon önce ara ürünler oluşturur. Bu ara ürünler, kimyasal reaksiyonlar yoluyla hücresel molekülleri parçalayabilir. Özellikle, hücrelerde bol miktarda bulunan su moleküllerinin iyonlaşması, hidroksil (-OH) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi güçlü oksitleyici bileşiklerin oluşumuna neden olur. Bu maddeler, enzimler, nükleik asitler ve lipitler gibi hayati moleküllerle reaksiyona girerek hücresel yapıyı bozar. Bu yapıların hasar görmesi, hücrenin işlevlerini yerine getirmesini engelleyebilir ve hatta hücre ölümüne yol açabilir. Bu etkiler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Bakar 2012).



Şekil 19. İyonize radyasyona bağlı kromozal yapılar

Radyasyondan Korunma Yolları

Radyasyona maruz kalmanın insan sağlığı üzerindeki etkilerini minimuma indirmek ve doz seviyesinin güvenli sınırların altında tutulmasını sağlamak için gerekli önlemlerin alınması zorunludur. Bu doğrultuda, radyasyondan korunmada temel prensipler şu üç ilkeye dayanmaktadır (Kural 2019).

- Zaman Kuralı
- Mesafe Kuralı
- Zırhlama kuralı

Zaman kuralı

Radyasyon kaynağıyla geçirilen süre, alınan toplam dozla doğru orantılıdır. Bu nedenle radyasyon ortamlarında geçirilen süre mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Alınan doz miktarı, “Doz = Doz Hızı × Zaman” formülü ile hesaplanır. Bu durum, özellikle tanısal radyoloji ve radyoterapi gibi alanlarda hayati önem taşımaktadır. Zamanla doğru orantılı olarak doz birikimini açıklayan grafiksel gösterim aşağıdaki şekilde verilmiştir (Kural 2019).



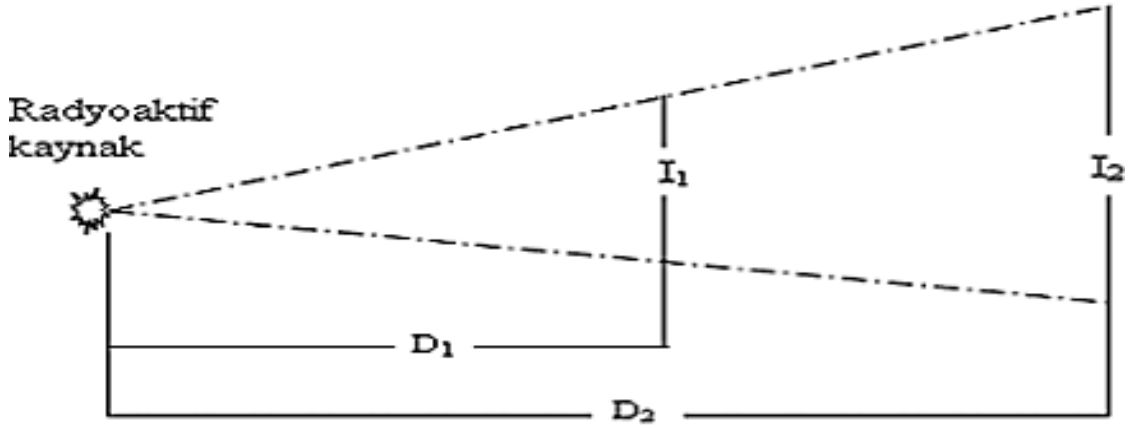
Şekil 20. Radyasyondan korunma yolları zaman

Mesafe kuralı

Radyasyon şiddeti, kaynağa olan mesafenin artmasıyla azalır. Bu azalma, noktasal kaynaklar için mesafenin karesiyle ters orantılı olarak gerçekleşir. Diğer bir ifadeyle, radyasyon şiddeti “ters kare yasası” olarak bilinen prensibe uyar. Buna göre;

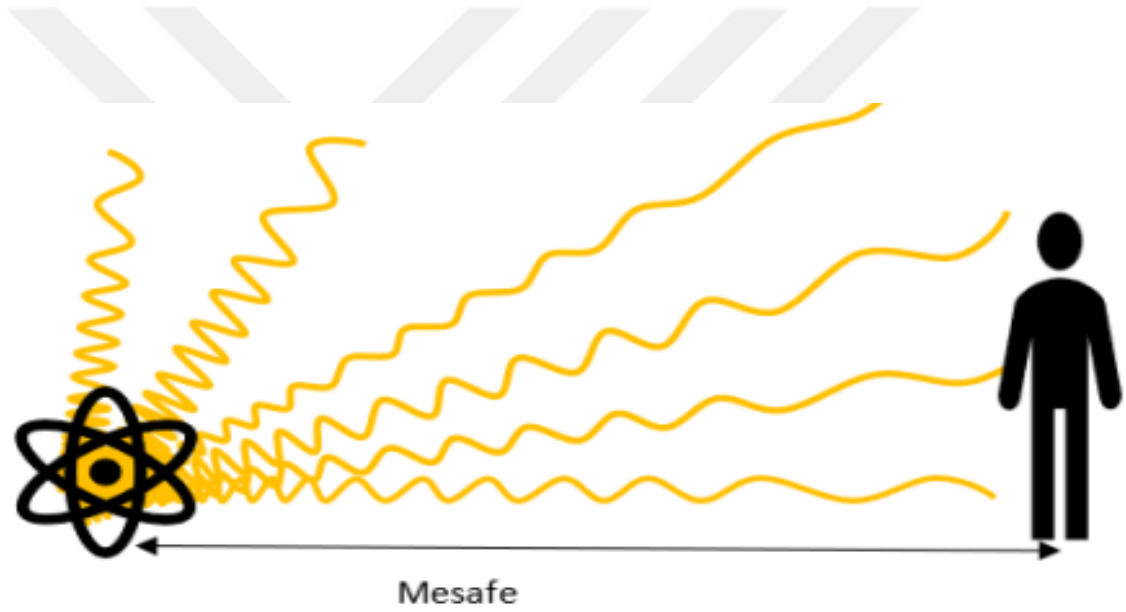
$$D_1 \times I_1 = D_2 \times I_2$$

denkleminde faydalanılarak farklı mesafelerdeki doz oranları hesaplanabilir (Yüksel 2024).



Şekil 21. Ters kare kanunu

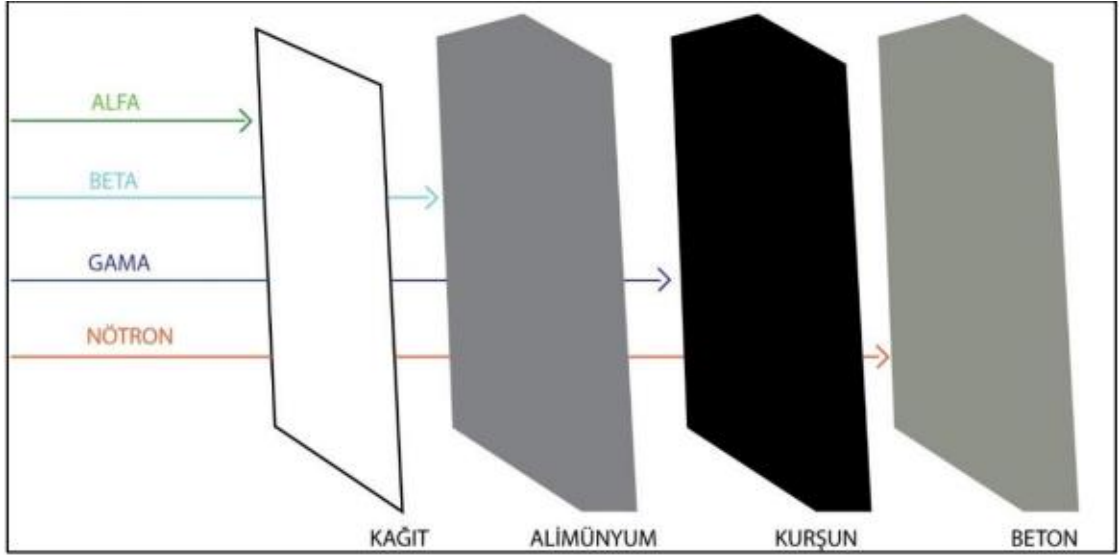
Fotonların mesafe ile seyrelmesini görsel olarak açıklayan şema aşağıdaki gibidir.



Şekil 22. Radyasyondan korunma yolları uzaklık

Zırhlama kuralı

Zaman ve mesafe kriterlerinin yetersiz kaldığı durumlarda radyasyonun etkisini azaltmak amacıyla fiziksel engelleyiciler yani “zırh” kullanılır. Radyasyon türüne göre farklı zırhlama malzemeleri tercih edilir. Örneğin, alfa parçacıkları bir kağıtla durdurulabilirken, beta radyasyonu için plastik veya cam, gama ve X-ışını gibi yüksek enerjili ışınlar için kurşun; nötronlar için ise su ya da beton gibi yoğun materyaller kullanılmaktadır (Kural 2019). Farklı radyasyon türleri için gerekli olan koruyucu malzemeleri gösteren karşılaştırmalı şematik çizimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 23. Radyasyon korunma yolları zırhlama

Zırhlama prensibi kapsamında, radyasyondan korunmada uygulanan temel yaklaşımlardan biri de ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ilkesidir. Bu ilke, alınan radyasyon dozunun makul ölçüde en düşük düzeyde tutulmasını hedefler. ALARA ilkesi, doz ölçüm sistemlerinin kurulması, radyasyon alanlarında geçirilen sürenin azaltılması, uygun koruyucu ekipmanların kullanılması ve çalışanlara gerekli eğitimin verilmesini kapsayan çok yönlü bir yaklaşımdır. Zırhlama performansını belirleyen bazı temel parametreler şunlardır (Kalkan 2025).

- Zırh malzemesinin atom numarası
- Malzemenin yoğunluğu
- Gelen foton enerjisi
- Kullanılan zırh kalınlığı
- İyonizasyon etkisi ve foton-madde etkileşimi

Atom numarası yüksek olan malzemeler, düşük atom numaralı malzemelere göre fotonları daha etkili biçimde soğurur. Bu durum, yüksek Z’li çekirdeklerin güçlü elektromanyetik alanlarının fotonları daha fazla etkilemesiyle ilgilidir. Ayrıca malzemenin yoğunluğu arttıkça radyasyonun daha fazla atomla çarpışarak soğurulması sağlanır. Gelen radyasyonun enerjisi arttıkça, zırhın kalınlığının da artırılması gerekir. Bu nedenle, zırhlama malzemesi seçiminde enerjiye özgü davranış dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, zaman, mesafe ve zırhlama prensipleri bir arada uygulanarak radyasyonun biyolojik etkileri minimize edilebilir. Bu üç temel prensip, tıpta radyasyonla çalışan tüm profesyoneller için kritik öneme sahiptir ve hem bireysel sağlık hem de mesleki güvenlik açısından dikkatle uygulanmalıdır.

Radyasyondan Korunmanın Gerekçeleri

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte radyasyon, modern yaşamın kaçınılmaz bir parçası haline gelmiştir. Günümüzde radyasyon, tıp, nükleer enerji, endüstri, gıda güvenliği ve inşaat gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımı, radyasyonun avantajlarının yanı sıra potansiyel riskleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle, yüksek düzeyde radyasyona uzun süre maruz kalmak, ciddi biyolojik ve genetik hasara neden olabilir ve insan sağlığı üzerinde kalıcı etkiler bırakabilir. Bu nedenle, radyasyona maruz kalmayı sınırlamak ve mümkün olan en düşük seviyeye indirmek büyük önem taşımaktadır.

Bazı durumlarda, özellikle sağlık hizmetleri, araştırma laboratuvarları veya endüstriyel tesislerde, radyasyon kaynaklarından tamamen kaçınmak mümkün değildir. Bu tür ortamlarda çalışan bireyler ve topluluklar için radyasyona maruz kalma düzeyini azaltmak amacıyla çeşitli koruyucu yöntemler geliştirilmiştir. Bu bağlamda, radyasyonun etkilerini sınırlamak için kullanılan koruyucu yapı malzemeleri “koruyucu malzemeler” olarak adlandırılır. Bu malzemeler, iyonlaştırıcı radyasyonun geçişini engelleyen veya önemli ölçüde azaltan fiziksel bariyerler olarak işlev görür (Yüksel 2024).

Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yayınlanan yönetmelik ve kılavuzlar kapsamında, radyasyon güvenliğini sağlamak için çeşitli denetim ve kontrol mekanizmaları oluşturulmuştur. Bu yasal düzenlemeler, çalışanları, hastaları ve halkı radyasyondan korumayı amaçlayan standartları içermektedir. Bu kapsamda geliştirilen koruma sistemleri, özellikle radyoterapi ve tanı amaçlı görüntüleme cihazları gibi tıbbi uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır (Peker 2024). Radyasyona karşı etkili koruma, sadece bireysel sağlık için değil, aynı zamanda çevre güvenliği ve halk sağlığı için de gereklidir.

MATERYAL VE METOT

WinXCOM Programı

1 keV–100 GeV enerji aralığında fotonlarla etkileşen elementler, bileşikler veya karışımlar için kütle zayıflatma katsayıları ile ilgili hesaplamalar, Berger ve Hubbell tarafından geliştirilen XCOM programı ile gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda foton enerjilerinin 1 keV ile 20 MeV arasında değişmesi, birçok elementin kütle zayıflatma ve kütle enerji soğurma katsayılarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmiştir. Bu doğrultuda, XCOM programının Windows tabanlı sürümü olan WinXCOM geliştirilmiştir. WinXCOM, kullanıcı dostu ara yüzü sayesinde malzemelerin tanımlanmasını, yeniden yapılandırılmasını ve kaydedilmesini kolaylaştırarak, hesaplamaların daha verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Program, elementlerin yanı sıra bileşik ve karışımların da hem toplam hem de kısmi foton etkileşimlerine karşılık gelen kütle zayıflatma katsayılarını hesaplayabilmektedir. Ayrıca, elde edilen veriler Excel formatında dışa aktarılabilir ve grafiksel analizlerde kullanılabilir (Berger et al. 1998).

Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu çalışmada, yüksek performanslı radyasyon zırhlama malzemeleri geliştirmek amacıyla mineral esaslı ve sodyum silikat bazlı mastik matrislere çeşitli metal oksit takviyeleri yapılmıştır. Kullanılan katkı maddeleri arasında Nikel (II) Oksit (NiO), Demir (III) Oksit (Fe_2O_3), Krom (III) Oksit (Cr_2O_3) gibi yoğunluğu yüksek, kimyasal ve termal açıdan dayanıklı bileşikler yer almakta olup, bu oksitlerin gama ışını soğurma yetenekleri literatürde incelenmiştir. Ayrıca, Kalekim ve Colofer Solvent bazlı matrisler, bu oksitlerin etkin bir şekilde dağılımını sağlayarak mekanik dayanıklılığı artırmakta ve kompozit yapının homojenliğini korumaktadır. Malzemelerin seçimi, yalnızca fiziksel ve kimyasal dayanımları değil, aynı zamanda radyasyon ile etkileşim mekanizmalarındaki katkıları göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu kapsamda, kullanılan her bir bileşenin özgün yapısal özellikleri ve zırhlama performansları, geliştirilen kompozit malzemenin genel etkinliğini belirlemede kritik rol oynamaktadır.

Aşağıda, çalışmada kullanılan bu bileşenlerin temel kimyasal ve fiziksel özellikleri, kullanım alanları ile radyasyon zırhlama kapasiteleri, her bir malzemenin kompozit yapıya olan katkısı açıklanmaya çalışılmıştır.

NiO: Nickel (II) oxide (NiO), formülü NiO olan, nikel elementinin +2 oksidasyon durumunda oksijenle oluşturduğu bir inorganik bileşiktir. Gri-yeşil renkli, kristalize veya amorf toz formunda bulunur ve yaklaşık 6.67 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Molar kütlesi 74.69 g/mol olan NiO, yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklıdır; yaklaşık 1955°C 'lik bir ergime noktasına sahiptir. Suda neredeyse çözünmeyen yapısıyla fiziksel kararlılığı yüksektir. Endüstride, seramik sırlarında renklendirici olarak, cam katkı maddesi şeklinde ve manyetik ferrit üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca şarjlı pillerde (özellikle Ni-Cd ve Ni-Fe sistemlerinde), süperkapasitörlerde ve elektrokimyasal kataliz sistemlerinde aktif bileşen olarak yer alır (PubChem 2025). NiO'nun iyonlaştırıcı radyasyona karşı sunduğu zırhlama etkisi, bilimsel çalışmalarda da detaylı şekilde araştırılmıştır. Lu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, NiO katkılı $\text{B}_2\text{O}_3\text{--Bi}_2\text{O}_3$ cam sistemleri, farklı oranlarda (%0–%10) hazırlanarak $0.015\text{--}15 \text{ MeV}$ aralığındaki gama ışınlarına karşı test edilmiştir. Sonuçlara göre, artan NiO oranı, özellikle düşük enerjili fotonlara karşı kütleli soğurma katsayısı (μ_m) ve doğrusal soğurma katsayısı (μ_l) değerlerini artırmış; buna karşın yarı değer kalınlığı (HVL) değerlerini düşürmüştür. Örneğin, 0.015 MeV enerjide μ_m değeri %0 katkıda $48.13 \text{ cm}^2/\text{g}$ iken, %10 NiO katkısında $51.08 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ye ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, NiO'nun gama ışınlarını zayıflatmada etkin bir katkı malzemesi olabileceğini ortaya koymaktadır (Tan et al. 2023).

