



**TÜKETİLMİŞ URANYUM VE RADYASYON ZIRHLAMASINDA
KULLANILAN MALZEMELERİN ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE ALTERNATİF ZIRH MALZEMELERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Cevher YÜCEER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
NÜKLEER BİLİMLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Cevher YÜCEER

17/06/2025

TÜKETİLMİŞ URANYUM VE RADYASYON ZIRHLAMASINDA KULLANILAN
MALZEMELERİN ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
ALTERNATİF ZIRH MALZEMELERİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Cevher YÜCEER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Tüketilmiş Uranyum (DU), zenginleştirilmiş uranyum üretiminin bir yan ürünü olup tıbbi, askeri ve sivil birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle tıbbi amaçlı olarak nükleer tıp alanında hastalıkların teşhisinde kullanılan, yapısında radyonüklitler bulunan radyofarmasötiklerin taşınması için üretilen taşıma konteynerlerinde zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tüketilmiş uranyum, özellikle yüksek yoğunluğundan dolayı ağır olması ve uluslararası alanda nükleer güvence konusunda Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın (IAEA) denetimine tabi olmasından dolayı tüketilmiş uranyumun yerine geçebilecek malzeme arayışı bu tezin araştırma konusudur. Özellikle denetime tabi tutulması sahiplerine tüketilmiş uranyumun kullanımı sırasında belirli sorumluluklar ve yükümlülükler yüklemektedir. Bu nedenle alternatif bir zırhlama malzemesinin kullanılması bu alandaki yükümlülükleri de ortadan kaldıracaktır. Bu bağlamda, bu tezde farklı oranda polietilen (C₂H₄) ve tungsten (W) katkılandırılarak oluşturulan (%75 W-%25 C₂H₄, %80 W-%20 C₂H₄, %85 W-%15 C₂H₄, %90 W-%10 C₂H₄) 4 farklı polimer kompozit malzemenin lineer azalım katsayısı (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL) ve ağırlık yüzdesi XCOM veritabanı ve Phy-X bilgisayar programı kullanılarak ¹³¹I ve ¹³⁷Cs radyonüklitlerinin gama enerjileri için belirlenmiştir. Elde edilen verilerin validasyonunda EpiXS bilgisayar programı kullanılmıştır. %90 W ve %10 C₂H₄ içeren SAMP4 kodlu polimer kompozit için, sırasıyla 284,3 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV'de tüketilmiş uranyumdan %78,9, %77,9, %74,3 ve %74 daha düşük bir LAC değeri elde edilmiştir. SAMP4 numunesinin HVL'si 284,3 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV'de tüketilmiş uranyumdan 0,231, 0,367, 0,768 ve 0,798 cm daha fazladır. Araştırılan tüm polimer kompozitler tüketilmiş uranyumdan %65'ten fazla daha hafiftir. Sonuç olarak, SAMP4 kompozitinin elde edilen zırhlama parametrelerindeki özellikleri nedeniyle taşıma paketleri için zırhlama malzemesi üretiminde tüketilmiş uranyumun yerine kullanılabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91704

Anahtar Kelimeler : Gama radyasyonu, polimer kompozitler, geri dönüştürülebilir polimer ile radyasyon zırhlaması

Sayfa Adedi : 45

Danışman : Prof. Dr. Sema Bilge OCAK

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Esra UYAR

INVESTIGATION OF SHIELDING PROPERTIES OF MATERIALS USED IN
DEPLETED URANIUM AND RADIATION SHIELDING AND RESEARCH OF
ALTERNATIVE SHIELDING MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Cevher YÜCEER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