Fe_2O_3 : Demir (III) Oksit (Fe_2O_3), demir elementinin +3 oksidasyon durumunda oluşan yaygın bir metal oksittir. Genellikle kırmızımsı kahverengi toz formunda bulunur ve yaklaşık 5.24 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Molar kütlesi 159.69 g/mol olan bu bileşik, yüksek termal kararlılığı sayesinde endüstride pigment, seramik, katalizör ve manyetik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (PubChem 2025).

Radyasyon zırhlama açısından, Alzahrani ve arkadaşlarının 2024 yılında yayımladığı çalışmada, Fe_2O_3 katkılı silika–borat cam sistemlerinin gama ışını soğurma performansı detaylı olarak incelenmiştir. Sm_2O_3 ile birlikte kullanılan Fe_2O_3 , farklı oranlarda cama ilave edilmiş ve WinXCOM yazılımı yardımıyla kütleli soğurma katsayısı (MAC), doğrusal soğurma katsayısı (LAC) ve yarı değer kalınlığı (HVL) parametreleri hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, özellikle düşük enerjili fotonlarda Fe_2O_3 katkısının MAC ve LAC değerlerini artırırken, HVL'yi düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgular, Fe_2O_3 'ün iyonlaştırıcı radyasyona karşı etkili bir zırh katkı maddesi olabileceğini desteklemektedir (Alzahrani et al. 2024).

Fe_2O_3 'ün hem maliyet açısından erişilebilir olması hem de kimyasal kararlılığı, bu oksidi gama ışınlarıyla çalışan sistemlerde kullanılabilecek çevreci ve işlevsel bir bileşen haline getirmektedir.

Cr₂O₃: Krom (III) oksit (Cr₂O₃), yeşil renkli, kristal yapılı ve kimyasal olarak kararlı bir metal oksittir. Krom elementinin +3 oksidasyon durumu ile oksijenin birleşmesi sonucu oluşur ve formülü Cr₂O₃'tür. Yaklaşık 5.22 g/cm³ yoğunluğa ve 151.99 g/mol molar kütleye sahip olan bu bileşik, 2435 °C civarındaki yüksek ergime noktası sayesinde termal olarak son derece dayanıklıdır. Su ve birçok asidik çözelti içerisinde çözünürlüğü oldukça düşüktür. Bu yönleriyle Cr₂O₃ cam-seramik, katalizör, aşındırıcı yüzeyler, pigment ve refrakter malzeme gibi çeşitli alanlarda endüstriyel olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (ChemSpider 2025; NIST 2025; PubChem 2025).

Cr₂O₃'un radyasyonla etkileşim özellikleri, bilimsel literatürde ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Rammah (2021) yürüttüğü bir çalışmada, 50B₂O₃–25Bi₂O₃–25Li₂O₃ cam sistemine %0–1.5 oranında Cr₂O₃ katkısı uygulanmış ve gama ışınlarına karşı zırhlama kapasitesi değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, Cr₂O₃ içeriğinin artması ile birlikte doğrusal soğurma katsayısı (LAC) değerinin 128 cm⁻¹'den 156 cm⁻¹'ye yükseldiği; kütleli soğurma katsayısı (MAC) değerinin arttığı ve yarı değer kalınlığı (HVL) değerinin azaldığı rapor edilmiştir. Aynı zamanda camın elastik modülleri, yoğunluğu, etkili atom numarası (Z_{eff}) ve hızlı nötron uzaklaştırma kesit alanı (Σ_R) da Cr₂O₃ katkısıyla birlikte artmıştır.

Benzer şekilde, Al-Buriahi ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında ise Cr₂O₃ katkılı Pb–Na–B₂O₃ cam sistemleri hem Geant4 Monte Carlo simülasyonları hem de Phy-X/PSD yazılımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Cr₂O₃'un gama ışını soğurma kapasitesini iyileştirdiğini ve zırhlama parametrelerinde önemli gelişmeler sağladığını göstermiştir. Bu sonuçlar, Cr₂O₃'un sadece mekanik özellikleri değil, aynı zamanda iyonlaştırıcı radyasyona karşı gösterdiği etkinlikle de ileri düzey zırhlama teknolojilerinde değerli bir katkı malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır (Al-Buriahi et al. 2020).

Kalekim: Mineral esaslı mastik matris yapısına sahip, inşaat ve endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanılan bir bağlayıcı malzemedir. İçeriğinde yaklaşık %35 Portland çimentosu, %52,5 kuvars kumu (SiO₂), %10 kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve %2,5 redispersible polimer tozu bulunmaktadır. Portland çimentosu bağlayıcı görev görürken, kuvars kumu ve kalsiyum karbonat malzemenin mekanik dayanıklılığını artıran dolgu malzemeleri olarak işlev görür. Redispersible polimer tozu ise karışımın esnekliğini ve işlenebilirliğini iyileştirir. Bu kombinasyon, Kalekim mastik matrisinin kimyasal, termal ve mekanik açıdan dayanıklı bir yapı oluşturmasını sağlar (Kalekim 2023).

Kalekim ve benzeri mineral esaslı mastik matrislerin radyasyon zırhlama performansları, portland çimentosu bazlı kompozitler üzerinde yapılan çalışmalarda dolaylı olarak desteklenmektedir. Portland çimentosu ve kuvars kumu gibi bileşenlerin homojen

dağılımı, kompozitin mekanik sağlamlığını ve radyasyonun etkili soğurulmasını kolaylaştırır. Özellikle yüksek yoğunluklu metal oksitlerle takviye edildiğinde, bu tür mastik matrisler gama ışınlarını zayıflatmada etkin bir bariyer oluşturur (Kanagaraj et al. 2024).

Colofer Solvent: Mineral esaslı, sodyum silikat (Na_2SiO_3) bazlı bir mastik matris malzemesidir. Kompozit sistemlerde bağlayıcı olarak görev yapan bu ürün, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılık ve mekanik bütünlük açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Colofer Solvent, yapısında kalsiyum karbonat (CaCO_3), alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2), kaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), cam elyaf ve sodyum silikat gibi inorganik bileşenleri farklı oranlarda içermektedir. Bu katkılar sayesinde yapıların hem fiziksel dayanımını hem de radyasyonla etkileşim kapasitesini artırmaya yönelik özellikler sergilemektedir.

Alümina ve titanyum dioksit gibi yüksek atom numaralı bileşikler, gama ışınlarının soğurmasına katkı sunarken, kaolin ve cam fiber gibi katkılar da termal kararlılığı ve mekanik direnci destekleyici özellik gösterir. Sodyum silikat esaslı bağlayıcı matris, bu katkılarının homojen dağılmasını sağlayarak yapısal bütünlüğü korur. Literatürde benzer bileşenlerin yer aldığı sodyum silikat temelli sistemlerin hem mekanik dayanıklılık hem de gama ışını zayıflatma kapasitesi açısından başarılı sonuçlar verdiği raporlanmıştır (Albarzan et al. 2021).

Metaloksik Takviyeli Kompozitler

Metal oksit takviyeli kompozit malzemeler, özellikle iyonlaştırıcı radyasyona karşı koruyucu uygulamalarda kurşunsuz alternatif çözümler olarak öne çıkmaktadır. Bu kompozitler, yüksek atom numarasına sahip metal oksitlerin (örneğin Bi_2O_3 , Gd_2O_3 , CdO , TiO_2 , Fe_2O_3 , NiO , Cr_2O_3 gibi) uygun bir matris içinde dağıtılmasıyla üretilir ve hem mekanik özellikler hem de radyasyon etkileşimi açısından önemli avantajlar sunar. Gelişmiş radyasyon koruma performansına sahip bu yapılar, nükleer enerji, sağlık hizmetleri, havacılık, savunma sanayii ve radyoterapi odaları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metal oksit katkı maddelerinin kompozit matrislere entegrasyonu, yoğunluğu artırarak malzemenin kütle absorpsiyon katsayısı (MAC) ve doğrusal absorpsiyon katsayısı (LAC) değerlerinde önemli artışlara neden olur. Alabsy ve Abd Elzaher (2023), Geant4 simülasyonları kullanarak Bi_2O_3 , CuO , CdO ve Gd_2O_3 içeren EPDM (Etilen Propilen Dien Monomer) kauçuk matris kompozitlerinin gama ışını koruma kapasitesini analiz etmiş ve yüksek Z değerlerine sahip katkı maddelerinin düşük enerjili fotonlara karşı zayıflama verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu çalışmada, katkı maddesi oranları arttıkça yarı değer tabakası (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir, bu da daha az kalınlık ile daha yüksek koruma sağlandığını göstermektedir.

Benzer şekilde, Albarzan ve meslektaşları (2021), titanyum dioksit (TiO_2) katkı maddelerinin silikat bazlı cam sistemlerinin hem mekanik özelliklerini hem de radyasyon etkileşim kapasitesini iyileştirdiğini bildirmiştir. Bu çalışmada, TiO_2 içeriğindeki artış sadece camın sertliğini ve elastik modülünü artırmakla kalmamış, aynı zamanda gama ışınlarının zayıflamasında da aktif bir rol oynamıştır. Yüksek atom numaralı metal oksitler matris yapısı içinde homojen olarak dağıldığında, elde edilen kompozitin yapısal bütünlüğü de önemli ölçüde korunur.

Bu bağlamda yürütülen mevcut çalışmada, NiO , Fe_2O_3 ve Cr_2O_3 gibi metal oksitler, Kalekim ve Colofer Solvent gibi inorganik bileşenler içeren matris sistemlerine farklı oranlarda entegre edilmiştir. Bu ilaveler, önceki literatürde etkinliği kanıtlanmış oksitlerin kullanımına paraleldir ve mekanik mukavemet ve zırh performansını iyileştirmek için benzer ilkeler kullanır. Elde edilen kompozit yapılar hem laboratuvar tabanlı soğurma ölçümleri hem de teorik hesaplamalar yoluyla değerlendirildi ve böylece metal oksit katkı maddelerinin performans üzerindeki etkisi gösterildi. Böylece, çalışmamız metal oksit içeren kompozit sistemlerin sadece geleneksel polimer ve cam sistemlerinde değil, mastik bazlı yapılarda da etkili ve uygulanabilir alternatifler sunduğunu göstermektedir.

Radyasyon Zırhlama Parametreleri

Radyasyon zırhlama parametreleri sekiz farklı başlıkta incelenmektedir.

- Kütle Soğurma Katsayısı (MAC)
- Lineer Soğurma Katsayı (LAC)
- Yarı Değer ve Onda Bir Değer Kalınlıkları (HVL/TVL)
- Ortalama Serbest Yol (MFP)
- Etkin Atom Numarası ve Etkin Elektron Yoğunluğu ($Z_{\text{eff}}/N_{\text{eff}}$)
- Eş Değer Atom Numarası (Z_{eq})
- EBF (Exposure Buildup Factor, Maruz Kalma Buildup Faktörü)
- EABF (Energy Absorption Buildup Factor, Soğurma Buildup Faktörü)

Kütle soğurma katsayısı

Radyasyonun malzemeye etkileşmesi malzemenin farklı yoğunlukta olması zırhlama malzemesinin soğurma değerlerini değiştirmektedir. Bunun önüne geçilmesi için lineer soğurma katsayısının malzemenin yoğunluğuna bölünmesiyle kütle soğurma katsayısı bulunmuş olur (Aygün 2010).

Kütle soğurma katsayısı (μ_m , cm²/g), malzemenin lineer zayıflatma katsayısının yoğunluğuna oranlanarak hesaplamaktadır ve bu özellik aşağıda gösterilen denklemle ifade edilir (Aygün 2010).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

μ_m : Kütle soğurma katsayısı (cm²/g)

μ : Lineer soğurma katsayısı (cm⁻¹)

ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/cm³)

Lineer soğurma katsayısı

Elektromanyetik radyasyon, madde ile etkileşime girdiğinde bu etkileşim genellikle atom çekirdeği, çekirdek etrafındaki alan veya atomun elektronları üzerinden gerçekleşir. Bu etkileşimler sonucunda radyasyonun enerjisinde bir azalma (soğurulma) meydana gelebilir veya radyasyon elastik ya da inelastik saçılma gibi süreçlere uğrayabilir. Radyasyonun madde ile etkileşimi, belirli olayların ortaya çıkmasına yol açar. Bunlar fotoelektrik, compton ve çift oluşum olaylarıdır. Bu olayların gelme ihtimalleri gama ışınlarının enerjilerine ve malzemenin atom numarasına bağlıdır. I şiddetinde bir gama radyasyonu Δx kalınlığındaki zırhlı malzemeye gönderilirse

$$\Delta I = -\mu I \Delta x \quad (1)$$

Radyasyon şiddeti ΔI kadar azalır. Bunun integrali alınırsa;

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) t} \quad (2)$$

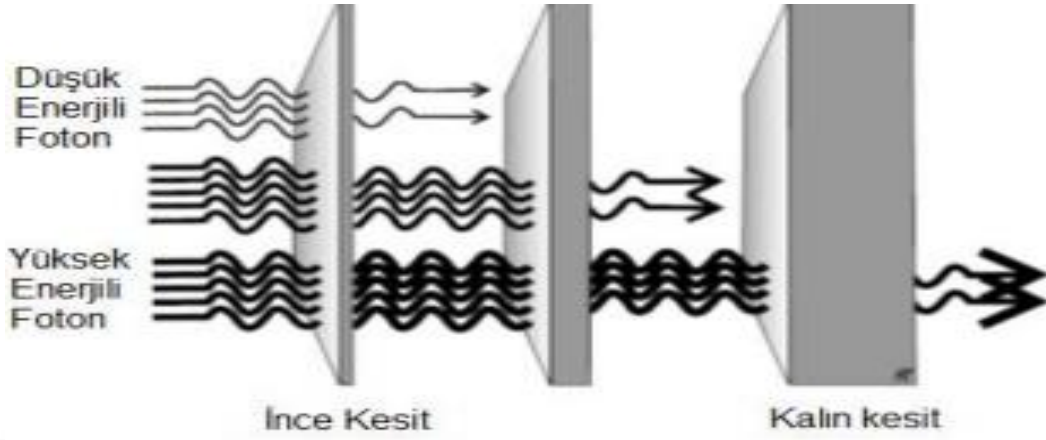
olur. Bu ifadede μ lineer soğurma katsayısı olup ve her zırhlı malzeme için değişen sabittir. I zırhlı malzemedan çıkan radyasyon şiddeti, I_0 zırhlı malzemeye gelen radyasyon şiddeti, x malzemenin kalınlığı ve μ lineer soğurma katsayısıdır (Aygün 2010). Lineer soğurma katsayısı

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3)$$

şeklindedir.

Burada τ , fotoelektrik soğurma katsayısı, σ compton soğurma katsayısı, κ ise çift oluşum soğurma katsayısıdır. μ lineer soğurma katsayısı (cm⁻¹) üçünün toplamına eşittir

(Aygün 2010). Düşük ve yüksek enerjili fotonları engelleyecek kesitler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Ridha 2016).



Şekil 24. Gelen fotonların enerjisinin malzemenin kalınlığına bağlı olarak değişimi

Yarı değer ve onda-bir değer kalınlığı (HVL/TVL)

Yarı değer kalınlığı (HVL), gelen radyasyon şiddetini yarıya düşüren malzeme kalınlığını gösterir. Onda bir değer kalınlığı (TVL) ise gerekli malzeme kalınlığını gelen foton şiddetine göre onda birine düşüren parametredir. Aşağıda verilen denklemlere göre hesaplanmaktadır (Aygün 2010).

$$HVL = \ln 2 / \mu \text{ (cm)} \text{ (Yarı Değer Kalınlık Denklemi)}$$

$$TVL = \ln 10 / \mu \text{ (cm)} \text{ (Onda- Bir Değer Kalınlık Denklemi)}$$

HVL, Yarı kalınlık değeri küçükse, malzeme ışını hızlı bir şekilde soğurur. μ değerinin yüksek olması, malzemenin daha yüksek bir soğurma özelliğine sahip olduğunu ve dolayısıyla yarı kalınlığının daha düşük olduğunu göstermektedir.

TVL, ise aynı şekilde bir malzemenin ışını ne kadar etkili soğurduğunu göstermektedir. TVL değeri küçükse, malzeme ışının şiddetini daha hızlı bir şekilde %10 seviyesine indirir. μ değerinin daha büyük olması, daha düşük bir TVL değerine sahip olacağı anlamına gelir, bu ise malzemenin daha yüksek bir soğurma özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Ortalama serbest yol (MFP)

Ortalama serbest yol (MFP), bir malzemenin farklı gama enerjilerinde radyasyon zırlama özelliklerini belirlemek için kullanılan parametrelerden biridir. Gama radyasyonunun kalkan malzemesi ile etkileşmeden önce kat edebileceği ortalama mesafe olarak tanımlanmaktadır. Ortalama serbest yol denklemi;

$$\text{MFP} = 1/\mu \text{ (cm)}$$

ile verilmektedir.

Etkin atom numarası (Z_{eff}) ve etkin elektron yoğunluğu (N_{eff})

Z_{eff} , etkin atom numarası gelen radyasyonun malzemenin içine ne kadar girip etki ettiğini belirlemede kullanılır. Gama ışınlarının saçılması ve soğrulması malzemenin yoğunluğu ve atom numarasıyla alakalıdır. Numune bir bileşik, karışım ya da alaşım yapısında, etkin atom numarasının belirlenmesi gereklidir ve bu değer, foton enerjisine bağlı olarak değişir. (Karadoğan 2019). Etkin atom numarasına ilişkin denklem aşağıdaki gibidir:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i} \quad (4)$$

Z_i : Malzemedeki her bir elementin atom numarası

f_i : Her bir elementin malzemedeki mol kesri

A_i : Malzemedeki her bir elementin atom ağırlığı

$(\mu/\rho)_i$: Malzemedeki her bir elementin kütle soğurma katsayısıdır.

N_{eff} , bir malzemenin birim hacimde mevcut elektronların sayısını tanımlayan bir parametre olup atom numarasıyla alakalıdır. Bu, radyasyonun malzeme ile etkileşim oranını belirler. Yoğunluğu yüksek ve yüksek atom numaralı malzemelerde Z_{eff} daha yüksektir (Karadoğan 2019). Etkin elektron yoğunluğu;

$$N_{\text{eff}} = N_A \frac{Z_{\text{eff}}}{\sum_i f_i A_i} \quad (5)$$

denklemleri ile verilir. Burada;

N_A : Avogadro sayısıdır ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Eşdeğer atom numarası (Z_{eq})

Eşdeğer atom numarası (Z_{eq}), bir bileşik ya da karışımın belirli bir foton enerjisinde radyasyonla etkileşim kapasitesini, tek bir elementin atom numarasına eşdeğer olacak şekilde tanımlar. Bu parametre, özellikle gama ışınları gibi fotonik radyasyonlara karşı koruma performansını değerlendirmede kritik bir rol oynar. Z_{eq} değeri, malzemenin içerdiği elementlerin atom numarası, yoğunluğu ve karışımdaki oranlarına bağlı olarak değişkenlik

gösterir. Enerjiye bağımlı bir büyüklük olan Z_{eq} , radyasyonla etkileşim (soğurma ve saçılma) süreçlerini yansıttığından hem teorik hem deneysel analizlerde önemli bir göstergedir. Bu değer genellikle WinXCOM ve Phy-X/PSD gibi hesaplama yazılımları aracılığıyla elde edilir ve deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanır (Şakar et al. 2020).

Z_{eq} , karmaşık yapıları kompozitler, beton veya alaşımlar gibi çok bileşenli malzemelerin, radyasyonla etkileşim davranışını sadeleştirerek tek bir atom numarasıyla temsil eder. Başka bir deyişle, bir malzeme hangi atom numarasına sahip saf bir element gibi davranıyorsa, Z_{eq} o değeri ifade eder. Bu yaklaşım, farklı malzemelerin zayıflatma kapasitelerinin karşılaştırılmasında büyük kolaylık sağlar. Yüksek Z_{eq} değerine sahip malzemeler radyasyonu daha etkin bir şekilde absorbe ettiğinden, nükleer enerji, tıbbi uygulamalar ve uzay teknolojileri gibi alanlarda tercih edilir. Bu bağlamda, Z_{eq} , radyasyon kalkını tasarımlarının optimize edilmesinde vazgeçilmez bir mühendislik aracıdır (Levet 2024). Eşdeğer atom numarası aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$Z_{eq} = \frac{Z_1(\log R_2 - \log R) + Z_2(\log R - \log R_1)}{\log R_2 - \log R_1} \quad (6)$$

Denklem (6) formülünde Z_1 ve Z_2 , sırasıyla R_1 ve R_2 oranlarına denk gelen elementlerin atom numaralarını temsil etmektedir. R ise, belirli bir foton enerjisinde kompozit malzeme numunesi için elde edilen oran değeridir.

Foton çoğalma faktörleri

Radyasyon zırlama analizlerinde, yalnızca doğrudan geçen primer fotonların değil, aynı zamanda ortam içinde gerçekleşen saçılma ve etkileşimler sonucunda oluşan ikincil fotonların da katkısı hesaba katılmalıdır. Bu katkıyı nicel olarak ifade eden parametreler çoğalma (buildup) faktörleridir. İki temel buildup faktörü türü şunlardır:

Maruz kalma buildup faktörü (EBF): Belirli bir kalınlıkta, ortamdaki geçen toplam foton dozunun (birim: röntgen) yalnızca doğrudan geçen foton dozuna oranıdır. EBF, iyonlaştırıcı radyasyonun havadaki etkisini temsil eder ve radyasyon ölçüm cihazlarıyla (örneğin iyonizasyon odalarıyla) doğrudan ilişkili bir parametredir.

Soğurma buildup faktörü (EABF): Belirli bir derinlikte, ortam içinde soğurulmuş enerji miktarının, yalnızca doğrudan gelen fotonlar tarafından bırakılacak enerjiye oranıdır. Bu faktör, özellikle biyolojik doku veya malzeme içindeki enerji emilimini ifade eder ve dozimetri, radyasyon biyofiziği ve tedavi planlaması gibi alanlar için kritik önem taşır.

Bu faktörlerin her ikisi de radyasyon güvenliği, medikal fizik, endüstriyel radyografi ve nükleer tesis tasarımı gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Radyasyonun sadece zayıflamasını değil, aynı zamanda ortamda biriken ikincil etkilerini de hesaba kattıkları için zırlama hesaplarının doğruluğunu önemli ölçüde artırır.

G-P fit parametrelerinin hesaplanması: Numunelerine ait geometrik progresyon (G-P) fit parametreleri; belirlenen eşdeğer atom numarası (Z_{eq}) değerleri ile literatürde yer alan referans veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama sürecinde, her bir foton enerjisi için Z_{eq} değerinin hangi iki elementin atom numarası arasında kaldığı belirlenmiş; ardından bu iki elemente ait G-P parametreleri arasındaki geçiş, logaritmik interpolasyon yöntemiyle yapılmıştır.

$$P = \frac{P_1(\log Z_2 - \log Z_{eq}) + P_2(\log Z_{eq} - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1} \quad (7)$$

Burada P, interpolasyon sonucu elde edilen ve numuneye özgü G-P parametresini temsil etmektedir.

Z_1 ve Z_2 , ilgili foton enerjisinde hesaplanan Z_{eq} değerinin arasında bulunduğu iki elementin atom numaralarıdır. P_1 ve P_2 ise bu iki referans elemente ait, ANSI/ANS-6.4.3 standardına göre tanımlanmış, a, b, c, d ve X_k gibi G-P fit parametreleridir (ANSI/ANS-6.4.3 1991). ANSI/ANS standart referans veri tabanında tanımlı 23 element için, 0,015–15 MeV aralığındaki foton enerjilerine karşılık gelen EABF ve EBF'nin G-P fit parametre değerleri alınmıştır. Bu parametreler, çalışmamızdaki numunelerin GP fit parametrelerini hesaplamak için kullanılmıştır. Kompozitlere ait G-P fit parametreleri kullanılarak, 25 farklı foton enerjisi ve on altı ayrı nüfuz derinliği için EABF ve EBF değerleri, aşağıdaki hesaplama denklemleri yardımıyla belirlenmiştir (Harima 1993; Harima et al. 1986).

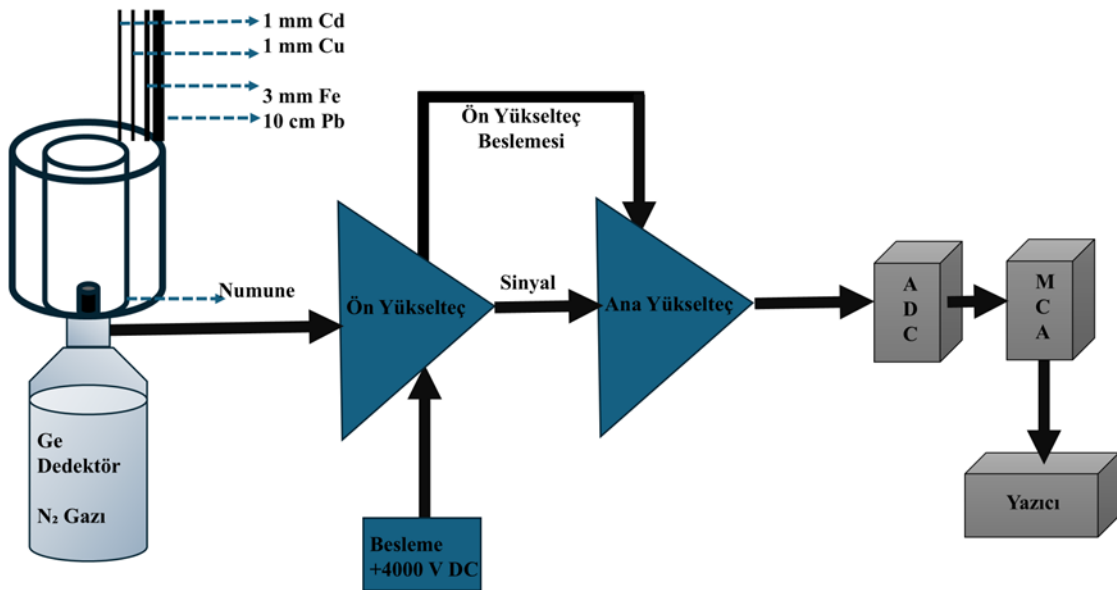
$$\begin{aligned} K \neq 1 \text{ için; } B(E, x) &= 1 + \frac{(b-1)(K^x - 1)}{(K - 1)} \\ K = 1 \text{ için; } B(E, x) &= 1 + (b-1)x \\ \text{Burada } x &\leq 40 \text{ mfp için,} \\ K(E, x) &= cx^a + d \frac{[(\tanh(x/x_k - 2) - \tanh(-2))]}{[1 - \tanh(-2)]} \end{aligned} \quad (8)$$

Burada x, foton kaynağından olan mesafeyi ifade ederken, b ise 1 mfp derinliğinde yığılma faktörünün değeridir. K (E,x) parametresinin değişimi, hem spektrumun 1 mfp'deki şekline hem de foton doz dağılımına etki eder. (8) denklemi, bu parametrenin derinliğe bağlı nasıl değiştiğini tanımlar. Ayrıca a, c, d ve X_k parametreleri, ortamın fiziksel özelliklerine aynı zamanda foton enerjisine bağlı olarak tanımlanmıştır (Küçük ve Gezer 2017).

Gama Spektroskopi Sistemi

Gama spektroskopisi, çevredeki maddelerin radyoaktif özellik taşıyıp taşımadığını belirlemeye yarayan, taşıyorlarsa bu radyasyonun hangi izotoptan kaynaklandığını ve miktarını tespit etmeye yönelik kullanılan etkili bir analiz yöntemidir. Bu teknik sayesinde, farklı enerji seviyelerindeki gama ışınları incelenerek radyonüklidlerin tanımlanması ve miktar tayini yapılabilir. Gama spektrometresinin temel avantajlarından biri, bir numunede bulunan birden fazla radyonüklidin eş zamanlı olarak tespit edilebilmesidir. Ayrıca, kimyasal ayrıştırma gibi ön işlemlere gerek duyulmadan doğrudan analiz yapılabilmesi, bu yöntemin çevresel örnekler, gıda, su ve biyolojik materyaller gibi farklı numunelerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Analiz sırasında kullanılacak numunenin fiziksel özelliklerine, miktarına, aktivite düzeyine ve belirlenen tayin sınırına göre uygun ölçüm kapları tercih edilmektedir. Sayım işlemi genellikle kurşun zırh ile çevrili bir ölçüm odasında, dış etkenlerin en aza indirildiği bir ortamda gerçekleştirilir. Numune, dedektöre mümkün olduğunca yakın yerleştirilerek maksimum sayım verimi elde edilir. Sağlıklı ve güvenilir sonuçlar alabilmek için, numunenin yoğunluğu, miktarı ve kabın yapısı, kalibrasyon sırasında kullanılan referans kaynakla uyumlu olmalıdır. Bu uyumu sağlamak amacıyla numuneye bazı fiziksel işlemler uygulanabilir; örneğin yaş veya kuru olarak öğütme, toz haline getirme veya yakarak kül haline getirme gibi yöntemler kullanılabilir. Bu işlemler, numunenin homojenliğini artırarak ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde iyileştirir (Kılıç 2010). Şekil 25’de şematik gösterilmiştir (Demirdioğlu 2009).



Şekil 25. Gama spektroskopinin şeması

HPGe Dedektörlerin Çalışma Prensibi

Yüksek saflıkta germanyum dedektörler, gama ve X-ışını spektroskopisi gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu dedektörlerde bir elektron-hol çiftinin oluşması için gereken enerji yaklaşık 2,9 eV iken, benzer amaçla kullanılan silisyum dedektörlerinde bu değer yaklaşık 3,6 eV civarındadır. Silisyum bazlı dedektörlerin fiziksel kalınlıkları genellikle birkaç milimetreyi geçmezken, germanyum dedektörleri birkaç santimetre kalınlığa kadar üretilebilmekte ve bu sayede MeV mertebesindeki gama ışınlarının tespiti mümkün olmaktadır.

HPGe (Yüksek Saflıkta Germanyum) dedektörlerinin verimli çalışabilmesi için çok düşük sıcaklıklarda, genellikle -196 °C’de (sıvı azotla) soğutulmaları gerekir. Çünkü oda sıcaklığında, termal uyarım kaynaklı gürültü seviyesi oldukça yüksektir ve bu durum dedektör performansını olumsuz etkiler.

Yarı iletken dedektörlerin çalışma prensibi genel olarak şu şekildedir: Dedektöre ulaşan iyonlaştırıcı radyasyon, aktif bölge olarak adlandırılan germanyum kristali ile etkileşime girer. Bu etkileşim sonucunda, yarı iletken malzemenin atomları iyonize olur ve elektron-hol çiftleri oluşur. Oluşan çiftlerin sayısı, dedektöre gelen radyasyonun enerjisi ile doğru orantılıdır. Bu süreçte, elektronlar valans bandından iletim bandına geçerken, aynı zamanda valans bandında hol adı verilen boşluklar meydana gelir.

Dedektör içinde uygulanan elektrik alan sayesinde elektronlar ve hol’ler karşılıklı elektrotlara doğru hareket eder. Bu taşıyıcıların hareketi, dış devrede ölçülebilir bir elektriksel sinyal oluşturur. Elde edilen bu sinyal, radyasyonun enerjisi hakkında bilgi verirken, birim zamanda alınan sinyal sayısı ise radyasyonun şiddetini belirlemeye yardımcı olur (Bilgiç 2020).

Sayım Sistemi

Sayım siteminde elemanlar sayma sistemi, dedektör, ön yükseltici, yükseltici, analog sayısal dönüştürücü, puls yükseklik analizörü, asiloskop ve bir yüksek voltaj kaynağından oluşmaktadır.

Yüksek voltaj kaynağı: Yarı iletken dedektör sistemlerinin doğru çalışabilmesi için dedektör üzerine yüksek voltaj uygulanması gereklidir. Bu gerilim, dedektörde oluşan yüklerin toplanmasını sağlar. Genellikle bu voltaj değeri cihaz üreticisi tarafından belirlenir. Bu çalışmada kullanılan HPGe dedektör için uygulanan voltaj -1500 V’tur.

Ön yükseltici: Yarı iletken dedektör sistemlerinde genellikle yüke duyarlı (charge-sensitive) ön yükselticiler kullanılır. Bu yükselticiler, elektronik gürültüyü azaltmak amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Çoğu durumda, giriş devresinde alan etkili transistör (FET) bulunur

ve bu eleman genellikle sıvı azot sıcaklığında (yaklaşık -196 °C) muhafaza edilir. Gürültüyü minimize etmek amacıyla, FET'in bulunduğu bölge detektörün dış kılıfından az miktarda ısı alacak şekilde dizayn edilerek, dedektör bölgesinden biraz daha sıcak tutulur. Ön yükseltici, dedektörden gelen elektrik yükü darbelerini voltaj sinyaline dönüştürür. Bu çıkış sinyallerinin genlikleri, dedektörde toplanan yük, dolayısıyla radyasyonun enerjisiyle doğrudan orantılıdır. Eğer fotonun enerjisi tamamen dedektör tarafından soğurulmuşsa, üretilen sinyal fotonun enerjisini doğru şekilde temsil eder.

Ana yükseltici: Yükseltici iki ana işlevi yerine getirir. Ön yükselticiden gelen zayıf sinyalleri, ölçüm yapılabilecek düzeye çıkarmak ve sinyal genliğini koruyarak, girişteki darbe ile radyasyon enerjisi arasındaki doğrusal ilişkiyi sürdürmektir.