Depleted Uranium (DU) is a by-product of enriched uranium production and is used in many medical, military and civilian fields. In particular, it is used as an shielding material in transport containers produced for the transportation of radiopharmaceuticals containing radionuclides, which are used in the diagnosis of diseases in the field of nuclear medicine for medical purposes. Since depleted uranium is heavy, especially due to its high density, and is subject to the International Atomic Energy Agency (IAEA) inspection for nuclear safeguards in the international arena, the search for a substitute material for depleted uranium is the subject of research in this thesis. In particular, being subject to inspection imposes certain responsibilities and obligations on the owners during the use of depleted uranium. Therefore, the use of an alternative shielding material will also eliminate the liabilities in this area. In this context, in this thesis, the linear attenuation coefficient (LAC) of 4 different polymer composite materials (75% W-25% C₂H₄, 80% W-20% C₂H₄, 85% W-15% C₂H₄, 90% W-10% C₂H₄) doped with different proportions of polyethylene (C₂H₄) and tungsten (W), The half value thickness (HVL) and weight percentage were determined for the gamma energies of ¹³¹I and ¹³⁷Cs radionuclides using the XCOM database and the Phy-X computer program. For the polymer composite coded SAMP4 containing 90% W and 10% C₂H₄, a LAC value of 78.9%, 77.9%, 74.3% and 74% lower than that of depleted uranium at 284.3 keV, 364.5 keV, 637 keV and 661.7 keV, respectively. The HVL of the SAMP4 sample is 0.231, 0.367, 0.768 and 0.798 cm higher than the depleted uranium at 284.3 keV, 364.5 keV, 637 keV and 661.7 keV. All investigated polymer composites are more than 65% lighter than depleted uranium. In conclusion, SAMP4 composite can be used as a substitute for depleted uranium in the production of shielding material for transport packages due to its properties in the obtained shielding parameters.

Science Code : 91704

Key Words : Gamma radiation, polymer composites, radiation shielding with recyclable polymers

Page Number : 45

Supervisor : Prof. Dr. Sema Bilge OCAK

Co-Supervisor : Dr. Lect. Esra UYAR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana yol gösteren, desteklerini esirgemeyen ve öğrencisi olmaktan büyük mutluluk duyduğum değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sema Bilge OCAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, araştırmam boyunca dikkat etmem gereken noktalar konusunda değerli bilgileriyle katkıda bulunan tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Esra UYAR'a şükranlarımı sunarım. Tez savunmamda yer alarak önemli noktalarda yapıcı eleştirileriyle çalışmamın son halini almasına katkı sağlayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Adem ACIR, Doç. Dr. Defne AKAY ve Doç. Dr. Canan AYDAŞ'a da teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olan, manevi desteğiyle bana güç veren ve her zaman yanımda olacağını bildiğim sevgili eşim İrem Begüm YÜCEER'e gönülden teşekkür ederim. Hayatım boyunca beni destekleyen, üzerimde emekleri asla ödenemeyecek kıymetli annem ve babama da sonsuz şükranlarımı sunarım. Yüksek lisans tezi hazırlama sürecinde bana yol gösteren, görüşlerini benden esirgemeyen ve beni destekleyen kıymetli Grup Başkanım Taha Hüseyin MERMER'e ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon	5
2.2. Radyasyon Uygulamaları	5
2.3. Radyasyon Uygulamalarında Kullanılan Radyonüklitler	7
2.4. Radyasyon Zırhlaması	11
2.5. Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Malzemeler	11
2.6. Tüketilmiş Uranyumun Özellikleri	13
2.6.1. Genel özellikler	13
2.6.2. Radyolojik özellikler	13
2.6.3. Kimyasal özellikler ve toksisite	14
2.6.4. Kullanım alanları	14
2.6.5. Radyasyon güvenliği ve atık yönetimi	15
2.7. Tungsten Polimerler	16
2.7.1. Genel özellikler	16