Modern yükseltici sistemlerde çıkış sinyalinin genliği genellikle 2 V ile 10 V arasında değişmektedir. Cihazlar çoğunlukla hem unipolar (yalnızca pozitif veya yalnızca negatif tepe noktası olan) hem de bipolar (hem pozitif hem de negatif bileşeni içeren) çıkışlara sahiptir. Genellikle daha yüksek sinyal-gürültü oranı sağladığı için unipolar çıkışlar tercih edilir.

Yükseltici sistemde kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken bir diğer önemli parametre de "şekillendirme zamanı" (shaping time) sabitidir. Daha uzun shaping time değerleri, gürültünün ortalamasını alarak daha yüksek enerji çözünürlüğü sağlar. Ancak bu durum aynı zamanda daha fazla rastlantısal darbe üst üste binmesine (pile-up) sebep olabilir. Eğer sistem yüksek sayım hızlarında (örneğin 2000 sayım/saniye) çalıştırılacaksa, daha kısa shaping time tercih edilebilir.

Analog-dijital dönüştürücü (ADC): Yükselticiden gelen analog voltaj sinyallerini, X-ışını fotonunun enerjisiyle orantılı olacak şekilde sayısal değerlere dönüştürür. Bu işleme analog-sayısal dönüşüm denir. Sayılan her bir darbe, genliğine karşılık gelen sayısal değerde analizör belleğinde birikir ve bu bilgiler, ölçüm sonucunda enerji spektrumu olarak görüntülenir.

Çok kanallı analizör (MCA): ADC'den gelen dijital sinyalleri belirli enerji aralıklarına göre kanallara dağıtır ve bunları bilgisayar belleğinde saklar. Her kanal, belirli bir enerji aralığını temsil eden bir tür dijital kutu olarak işlev görür. MCA, gelen sinyallerin enerjilerine karşılık gelen kanallarda sayım yapar ve bu şekilde enerji-spektrum grafiği elde edilir. Doğru analiz yapılabilmesi için cihazın enerji kalibrasyonu, ölçümler öncesinde bilinen enerji seviyelerine sahip standart kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilmelidir (Perişanoğlu 2018).

Kompozit malzemelerin gama ışınlarını soğurma kapasiteleri, farklı oranlarda içerdikleri bileşenler (örneğin Cr₂O₃, NiO, Fe₂O₃ gibi metal oksitler) ve bağlayıcı olarak

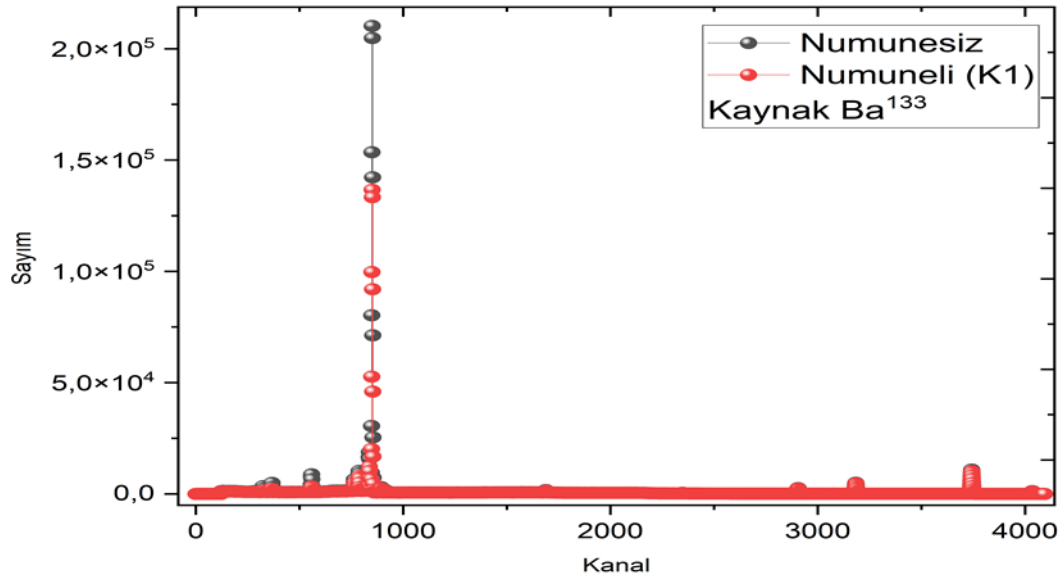
kullanılan Kalekim ile Colofer Solvent maddeleriyle hazırlanan K1'den K5'e kadar beş farklı numune üzerinde incelenmiştir. Deneylerde gama ışını kaynağı olarak ^{133}Ba ve ^{241}Am izotopu kullanılmış ve bu kaynak aracılığıyla 0.0309, 0.0354, 0.0532, 0.0810, 0.2760, 0.3030, 0.3560 ve 0.3840 MeV enerjilerine sahip fotonlarla uyarılma gerçekleştirilmiştir.

Her bir numune, 900 saniyelik sürelerle üç kez ışınlanmış ve bu ışınlamalar sonucunda elde edilen spektrumlardaki pik alanları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının doğruluğunu artırmak amacıyla, her numune için elde edilen pik alanlarının ortalaması alınarak deneysel hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 26. Gama ölçümlerinde kullanılan kaynak

¹³³Ba kaynak ile yapılan ölçümlere ait boş ölçüm ve numune varken (K1) sayım grafiği Şekil 27’de olup, örnek olarak 0,356 MeV’lik enerjiye karşılık gelen pik değeri Origin Pro yazılımı ile grafik edilmiştir (OriginPro 2025).



Şekil 27. K1 sayım grafiği

Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi

Tablo 3’te verilen bileşen oranlarına uygun olarak hazırlanan numuneler, öncelikle hassas terazi ile tartılarak ölçülmüştür. Toz formundaki bu malzemeler, homojen bir karışım elde edilmesini sağlamak amacıyla BioCote marka laboratuvar tipi blender cihazında 2500 devirle 20 dakika süreyle karıştırılmıştır. Elde edilen karışıma belirlenen oranlarda colofer mastik katkı maddesi ilave edilmiş ve yeniden 20 dakika boyunca aynı cihazda karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda, yarı kıvamlı ve şekillendirilebilir bir hamur yapısı elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, oda sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek soğumaya bırakılmış; ardından kuruyan örnekler, tekrar toz haline getirilmiştir.

Elde edilen toz numuneler, gama spektroskopisi analizine uygun hale getirilmek amacıyla XRF analizi laboratuvarında yer alan pellet oluşturma seti kullanılarak hazırlanmıştır. Tablo 3’te belirtilen kütle oranlarına göre hassas terazide ölçülen numuneler, silindirik forma sahip olacak şekilde SPECAC manuel hidrolik baskı makinasında 6 tonluk basınç uygulanarak preslenmiştir. Oluşturulan pellet numuneler, K1, K2, K3, K4 ve K5 şeklinde kodlanarak ölçüm için hazır hale getirilmiştir. Araştırmada kullanılan colofer ve kalekim karışımları, çimento, cam elyaf, sodyum silikat ve çeşitli metal oksitlerden oluşmakta olup, radyasyon zırhlama malzemesi olarak alternatif kullanım potansiyeli taşıdığı gösterilmiştir. Numuneler Ba-133 ve

Am-241 radyoaktif kaynaklarla 900 saniyelik gama ışını bombardımanına tabi tutularak soğurma kabiliyetleri 0,0309–0,3840 MeV enerji aralığı için analiz edilmiştir.



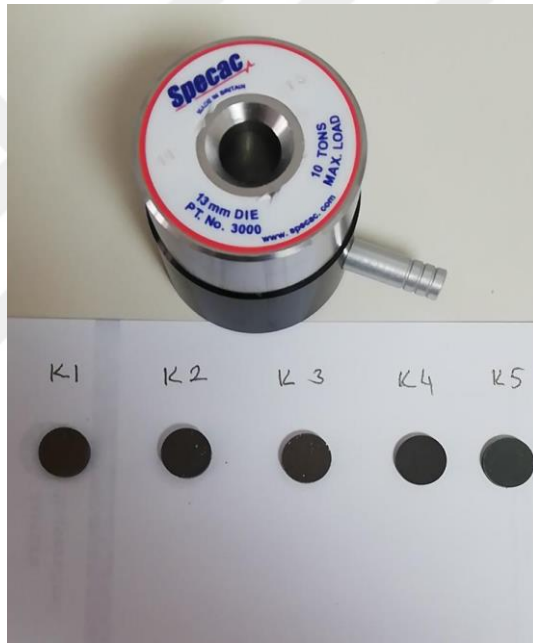
Şekil 28. Numunelerin üretim ve hazırlanma sürecine ait görseller

Numuneler hazırlanırken kullanılan malzemelerin kütle birleşim oranları aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 3. Numuneler Hazırlanırken Kullanılan Malzemelerin Kütle Birleşim Oranları (%)

Örnek	Kalekim	Colofer Solvent	Cr2O3	NiO	Fe2O3	Yoğunluk (g/cm ³)
K1	20	30	5	25	20	2,365
K2	20	30	10	20	20	2,356
K3	20	30	15	15	20	2,331
K4	20	30	20	10	20	2,324
K5	20	30	25	5	20	2,322

Yukarıdaki tabloda hazırlanan malzemelerin kütle birleşim oranları verildikten sonra üretilen numune görselleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 29. Üretilen kompozit numunelere ait görseller

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

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

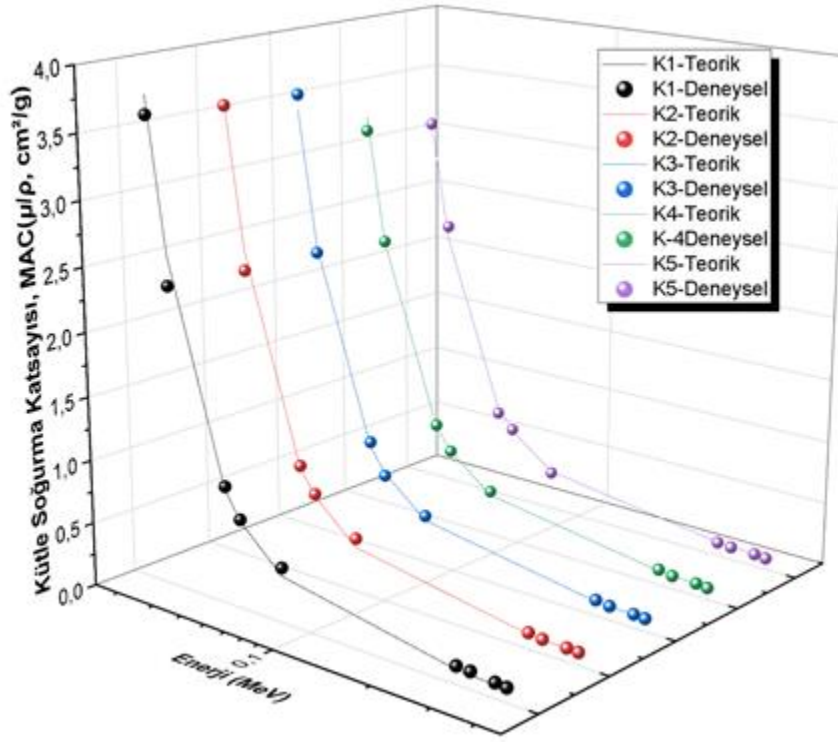
Gama Radyasyonu Zırhlama Parametreleri

Bu çalışmada 5 farklı kompozit numunenin gama radyasyonu zırhlama özelliğini belirlemek için kütle soğurma katsayısı, lineer soğurma katsayısı, yarı kalınlık değeri, onda bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol, etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğunu 0,0309 MeV ile 0,3840 MeV enerji aralığında teorik ve deneysel olarak hesaplanmıştır. Gama ölçümleri ile elde edilen deneysel veriler FitzPeak ve OriginPro yazılımları kullanılarak MAC değerleri hesaplanmıştır (Fitzgerald 2014). Teorik MAC değerleri ise WinXCom programı kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler ve gerekli denklemler kullanılarak ilgili enerji aralığında diğer parametreler hesaplanmıştır. Kütle soğurma katsayılarına ilişkin bilgiler Tablo 4’ te sunulmuştur.

Tablo 4. Kütle Soğurma Katsayısı, MAC (μ/ρ , cm^2/g)

Enerji (MeV)	K1		K2		K3		K4		K5	
	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel
3,09E-02	3,770	3,617	3,600	3,574	3,430	3,548	3,260	3,145	3,091	3,084
3,54E-02	2,594	2,360	2,478	2,322	2,363	2,311	2,247	2,253	2,131	2,233
5,32E-02	0,897	0,924	0,861	0,875	0,825	0,861	0,789	0,803	0,753	0,710
5,95E-02	0,688	0,701	0,662	0,682	0,636	0,616	0,610	0,612	0,584	0,596
8,10E-02	0,365	0,430	0,354	0,424	0,343	0,380	0,333	0,363	0,322	0,309
2,76E-01	0,114	0,140	0,113	0,126	0,113	0,125	0,113	0,123	0,112	0,110
3,03E-01	0,109	0,136	0,108	0,111	0,108	0,110	0,108	0,104	0,107	0,102
3,56E-01	0,101	0,118	0,101	0,106	0,100	0,106	0,100	0,101	0,100	0,100
3,84E-01	0,097	0,111	0,097	0,103	0,097	0,100	0,097	0,092	0,097	0,091

Ayrıca artan enerji ile MAC değerlerinin değişimi grafik olarak Şekil 30’da sunulmuştur.

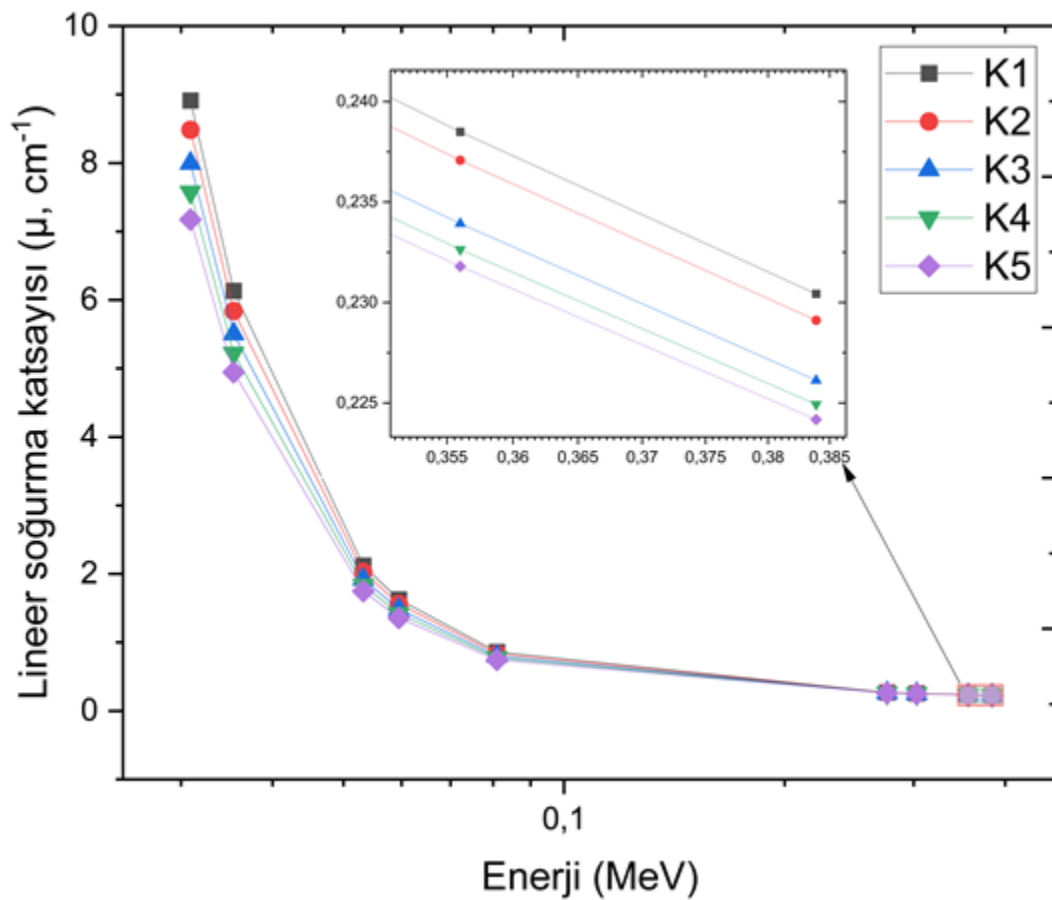


Şekil 30. Numunelerin enerjiye bağlı kütle soğurma katsayısı değerlerinin değişimi

Şekil 30 teorik ve deneysel kütle soğurma katsayısı değerlerinin gelen foton enerjisine göre değişimlerini göstermektedir. Tablo 4 'de her bir numune için teorik ve deneysel kütle soğurma katsayısı değerleri birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Şekil 30'da görüldüğü üzere 0,0309 MeV'de tüm numunelerin en yüksek kütle soğurma katsayısı değerlerine sahiptir. Fotoelektrik olayının baskın olduğu düşük enerji bölgesinde artan enerjiyle birlikte bu değerlerin keskin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi fotoelektrik tesir kesitinin $Z^{4-5}/E^{3,5}$ ile orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer enerji bölgesinde Compton olayı baskın olduğundan dolayı μ/p değişimi daha yumuşak bir eğimle azalmaktadır. Bunun sebebi ise Compton tesir kesitinin Z/E ile doğrusal olarak değişmesinden dolayıdır. Ayrıca bu şekilde, K1 numunesi en yüksek kütle soğurma katsayısına sahipken en düşük değer K5 numunesine aittir. Daha yüksek kütle soğurma katsayısına sahip numunelerin gama radyasyonunu daha iyi soğurduğu bilinmektedir. Dolayısıyla K1 numunesi diğer numuneler ile kıyaslandığında radyasyon soğurma kabiliyeti en yüksek olan numunedir. Bu durum, K1 numunesinde NiO bileşiğinin daha yüksek oranda bulunmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5. Lineer Soğurma Katsayıları (LAC)

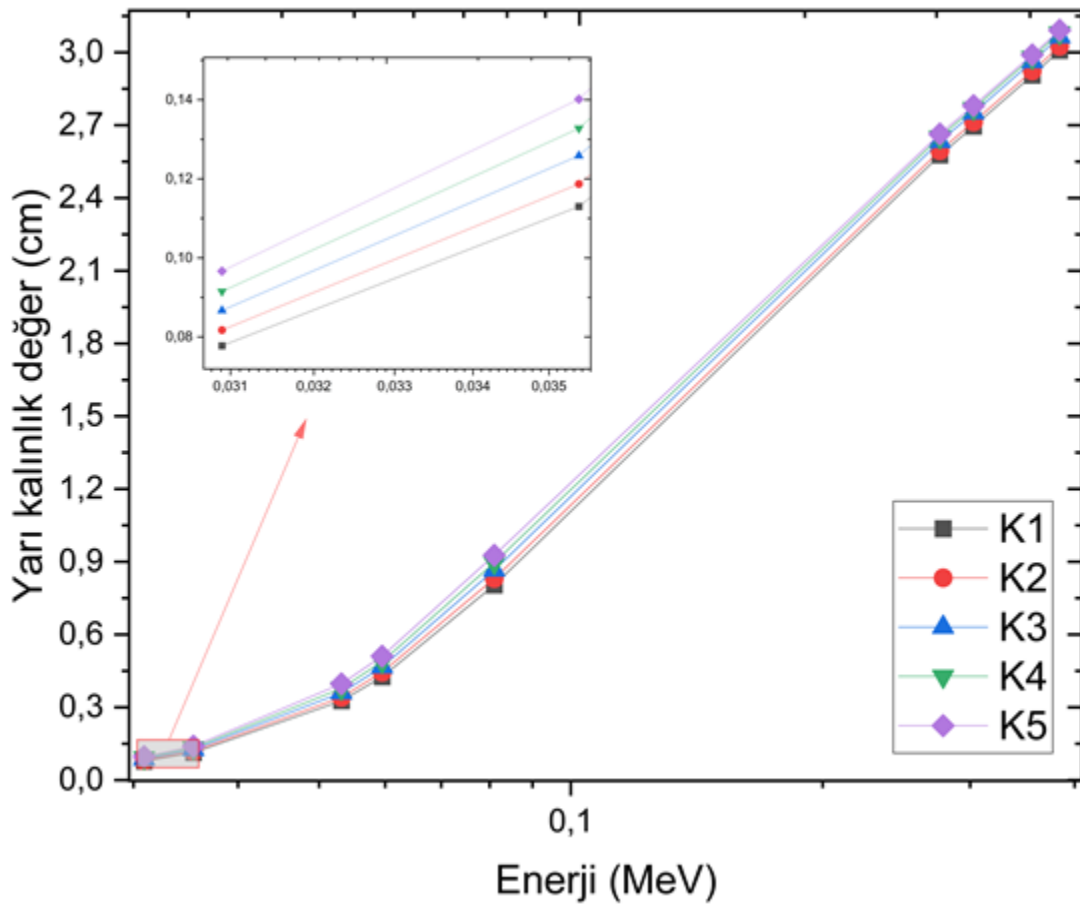
Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	8,914	8,483	7,995	7,576	7,173
3,54E-02	6,134	5,840	5,506	5,221	4,946
5,32E-02	2,122	2,030	1,924	1,834	1,748
5,95E-02	1,628	1,561	1,483	1,418	1,356
8,10E-02	0,863	0,834	0,800	0,773	0,747
2,76E-01	0,269	0,267	0,263	0,261	0,260
3,03E-01	0,257	0,255	0,252	0,250	0,249
3,56E-01	0,238	0,237	0,234	0,233	0,232
3,84E-01	0,230	0,229	0,226	0,225	0,224

**Şekil 31.** Numunelerin enerjiye bağlı lineer soğurma katsayısı değerlerinin değişimi

Tablo 5 ve Şekil 31’de ilgili enerji aralığında lineer soğurma katsayısı değerleri verilmiştir. Bu değerler, her bir numunenin kütle soğurma katsayıları ile numune yoğunluklarının çarpımından elde edilmiştir. Lineer soğurma katsayısının enerjiye bağlı değişimi, kütle soğurma katsayısında olduğu gibi, foton-madde etkileşim mekanizmalarının benzerliğinden ve numunelerin yoğunluklarının birbirine yakın olmasından dolayı paralellik göstermektedir.

Tablo 6. Yarı Değer Kalınlık (HVL)

Enerji	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	0,078	0,082	0,087	0,091	0,097
3,54E-02	0,113	0,119	0,126	0,133	0,140
5,32E-02	0,327	0,341	0,360	0,378	0,396
5,95E-02	0,426	0,444	0,467	0,489	0,511
8,10E-02	0,804	0,831	0,866	0,897	0,927
2,76E-01	2,577	2,595	2,633	2,651	2,664
3,03E-01	2,696	2,713	2,752	2,769	2,781
3,56E-01	2,906	2,924	2,963	2,980	2,990
3,84E-01	3,008	3,025	3,065	3,082	3,092

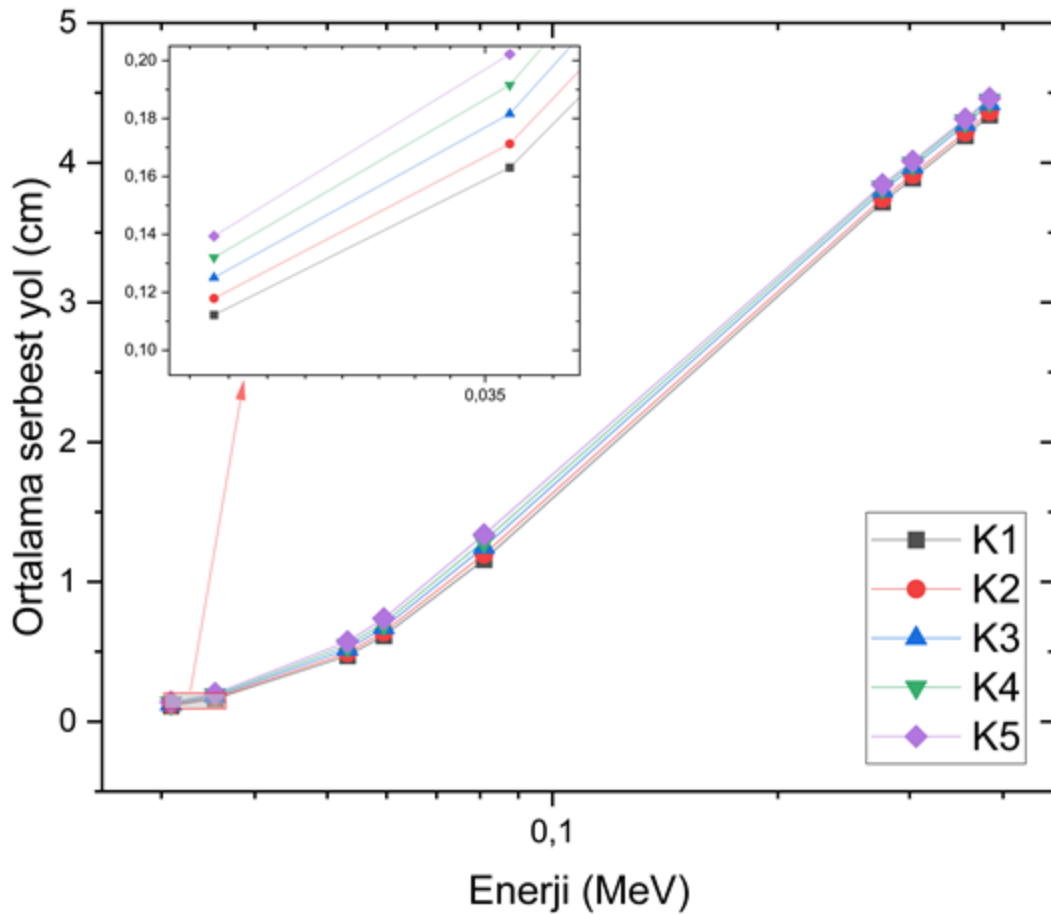
**Şekil 32.** Numunelerin enerjiye bağlı yarı kalınlık (HVL) değerlerinin değişimi

Yarı-değer kalınlık (HVL), bir radyasyon ışınının yoğunluğunu yarıya indirmek için gereken malzeme kalınlığını temsil eden kritik bir parametredir. Bu değer, bir malzemenin radyasyon koruma kapasitesini doğrudan etkiler. HVL ne kadar düşükse, istenen korumayı sağlamak için gereken kalınlık o kadar az olur ve bu da daha etkili bir radyasyon bariyeri anlamına gelir. Tablo 6 ve Şekil 32'deki verilere göre, tüm numunelerin HVL değerlerinin artan

enerji seviyeleriyle birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, yüksek enerjili fotonların malzemeden daha kolay geçmesi nedeniyle daha kalın koruyucu yapılara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Tüm enerji aralıkları göz önüne alındığında, K1 numunesi en düşük HVL değerlerini sergileyerek en iyi koruma performansını göstermiştir. Buna karşılık, K5 numunesi en yüksek HVL değerlerine sahip olarak en düşük koruma etkinliğini göstermiştir.

Tablo 7. Onda Bir Değer Kalınlık (TVL)

Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	0,258	0,271	0,288	0,304	0,321
3,54E-02	0,375	0,394	0,418	0,441	0,466
5,32E-02	1,085	1,134	1,197	1,255	1,317
5,95E-02	1,414	1,475	1,552	1,624	1,698
8,10E-02	2,670	2,760	2,877	2,979	3,081
2,76E-01	8,561	8,622	8,748	8,807	8,850
3,03E-01	8,955	9,014	9,141	9,198	9,238
3,56E-01	9,655	9,712	9,843	9,898	9,933
3,84E-01	9,993	10,050	10,183	10,237	10,272



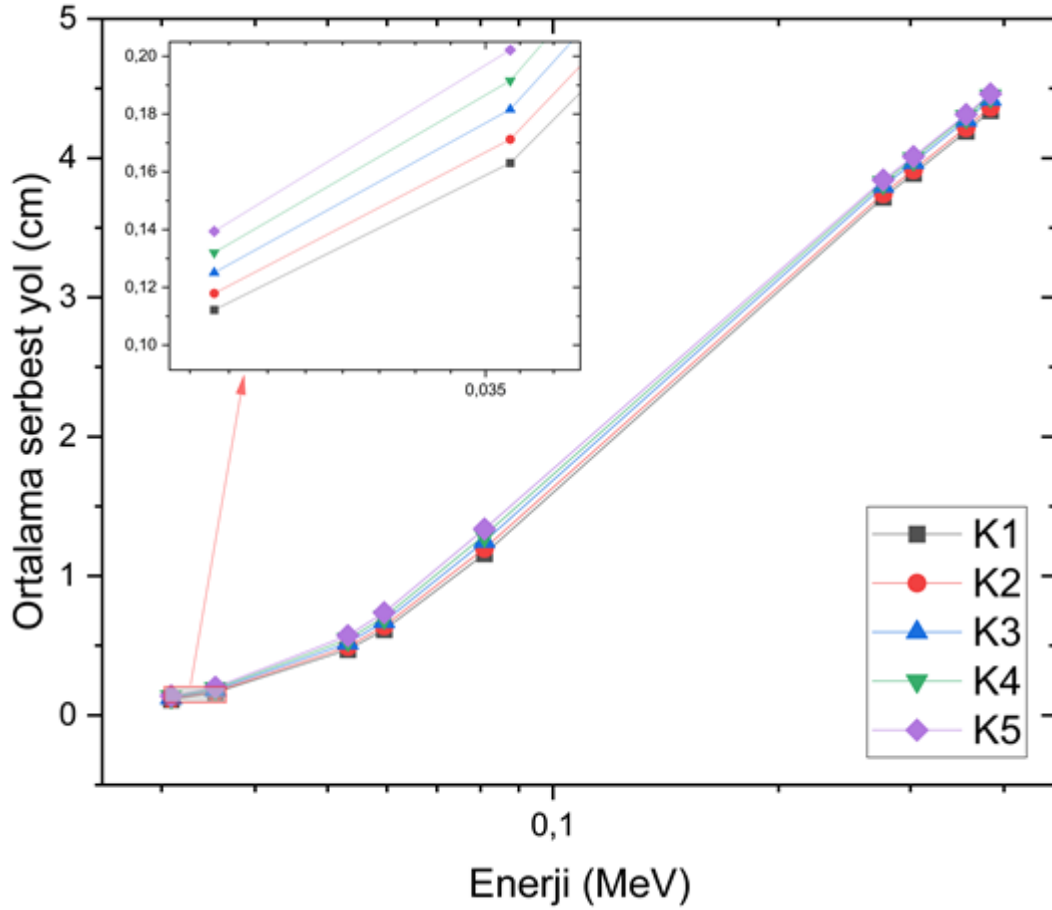
Şekil 33. Numunelerin enerjiye bağlı onda bir kalınlık (TVL) değerlerinin değişimi

Onda bir kalınlık (TVL), radyasyon şiddetini %10 azaltmak için gereken malzeme kalınlığını ifade eden önemli bir parametredir. TVL değerleri enerji arttıkça yükselir; bu da yüksek enerjili fotonların malzeme içinden daha kolay geçtiğini ve daha kalın zırhlama gerektiğini gösterir.

Tablo 7 ve Şekil 33 verilerine göre tüm numunelerin TVL değerleri artan enerji ile artış göstermektedir. K1 numunesi tüm enerji seviyelerinde en düşük TVL değerlerine sahip olup en iyi koruma performansını sergilerken, K5 numunesi en yüksek TVL değerleri ile en düşük koruma etkinliğine sahiptir. Bu durum, numune bileşimlerinin zırhlama performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Tablo 8. Ortalama Serbest Yol (MFP)

Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	0,112	0,118	0,125	0,132	0,139
3,54E-02	0,163	0,171	0,182	0,192	0,202
5,32E-02	0,471	0,493	0,520	0,545	0,572
5,95E-02	0,614	0,641	0,674	0,705	0,737
8,10E-02	1,159	1,199	1,249	1,294	1,338
2,76E-01	3,718	3,744	3,799	3,825	3,843
3,03E-01	3,889	3,915	3,970	3,995	4,012
3,56E-01	4,193	4,218	4,275	4,299	4,314
3,84E-01	4,340	4,365	4,422	4,446	4,461



Şekil 34. Numunelerin enerjiye bağlı ortalama serbest yol değerlerinin değişimi

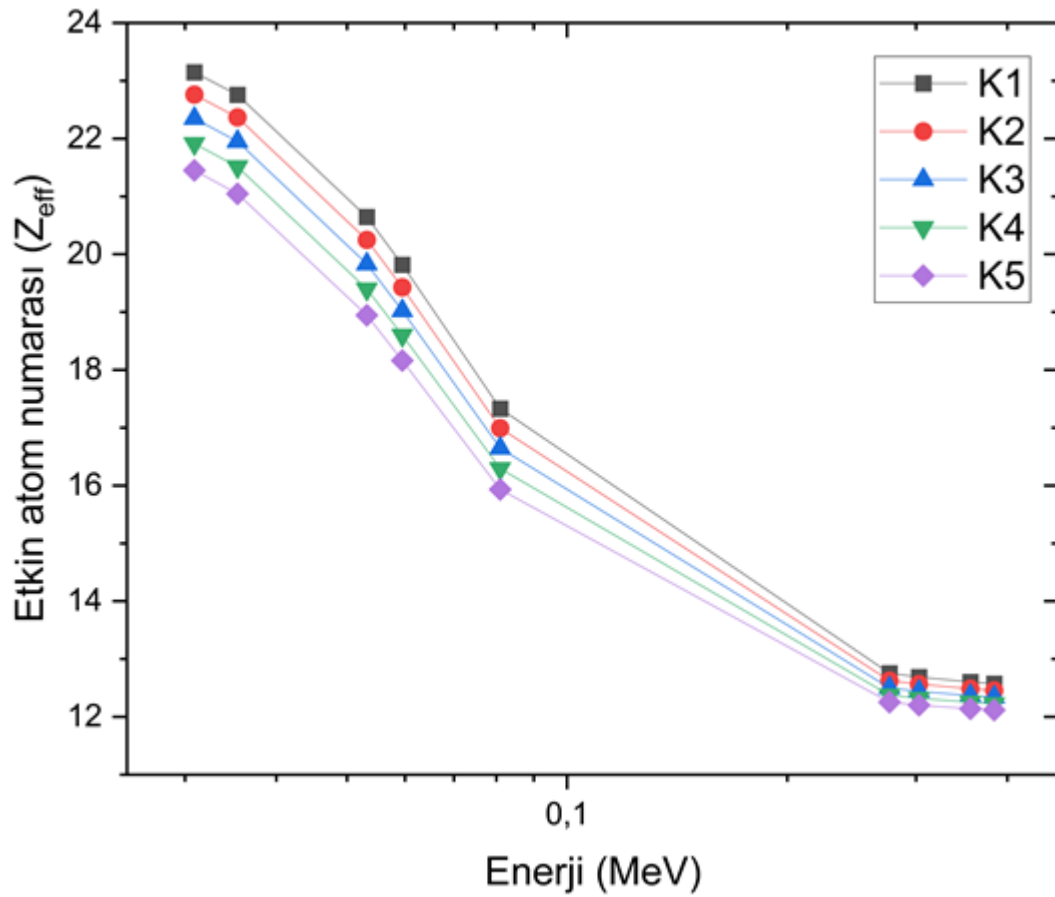
Ortalama serbest yol (MFP), bir parçacığın madde içinde çarpışma yapmadan kat edebildiği ortalama mesafeyi ifade eder. Tablo 8 ve Şekil 34, ilgili enerji aralığında K1–K5 numuneleri için ortalama serbest yol değerlerini göstermektedir. Enerji arttıkça, ortalama serbest yolun belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, yüksek enerjili parçacıkların maddeyle etkileşim olasılığının daha düşük olmasından kaynaklanır. Yani enerjisi yükselen parçacık, madde içinden daha uzun mesafe kat edebilir. Aynı enerji değerinde, MFP'nin sıralaması sırası $K5 > K4 > K3 > K2 > K1$ şeklindedir.

Bu, K1'in malzeme yoğunluğunun veya etkileşim kesitinin diğerlerinden daha yüksek olduğunu; K5'in ise daha düşük etkileşimli veya düşük yoğunluklu bir malzeme olduğunu düşündürür.

Tablo 9 ve Şekil 35'te K1-K5 numuneleri için etkin atom numarasının gelen foton enerjisine göre değişimini gösteren değerler sunulmuştur.

Tablo 9. Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	23,145	22,759	22,349	21,913	21,449
3,54E-02	22,757	22,366	21,951	21,512	21,044
5,32E-02	20,645	20,247	19,832	19,399	18,945
5,95E-02	19,818	19,427	19,022	18,601	18,163
8,10E-02	17,330	16,991	16,645	16,292	15,931
2,76E-01	12,756	12,627	12,501	12,376	12,253
3,03E-01	12,690	12,566	12,443	12,322	12,203
3,56E-01	12,605	12,486	12,369	12,254	12,140
3,84E-01	12,575	12,459	12,343	12,230	12,117

**Şekil 35.** Numunelerin enerjiye bağlı etkin atom numarası değerlerinin değişimi

Etkin atom numarası (Z_{eff}) değerlerinin enerjiye bağlı olarak değiştiği kolayca gözlemlenebilir. Bu parametre, kompoziti oluşturan elementlerin atom numaralarıyla doğrudan ilişkilidir. Z_{eff} , bir bileşik veya alaşımın elektromanyetik radyasyonla etkileşimini belirleyen kritik bir parametredir, çünkü her bir elementin atom numarası, elektron yapısı ve fotonlarla etkileşim özelliklerinde önemli bir rol oynar.

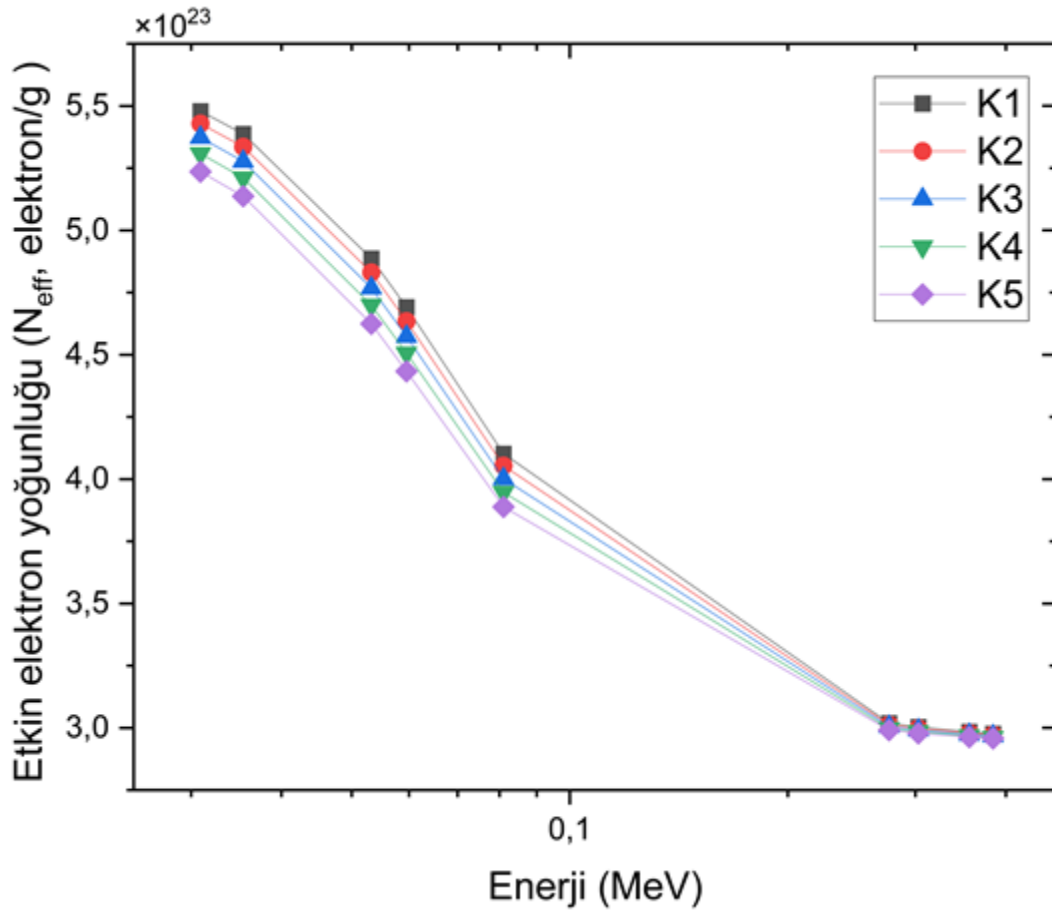
Şekil 35’de numuneler için tüm enerjilerde etkin atom numarası sırası $K5 < K4 < K3 < K2 < K1$ şeklindedir. Kompozit malzemedeki yüksek atom numaralı elementlerin oranı arttıkça, Z_{eff} değerlerinde önemli bir artış gözlenir. Bunun nedeni, ağır elementlerin çekirdeklerindeki daha fazla proton sayısı nedeniyle daha yoğun bir nükleer yüke sahip olmalarıdır. Bu, malzemedeki elektromanyetik radyasyonun soğurulması ve saçılmasında daha etkili bir rol oynamalarını sağlar. Özellikle düşük enerjili bölgede fotoelektrik etkileşim baskın olup, foton enerjisi atomun iç kabuk elektronuna tamamen aktarılır; bu süreç, malzemenin etkin atom numarası (Z_{eff}) ile doğrudan orantılıdır.

Yüksek Z ’li malzemelerde diğer etkileşim mekanizmaları da önemli hale gelir. Compton saçılması ve çift oluşumu gibi süreçler farklı enerji aralıklarında önemli bir rol oynar ve bu mekanizmalar Z_{eff} değerinin enerjiye bağlı olarak değişmesini sağlar

Sonuç olarak, Z_{eff} ’in enerjiye ve malzemedeki elementlerin atom numaralarına bağlı değişimi, malzemelerin radyasyonla etkileşim süreçlerini anlamada temel bir rol oynar. Bu bilgi, radyasyon kalkını tasarımı ve malzeme bileşiminin performansının optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir.(Büyükyıldız 2017; Chatterjee and Vyas 2011; Munyao et al. 2020).

Tablo 10. Etkin Elektron Yoğunluğu (N_{eff})

Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
3,09E-02	5,48E+23	5,43E+23	5,37E+23	5,31E+23	5,24E+23
3,54E-02	5,39E+23	5,34E+23	5,28E+23	5,21E+23	5,14E+23
5,32E-02	4,89E+23	4,83E+23	4,77E+23	4,70E+23	4,62E+23
5,95E-02	4,69E+23	4,63E+23	4,57E+23	4,51E+23	4,43E+23
8,10E-02	4,10E+23	4,05E+23	4,00E+23	3,95E+23	3,89E+23
2,76E-01	3,02E+23	3,01E+23	3,01E+23	3,00E+23	2,99E+23
3,03E-01	3,00E+23	3,00E+23	2,99E+23	2,99E+23	2,98E+23
3,56E-01	2,98E+23	2,98E+23	2,97E+23	2,97E+23	2,96E+23
3,84E-01	2,98E+23	2,97E+23	2,97E+23	2,96E+23	2,96E+23

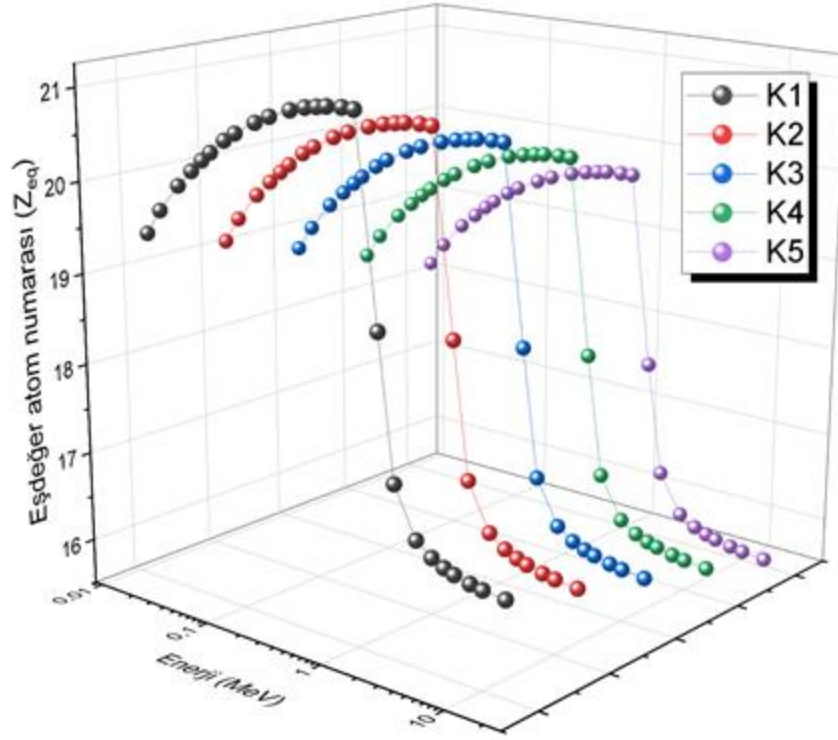


Şekil 36. Numunelerin enerjiye bağlı etkin elektron yoğunluğu değerlerinin değişimi

Tablo 10 ve Şekil 36’da görüldüğü gibi, düşük enerji bölgesinde tüm örneklerin etkin elektron yoğunluğu değerlerinin gelen foton enerjisi arttıkça hızla azaldığı görülmektedir. 0,276 MeV enerjilerinden sonra bu azalma yavaşlamıştır. Bu durum daha önce de açıklandığı gibi farklı enerji bölgelerindeki fiziksel olayların oluşma ihtimallerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Etkin elektron yoğunluğu, denklem 5’teki Z_{eff} değeri ile doğrudan ilişkili olması bu iki parametrenin benzer sonuçları ortaya koyacağını göstermektedir.

Tablo 11. Eşdeğer Atom Numarası (Z_{eq})

Enerji (MeV)	K1	K2	K3	K4	K5
1,50E-02	19,402	19,104	18,807	18,503	18,185
2,00E-02	19,682	19,387	19,078	18,770	18,451
3,00E-02	19,989	19,695	19,385	19,061	18,733
4,00E-02	20,173	19,869	19,558	19,231	18,892
5,00E-02	20,308	19,998	19,685	19,357	19,013
6,00E-02	20,409	20,099	19,781	19,450	19,105
8,00E-02	20,560	20,247	19,924	19,585	19,235
1,00E-01	20,655	20,341	20,019	19,674	19,320
1,50E-01	20,802	20,480	20,155	19,809	19,444
2,00E-01	20,889	20,562	20,233	19,890	19,518
3,00E-01	20,990	20,656	20,321	19,983	19,602
4,00E-01	21,043	20,710	20,370	20,030	19,647
5,00E-01	21,070	20,739	20,398	20,056	19,674
6,00E-01	21,090	20,760	20,418	20,075	19,694
8,00E-01	21,105	20,776	20,432	20,087	19,706
1,00E+00	21,105	20,776	20,433	20,089	19,708
1,50E+00	18,929	18,590	18,250	17,903	17,539
2,00E+00	17,392	17,116	16,837	16,557	16,276
3,00E+00	16,869	16,613	16,356	16,098	15,841
4,00E+00	16,735	16,486	16,236	15,985	15,735
5,00E+00	16,670	16,425	16,179	15,933	15,686
6,00E+00	16,631	16,389	16,146	15,902	15,656
8,00E+00	16,589	16,348	16,105	15,864	15,623
1,00E+01	16,566	16,325	16,082	15,842	15,601
1,50E+01	16,544	16,303	16,060	15,821	15,582



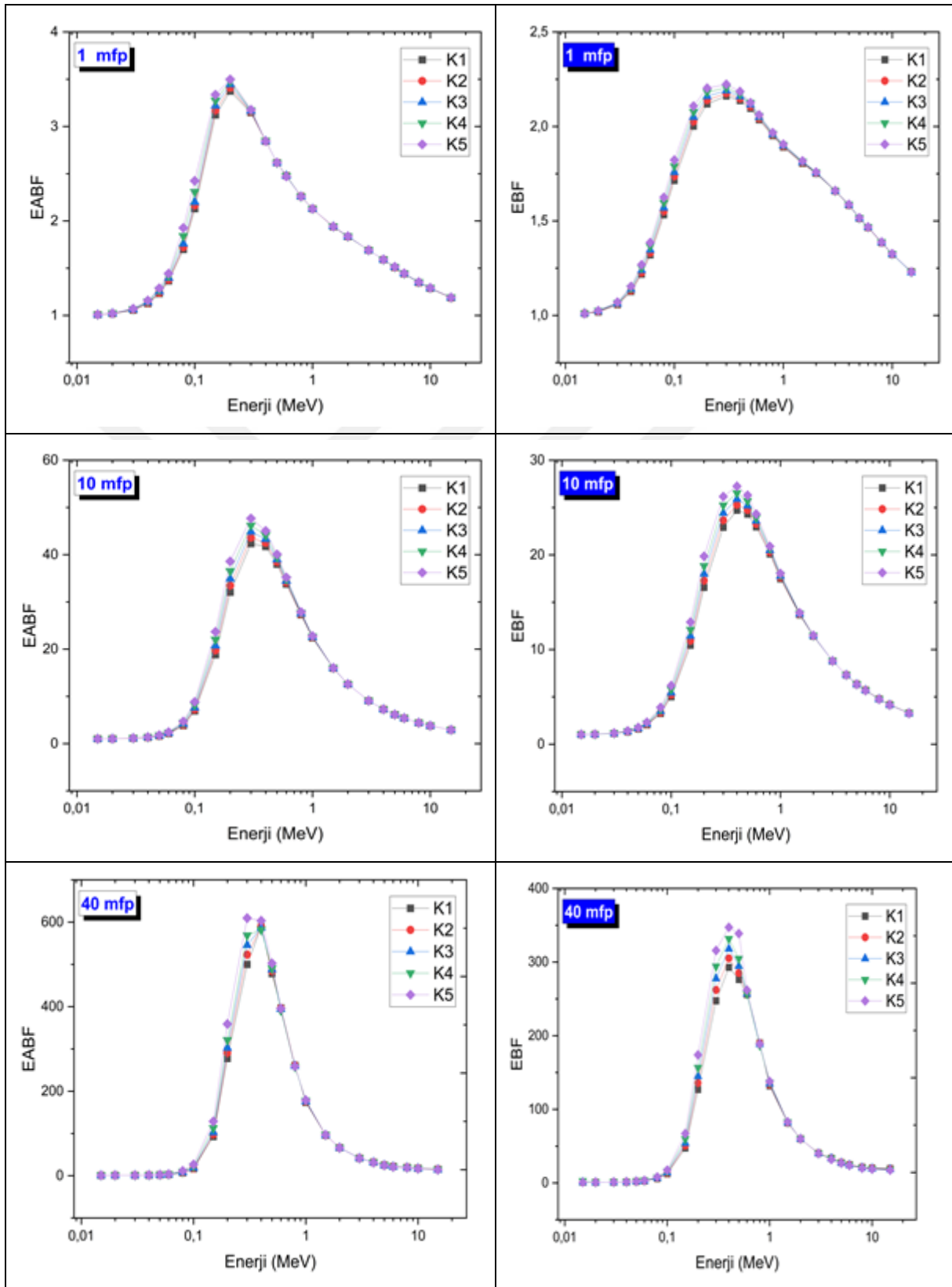
Şekil 37. Numunelerin enerjiye bağlı eşdeğer atom numarası değerlerinin değişimi

Tablo 11 ve Şekil 37'deki verilere göre eşdeğer atom numarası (Z_{eq}), düşük foton enerjilerinde (özellikle 0,015–0,1 MeV aralığında) yüksek değerler göstermektedir. Örneğin, 0,015 MeV'de K1 numunesi için $Z_{eq} = 19,402$, K5 için $Z_{eq} = 18,185$ değerindedir. Ancak enerji 1 MeV üzerine çıktığında Z_{eq} değerlerinde belirgin bir düşüş görülmektedir. 1,5 MeV'de K1 numunesi için $Z_{eq} = 18,929$, K5 için $Z_{eq} = 17,539$ 'a kadar gerilemektedir. Enerji arttıkça Z_{eq} 'nin kademeli bir şekilde azaldığı ve 15 MeV civarında minimum değerlerine ulaştığı görülmektedir ($K1 = 16,544$, $K5 = 15,582$).

Bu durum, radyasyonun maddeyle etkileşim mekanizmalarının enerjiye bağlı olarak değişmesi ile açıklanabilir.

- Düşük enerjilerde (0,015–0,1 MeV) fotoelektrik olay baskın olup, bu süreç atom numarasının yüksekliğine güçlü bir bağımlılık gösterir. Bu nedenle Z_{eq} değerleri yüksektir.
- Orta enerji aralığında (0,1–1 MeV) Compton saçılması baskın hale gelir. Compton saçılması atom numarasına daha az bağımlı olduğundan Z_{eq} değerleri yavaşça azalmaktadır.
- Yüksek enerji aralığında (1–15 MeV) ise çift oluşum ve Compton etkisi baskındır; bu süreçlerin atom numarasına bağımlılığı daha zayıf olduğundan Z_{eq} değerleri düşük ve sabite yakın kalmaktadır.

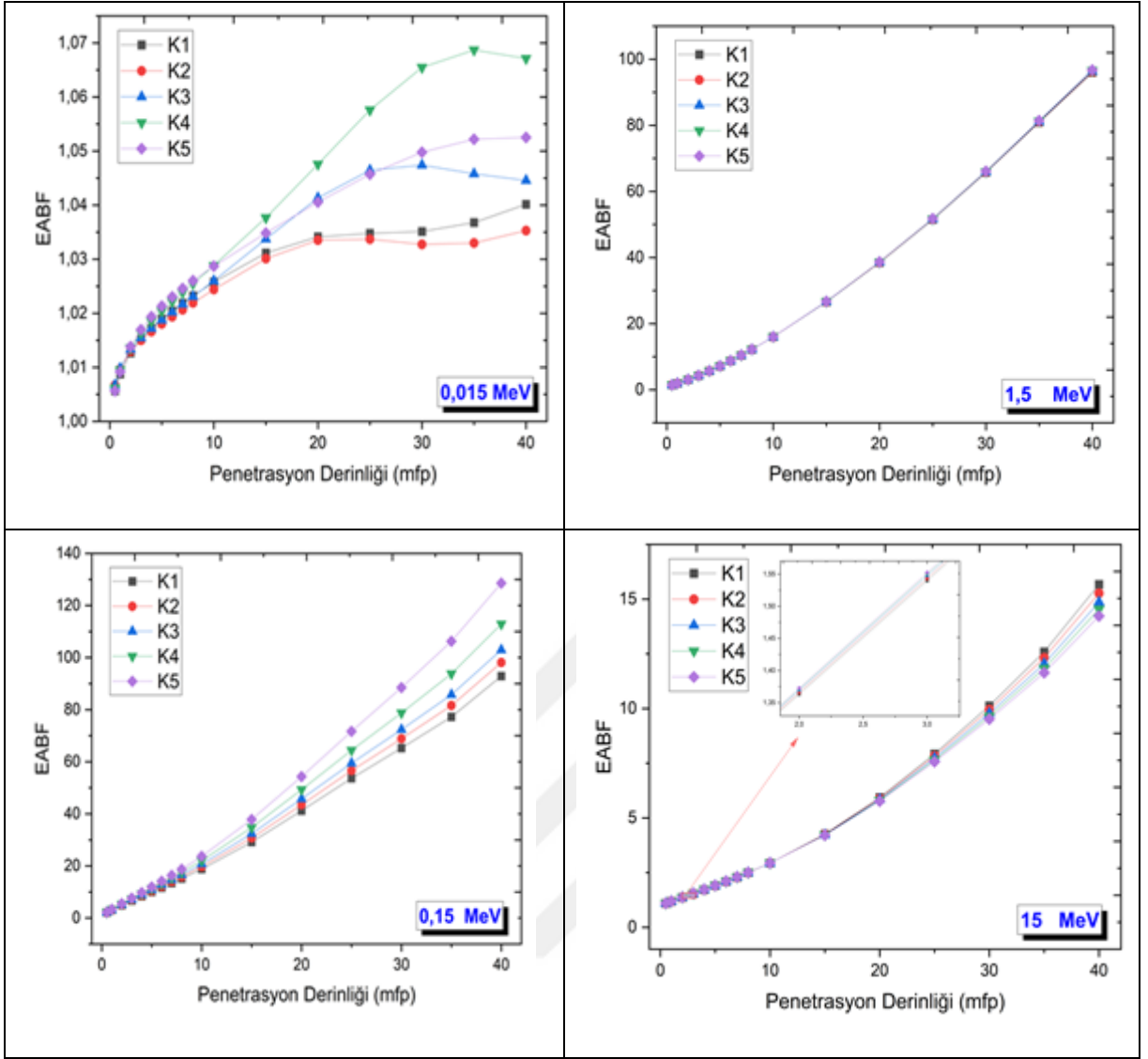
- $K1 > K2 > K3 > K4 > K5$ sıralaması, tüm enerji aralıklarında korunmaktadır. Bu, numunelerin bileşimsel olarak düzenli bir değişim gösterdiğini ve Z_{eq} 'nin bileşim ile doğru orantılı olduğunu kanıtlar niteliktedir.



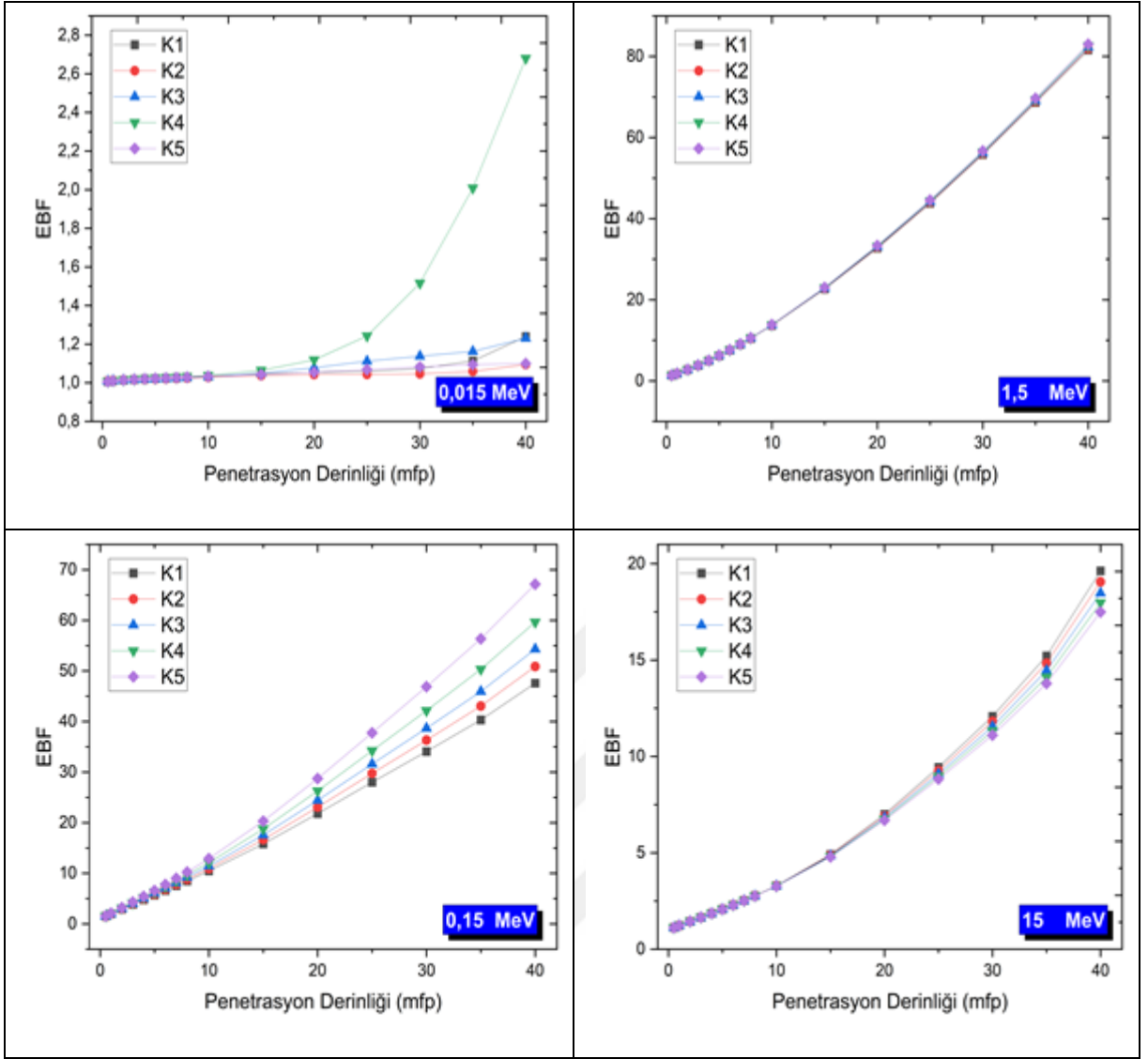
Şekil 38. 1, 10, 40 mfp derinliklerinde enerjilere bağlı EABF ve EBF değişimi

Şekil 38’de farklı mfp (ortalama serbest yol) değerleri için 0,01–15MeV enerji aralığında maruz kalma buildup faktörü (EBF) ve soğurma buildup faktörü (EABF) değerlerinin değişimini göstermektedir. Çoğalma faktörleri (Buildup Factor), üç temel mekanizma nedeniyle farklı enerji bölgelerinde değişiklik gösterir. Bu mekanizmalar fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşum olaylarıdır. Düşük enerjili bölgelerde, fotoelektrik etki baskındır ve fotonlar enerjilerinin önemli bir kısmını kaybettikçe minimum biriktirme faktörlerine yol açar. Enerji değeri arttıkça fotoelektrik olayının gerçekleşme ihtimali azalarak Compton saçılması olayı daha baskın hale gelmektedir. Bu durumda EABF ve EBF değerlerinin 0,06-0,6 MeV enerji aralığında giderek arttığı görülmektedir. Şekiller, çoğalma faktörlerinin yaklaşık 0,6 MeV enerjide tepe değerlerine ulaştığını göstermektedir. Bu aralıkta Compton saçılması baskın etkileşimdir. Compton saçılması sırasında, fotonların malzeme içerisinde sürekli sapması çok sayıda ikincil foton oluşturur. Bu durumda hem EBF hem de EABF değerlerinin hızla yükselmesine neden olur. 0,6 MeV’nin ötesinde, çoğalma faktörleri kademeli olarak azalır. Bu azalma, Compton saçılmasının göreceli öneminin azalmasından ve 1,02 MeV’nin üzerindeki enerjilere sahip fotonlar için çift oluşum olasılığının artmasından kaynaklanmaktadır. Böylece 10 MeV enerjinin üzerindeki değerler için EABF ve EBF değerleri neredeyse sabit olduğu görülmektedir.

Hazırladığımız kompozit malzemelerin EABF ve EBF değerleri genellikle birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Çok küçük farklar olsa da K5 numunesi en yüksek değerleri alırken K1 numunesinin en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 39. 0.015, 0.15, 1.5, 15 MeV enerjilerinde penetrasyon derinliğe bağlı EABF değişimi



Şekil 40. 0.015, 0.15, 1.5, 15 MeV enerjilerinde penetrasyon derinliğe bağlı EBF değişimi

Şekil 39 ve 40'da EABF ve EBF değerlerinin nüfuz etme (penetrasyon) derinliğine bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere nüfuz etme derinliği arttıkça çoğalma faktörlerinin arttığı görülmektedir. Bir malzeme içerisinde radyasyonun ortalama serbest yolu arttıkça, yani radyasyon daha fazla kalınlık kat ederek ilerledikçe, çoğalma faktörü (buildup factor) de genellikle artış gösterir. Bunun temel nedeni, fotonların malzeme içinde yol alırken yalnızca soğurulmakla kalmayıp, aynı zamanda çok sayıda saçılma etkileşimine maruz kalarak ikincil fotonlar üretmesidir. Bu saçılan ikincil fotonlar, hem ortamda dolaylı yollarla enerji taşır hem de dedektör ya da hedefe ulaşarak toplam radyasyon dozunu artırır. Malzeme kalınlığı arttıkça, bir fotonun saçılma, yön değiştirme ve ikinci kez etkileşme şansı da artar; dolayısıyla birim alana düşen toplam foton katkısı yalnızca doğrudan geçen fotonlardan değil, çok sayıda saçılmış ve etkileşmiş fotonlardan da oluşur. Bu etki, özellikle Compton saçılmasının baskın olduğu orta enerji aralıklarında daha belirgindir. Neticede, mfp cinsinden kalınlık arttıkça sistemde oluşan ikincil foton katkısı da birikerek artar

ve bu durum çoğalma faktörünün yükselmesine neden olur. Ancak çok yüksek mfp değerlerinde bu artış doygunluğa ulaşır ve eğri asimptotik hale gelir.

Genel olarak, EBF değerleri EABF'ye göre biraz daha yüksek olabilir; çünkü maruz kalma, yalnızca soğurma değil, aynı zamanda geçiş yapan ve saçılan fotonların da oluşturduğu iyonlaşma etkisini kapsar. Buna karşın EABF, sadece enerji emilimini değerlendirdiği için, özellikle yoğun ortamlarda daha az artış gösterebilir. EBF, enerjiye karşı daha duyarlıdır çünkü dış ortamda iyonlaşma oluşturma etkisine dayalıdır. EABF, ortamın yapısına ve fotonun enerjisini bırakma davranışına daha fazla bağlıdır. Özellikle biyolojik hedeflerde önemlidir. Bu farklar, özellikle medikal fizik uygulamalarında, radyoterapi doz hesaplamalarında, kurşun eşdeğeri hesaplamalarında ve nükleer güvenlik senaryolarında dikkatle değerlendirilmelidir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma sonucunda, kompozit malzemelerin nükleer uygulamalardaki potansiyelini artırmak ve radyasyon sızıntılarını engellemek amacıyla, farklı mastik matrisli yapılarla güçlendirilerek mineral ve sodyum silikat esaslı 5 farklı numune üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen mastik matrisli kompozitler, nükleer uygulamalarda gama radyasyonu sızıntılarını önlemek amacıyla tasarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan numunelerin kütle soğurma katsayısı (MAC), lineer azaltma katsayısı (LAC), ortalama serbest yol (MFP), yarı kalınlık değeri (HVL), onda bir kalınlık değeri (TVL), etkin atom numarası (Zeff) ve etkin elektron yoğunluğu (Neff) gibi zırhlama parametreleri 0,0309 MeV ile 0,3840 MeV enerji aralığında WinXCom yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca foton çoğalma faktörleri (EBF/EABF) 0,1–15 MeV enerji aralığında sadece teorik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, malzeme bileşimindeki nikel oksit oranının artmasının radyasyon zayıflatma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Deneysel kısımda, üretilen kompozit numuneler HPGe dedektörlü gama spektroskopisi kullanılarak test edilmiş, elde edilen soğurma verileri teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında küçük farklılıklar gözlemlenmektedir. Ancak genel olarak her iki veri seti de birbiriyle uyum içindedir. Bu da modellemelerin doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamıştır. Ortaya çıkan bu farklılıkların, deneysel ölçümler sırasında oluşabilecek belirsizliklerden ve pik alanlarının analizinde kullanılan yöntemlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. K1 numunesi, tüm enerji seviyelerinde en yüksek radyasyon soğurma performansını göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, üretilen kompozit numunelerin düşük enerjili radyasyona karşı sağladığı belirgin koruma avantajlarını ortaya koyarken, gama radyasyonuna karşı sınırlı etkinliklerinin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle düşük enerji aralığında (keV mertebesi) fotoelektrik etkinin baskın olması, ağır element katkılı kompozitlerin zırhlama performansını artırmıştır. Buna karşılık, orta ve yüksek enerji aralıklarında Compton saçılması ve çift oluşum süreçlerinin baskın hale gelmesi, gama soğurma etkinliğinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum, foton etkileşim parametreleri için sunulan tablo ve şekillerde elde edilen değerlerinin enerjiye bağlı olarak düşmesi ile de uyumludur.

Literatürde, farklı kompozit tasarımları kullanılarak gama soğurma kapasitesinin artırılacağı geniş ölçüde rapor edilmiştir. Örneğin; nikel, krom ve demir oksit gibi ağır metal

oksit katkılarının polimer matrislere ilavesi, malzemenin etkin atom numarasını (Z_{eff}) yükselterek gama ışınlarının geçişini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bizim çalışmamızda da benzer şekilde, metal oksit katkılarının fotoelektrik soğurma ve toplam zayıflatma katsayılarını (μ/ρ) artırarak (dolayısıyla Z_{eff} değerlerini artırarak) kompozitlerin koruyucu özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

WinXCom yazılımından elde edilen foton etkileşim parametreleri, deneysel bulgularla yüksek oranda tutarlılık göstermiştir. Bu sonuç, kullanılan kompozit bileşimlerinin, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında rekabetçi performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle, (Gouda et al. 2024; Ihsani et al. 2024) çalışmalarında belirtilen kurşun katkılı polimer kompozitler ile kıyaslandığında, bizim numunelerimizin düşük enerjili fotonlara karşı soğurma etkinliği benzer, gama enerjilerinde ise hafifçe düşük fakat optimize edilebilir niteliktedir.

Kompozitlerin korozyon direnci, mekanik dayanıklılık ve kimyasal kararlılık gibi çok yönlü özelliklerinin yanı sıra, radyasyon zırhlama performansının artırılabilmesi de bu malzemelerin nükleer mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyelini güçlendirmektedir. Özellikle hafif ve mekanik açıdan dayanıklı polimer matrisli kompozitlerin, geleneksel kurşun bazlı zırhlama malzemelerine alternatif oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca uzun ömür, çevresel etkilere dayanıklılık ve üretim kolaylığı gibi avantajlar da bu kompozitleri cazip hale getirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile üretilen kompozitlerin nükleer yapıların koruma bileşenleri olarak kullanılma potansiyeli ortaya konmuştur. Gelecek çalışmalarda, ağır element katkılarının oranının artırılması, nanopartikül takviyelerinin eklenmesi ve katmanlı kompozit tasarımlarının uygulanması gibi yöntemlerle gama ve nötron soğurma kapasitelerinin daha da artırılabilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Afad., 2021. KBRN Terimler Sözlüğü. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Başkanlığı, 56 p, Ankara.
- Akbulut, H., 2010. Kompozit Malzemeler Dersi Çalışma Konuları ve Çalışma Soruları. Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 63 p, Sakarya.
- Akın, E., 2007. Mermer Tozları ve Uçucu Kül İle Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Al-Buriahi, M. S., Alajerami, Y. S. M., Abouhaswa, A. S., Alalawi, A., Nutaro, T., and Tonguc, B., 2020. Effect Of Chromium Oxide On The Physical, Optical, And Radiation Shielding Properties Of Lead Sodium Borate Glasses. *Journal Of Non-Crystalline Solids*, 544(2020), 120-171. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120171>
- Albarzan, B., Hanfi, M. Y., Almuqrin, A. H., Sayyed, M. I., Alsafi, H. M., and Mahmoud, K. A., 2021. The Influence Of Titanium Dioxide On Silicate-Based Glasses: An Evaluation Of The Mechanical And Radiation Shielding Properties. *Materials*, 14(12), 34-14. <https://doi.org/10.3390/ma14123414>
- Alzahrani, J. S., Alrowaili, Z. A., Alnairi, M. M., Olarinoye, I. O., Alomairy, S., and Al-Buriahi, M. S. (2024). Radiation Shielding and Dosimetry Parameters of Silica–Borate Glasses with Fe₂O₃/Sm₂O₃. *Silicon*, 16(9), 3785–3794. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02962-5>
- ANSI/ANS-6.4.3., 1991. American National Standard For Gamma-Ray Attenuation Coefficients And Buildup Factors For Engineering Materials. 138.
- Aslan, İ., 2017. Pirinç ve Dökme Demir Talaşları İle Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. 11(1), 92–105.
- Aygün, B., 2010. Değişik Yağ Oranlarına Sahip Parafin Waxlarda Hızlı Nötronların Makroskopik Soğrulma Tesir Kesitlerinin Belirlenmesi ve Değişen Yağ Oranının Zırhlama Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aytimur, A., 2024. Termoplastik Kompozit Yapıların Termal Ve Radyasyon Kalkanlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969806X24001117>
- Bakar, K., 2012. Nükleer Tıp Alanında Çalışan Personelin Uygulamalarda Maruz Kaldığı Radyasyonun Biyolojik Dozimetri İle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri, Kütahya.
- Barınmaz, D., 2009. Nükleer Tıp Uygulamalarında Radyasyon Doz Dağılımlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bastuğ, A. E., 2025. Polimer Tabanlı Gama Ve Nötron Radyasyon Zırhlama Malzemelerinin Geliştirilmesi Ve İkincil Radyasyon Hesabı. Yüksek Lisans Tezi, Sinop Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sinop.
- Baykal, B., 2019. Ovulasyon İndüksiyonu Yapılan Sıçanlarda İyonlaştırıcı Radyasyon İle Oluşturulan Uterus Toksisitesinde Quercetin-3-O-Rutinoside'in Koruyucu Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sağlık Bilimleri Üniversitesi Gülhane Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

- Berger, M. J., Hubbell, J. H., Seltzer, S. M., Chang, J., Coursey, J. S., Sukumar, R., and Zucker, D. S., 1998. XCOM: photon cross sections database. NIST Standard Reference Database, 8, 87–3597. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>
- Bilgiç, S., 2020. Farklı Foton Enerjilerinde Bazı Mocu Alaşımlarının Radyasyon Soğurma Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Erzincan.
- Borand, G., 2016. Gıda Ambalajı Olarak Kullanılan Bazı Polimer Malzemelerin X-Işını Floresan Spektroskopisinde Kantitatif Analiz Geliştirilmesine Yönelik Bir Çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Boyacıoğlu, B., 2025. Radyasyon Aydınlanma ve Gölge Olayları. Erişim Tarihi 29 Nisan 2025
- Burak, K. E., 2024. Tungsten Katkılı Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Tasarlanması Üretilmesi, Karakterizasyonu Ve Nükleer Radyasyon Koruyucu Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağrı.
- Büyükyıldız, M., 2017. Farklı Metotlar İle Sürekli Enerji Aralığında Toplam Foton Etkileşimi İçin Farklı Tipteki Malzemelerin Etkin Atom Numarası Ve Elektron Yoğunluklarının Hesaplanması. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(3), 1–1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.283266>
- Çağlar, M., 2021. Tıbbi Radyasyon Zırhlamalarında Kullanılabilecek Çok Fonksiyonlu Mikro/Nano Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Ve Dozimetrik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chatterjee, S., and Vyas, A., 2011. The Energy Dependence of the Photoelectric Attenuation Coefficient of Substances. Journal of Biomedical, 1(1), 1–6. [papers2://publication/uuid/80F25B19-A58D-4CC7-A919-C0DB403E9DAC%5Cnhttp://www.jbpe.org/Journal_OJS/JBPE/index.php/jbpe/article/viewArticle/5](http://www.jbpe.org/Journal_OJS/JBPE/index.php/jbpe/article/viewArticle/5)
- ChemSpider., 2025. Chromium(III) oxide (Cr_2O_3), ChemSpider ID: 451305. Erişim Tarihi: Temmuz 2025. <https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.451305.html>
- Demirdioğlu, B., 2009. Gama Spektrometrisine Giriş. TAEK, 45 p, Ankara.
- Dubbers, D., and Märkisch, B., 2021. Precise measurements of the decay of free neutrons. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 71, 139–163. <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102419-043156>
- Fitzgerald, J., 2014. Gamma Analysis and Calibration software (3.71).
- Gelgün, S., 2010. Kütahya İli Kapalı Mekânları Radon Gazı Konsantrasyonu Ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Kütahya. <http://landing.adobe.com/en/sea/products/acrobat/69210-may-prospects.html?trackingid=KTKAA>
- Göçmen, G., 2016. Bilgisayarlı Tomografi Ünitesinde Pediatrik Görüntülemeye Radyasyon Doz Ölçümleri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Gökharman ve ark., D. F., 2016. Need To Knows About Radiation Safety Vocationally. SdÜ Sağlık Bilimleri Dergisi, 7(2), 35–35.
- Gouda, M. M., Osman, A. F., Awad, R., and Badawi, M. S. (2024). Enhanced radiation shielding efficiency of polystyrene nanocomposites with tailored lead oxide nanoparticles. Scientific Reports, 14(1), 19-970. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69510-4>

- Haciosmanoğlu, T., 2017. Natural and Artificial Radiation Sources and Personal Dose Additives. Nuclear Medicine Seminars, 3(3), 166–171. <https://doi.org/10.4274/nts.2017.017>
- Harima, Y., 1993. An historical review and current status of buildup factor calculations and applications. Radiation Physics and Chemistry, 41(4–5), 631–672. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90317-N](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90317-N)
- Harima, Y., Sakamoto, Y., Tanaka, S., and Kawai, M., 1986. Validity of the Geometric-Progression Formula in Approximating Gamma-Ray Buildup Factors. Nuclear Science and Engineering, 94(1), 24–35. <https://doi.org/10.13182/NSE86-A17113>
- Ihsani, R. N., Gareso, P. L., and Tahir, D., 2024. An overview of gamma radiation shielding: Enhancements through polymer-lead (Pb) composite materials. Radiation Physics and Chemistry, 218(1), 111-619. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111619>
- Jia, C., Wang, Q., Yao, X., and Yang, J., 2021. The Role of DNA Damage Induced by Low/High Dose Ionizing Radiation in Cell Carcinogenesis. Exploratory Research and Hypothesis in Medicine, 6(4), 177–184. <https://doi.org/10.14218/ERHM.2021.00020>
- Kalekim., 2023. 50 yıldır elimizin değdiği her yere izimizi bıraktık.
- Kalkan, E. N., 2025. Epoksi Tabanlı Mikro Ve Nano Boyutlu Gümüş Katkılı Kompozitlerin İyonize Radyasyonu Zırhlama Performanslarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kalyon, M., 2019. Radyasyon İçeren Birimlerin Zirhlamasında Kullanılan Farklı Tipteki Betonların Radyasyon Güvenliği ile İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Raj, S., and Lubloy, E., 2024. Advancements and environmental considerations in portland cement-based radiation shielding concrete: Materials, properties, and applications in nuclear power plants– review. Cleaner Engineering and Technology, 19(2024), 100-733. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100733>
- Karadoğan, Z. I., 2019. Ni, Fe, Co Tabanlı Süper Alaşımların Radyasyon Zırhlama Kabiliyetlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kılıç, Ö., 2010. İstanbul Boğazı ve Haliç Biyota ve Sedimentinde Radyonüklid Analizi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koralay, H., 2023. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon Nedir ? ve Korunma Yöntemleri.VIII. İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Küçük, N., and Gezer, O., 2017. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi Doğal Siyah Obsidyen Cevherleri İçin Yığılma Faktörlerinin Belirlenmesi Determination of Build-up Factors for Natural Black Obsidian Ores. 17, 872–880.
- Kural, A. T., 2019. B4c Takviyeli Titanyum Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Levet, A., 2024. Investigation Of Radiation Shielding Parameters Of Boron Compounds. Radiation Effects And Defects In Solids, 179(3–4), 458–473. <https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2294029>
- Munyao, L. N., Ketui, D. K., Otieno, C., and Chege, M. W., 2020. Assessment of Levels of Natural Radioactivity in Sand Samples Collected from Ekalakala in Machakos County, Kenya. Scientific World Journal, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/7269840>

- NIST., 2025. Chromium(III) oxide (Cr_2O_3). NIST Chemistry WebBook. Erişim Tarihi: Temmuz 2025. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1309371>
- Omer, H., 2021. Radiobiological effects and medical applications of non-ionizing radiation. Saudi Journal of Biological Sciences, 28(10), 5585–5592. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.071>
- Önder, P., 2013. Dış Manyetik Alanın p- Tipi Ve n - Tipi Silisyum Numunelerin Radyasyon Geçirgenliklerine Etkisi Ve Dış Elektrik Alanın Atom Numarası $21 \leq Z \leq 71$ Olan Bileşiklerinin Compton Ve Koherent Saçılmasına Radyasyon Geçirgenliğine, Elektron Yoğunluğuna Ve Kütle Soğurma Katsayısına Etkisinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- OriginPro., 2025. OriginPro (2025). OriginLab Corporation.
- Özgen, M., 2016. Medikal Linaklarda Kullanılan YüksekEnerjili Foton Işınlari ile Farkli Ahşap Malzeme Hedeflerinin Doz Kalınlık İlişkisi Formülleri Kullanılarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüleri Ortak Yüksek Lisans Programı, Osmaniye.
- Peker, Y. M., 2024. Uzay Uygulamaları İçin Karbon Nanotüp Ve BOR Nitrür Takviyeli Karbon/Epoksi Nanokompozitler İle Nötron Ve Gama Radyasyonu Zırhlaması. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Perişanoğlu, U., 2018. Geçiş Metalli Nano Ferrit Alaşımlar İçin K X - Işını Şiddet Oranı Üzerine Kimyasal Etkilerin İncelenmesi Ve Bu Alaşımların Radyasyon Soğurma Kabiliyetlerinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Poyarkov, V., 2018. NükleerTehlikeler Hakkında TemeBilgiler. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, 50 p, Ankara.
- PubChem., 2025. Chromium(III) oxide (Cr_2O_3), CID=517277. Erişim Tarihi: Temmuz 2025. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/517277>
- Ridha, A. A., 2016. Chapter Four (Interaction of Radiation with Matter). Nuclear Physics, January.
- Röntgen, W. C. (1949). Über Eine Neue Art von Strahlen. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-13247-0>
- Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., and Kurudirek, M., (2020). Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. Radiation Physics and Chemistry, 166(2020), 108-496. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
- Şenlik, Z. B., 2010. Ankara’da Bir Üniversite Hastanesinde İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları İle Çalışan Sağlık Çalışanlarında İyonlaştırıcı Radyasyonun Olası Sağlık Etkilerinin Belirlenmesi. Uzmanlık Tezi, Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Anabilim Dalı, Ankara.
- Sola, V., 2015. Atom Numarası $30 \leq Z \leq 100$ Olan Elementler İçin N Tabakasına Ait Flöresans Verimlerin Teorik Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Soylu, H. M., 2014. Radyasyon Zırhlamasında Polimer - Tungsten Bileşik Kompozitlerin Etkinliğinin Test Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- SUR, G., 2008. Karma Takviyeli Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi. *Revista de Trabajo Social*, 11(75), 23–26.
http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2020.pdf%0Ahttp://revistas.ucm.es/index.php/CUTS/article/view/44540/44554
- Süral, M., (2025). Kompozit Malzeme İçin Uygun Üretim Yönteminin Seçilmesi Ve Farklı Fiber Oryantasyonlarının Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2025, Ankara.
- Sürücü, A. M., and Subaşı, S., 2021. Nanomateryallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. 8(1), 182-194. <https://doi.org/10.31202/ecjse.812372>
- Tan, J., Huang, R., Dai, Y., Liang, Z., Feng, J., and Lin, H.-T., 2023. Improvement of electrostrain properties of BNT-based piezoelectric ceramics by co-doping of Sr²⁺ and Ta⁵⁺ in A and B sites. *Ceramics International*, 49(22), 35399–35405. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.215>
- Turşucular, E. D., and Varol, R., 2023. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş 6061 Al Matrisli B4C Takviyeli Kompozit Malzemelerin Radyasyon Absorbsiyon Özelliklerinin İncelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13(2), 57–64. <https://doi.org/10.35354/tbed.1260061>
- Uzun., 2016. Günlük Hayatta Maruz Kalınan Doğal Ve Yapay Radyasyon Kaynak- Larının Öğrencilerin Yaşam Kalitesi Üzerindeki Olumsuz Etkileri Ve Korunma Önerileri. Yüksek Lisans, Kırklareli Üniversitesi, Haziran, 2016, Kırklareli.
- Wang, W., Yu, Z., and Su, W. (2008). Ion irradiation induced direct damage to DNA. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.12.069>
- WHO., 2023. 「SDGs (Sustainable Development Goals). In *Japanese Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* , 69(9), 69-409. <https://doi.org/10.5794/jjoms.69.409>
- Yeyin, N., 2015. Biological Effects of Radiation. *Nuclear Medicine Seminars*, 1(3), 139–143. <https://doi.org/10.4274/nts.0022>
- Yüksel, S. (2024). Radyasyon Çalışanlarında Radyasyondan Korunma Farkındalığı Yüksek (Vol. 15, Issue 1).
- B.A. Alabandan, C. F. Njoku and M. O. Yusuf. “The Potentials of Groundnut Shell Ash as Concrete Admixture”. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript BC 05 012, Vol. VIII. February, 2006
- K.K. Chawla Glass Fibers Editor(s): K.H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernhard Ilschner, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, Patrick Veyssi re, Encyclopedia of Materials: Science and Technology Elsevier 2001 Pages 3541-3545, <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00630-6>. K.K. Chawla
- FitzPeaks: FitzPeaks32 Version 3.40, Gamma Analysis and Calibration software, Jim Fitzgerald.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammed ÇİMEN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	