Sayfa

2.7.2. Radyolojik özellikler	16
2.7.3. Kimyasal özellikler ve toksisite	17
2.7.4. Kullanım alanları	17
2.8. Zırhlama Malzemelerinin Maliyetleri	18
2.8.1. Ham madde maliyeti	18
2.8.2. İşleme ve üretim maliyetleri	19
2.8.3. Düzenleme ve güvenlik uyumluluğu	19
2.8.4. Bertaraf ve uzun vadeli depolama	20
2.8.5. İşlenmiş malzeme maliyetleri	20
2.9. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı Nükleer Güvence Denetimleri	20
2.10. Radyasyon Zırhlaması için İncelenen Parametreler	21
2.10.1. Toplam kütle azalım katsayısı (MAC)	21
2.10.2. Lineer azalım katsayısı (LAC)	22
2.10.3. Yarı değer kalınlığı (HVL)	22
2.10.4. Ağırlık oranı	23
3. MATERYAL – YÖNTEM	25
3.1. Kullanılan Yazılımlar	25
3.1.1. Phy-X Photon Shielding and Dosimetry (Phy-X/PSD)	26
3.1.2. NIST XCOM: Photon Cross Section Data	27
3.1.3. EpiXS: Windows application for photon attenuation quantity generation using EPICS2017 (ENDF/B-VIII) or the EPDL97 (ENDF/B-VI.8) photoatomic libraries	28
3.2. Yoğunluk	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. Toplam Kütle Azalım Katsayısı (MAC)	31

Sayfa

4.2. Lineer Azalım Katsayısı (LAC)	32
4.3. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)	33
4.4. Doğrulama	34
4.5. Ağırlık Oranı	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	45



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Medikal ve endüstriyel alanda kullanılan radyonüklitler	2
Çizelge 3.1. C ₂ H ₄ - W polimer kompozitlerinin yüzde fraksiyonlarını ve kısaltmalarını gösteren tablo	25
Çizelge 3.2. Farmasötiklerde yaygın olarak kullanılan radyoizotopların ortalama enerjilerini gösteren tablo	25
Çizelge 3.3. Zırhlama malzemelerinin yoğunlukları	30
Çizelge 4.1. Phy-X ve EpiXS kütle azalım katsayılarını gösteren çizelge	35
Çizelge 4.2. C ₂ H ₄ -W polimer kompozitlerinin yüzde ağırlık oranları gösteren çizelge..	36
Çizelge 5.1. Zırhlama malzemelerinin karşılaştırması	38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. C ₂ H ₄ -W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı toplam kütle azalım katsayılarını gösteren grafik	31
Şekil 4.2. C ₂ H ₄ -W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı lineer azalım katsayılarını gösteren grafik	32
Şekil 4.3. C ₂ H ₄ -W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı yarı değer kalınlığı değerlerini gösteren grafik	33
Şekil 4.4. SAMP4 polimer kompozit için Phy-X ve EpiXS sonuçlarının enerjiye karşı karşılaştırmasını gösteren grafik	34

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. UJP PRAHA üretimi KM 47 model B(U) tipi taşıma konteynırı	15
Resim 2.2. UAEA denetimi esnasında etiket üzerindeki bilgiler mevcut veya görünür olmadığında DU zırhın gama spektrometresi ile tanımlanmasına örnek	21



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Am	Amerisyum
Ba	Baryum
Bq	Becquerel
C	Karbon
C₂H₄	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
C_{eff}	Etkin İletkenlik
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cs	Sezyum
Cu	Bakır
g	Gram
GeV	Giga Elektron Volt
I	İyot
keV	Kilo Elektron Volt
kg	Kilogram
Mo	Molibden
N_{eff}	Elektron Yoğunluğu
P	Fosfat
Rb	Rubidyum
Sr	Stronsiyum
Tb	Terbiyum
Tc	Teknesyum
U	Uranyum
W²	Tungsten
Z_{eff}	Etkin Atom Numarası
°C	Santigrat
μ	Lineer Azalım Katsayısı
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CT	Bilgisayarlı Tomografi (<i>Computational Tomography</i>)
CSV	Virgülle Ayrılmış Değerler (<i>Comma-Separated Values</i>)
DNA	Deoksirübo Nükleik Asit
DU	Tüketilmiş Uranyum (<i>Depleted Uranium</i>)
EABF	Enerji Emilimi Faktörü
EBF	Maruziyet Birikim Faktörü
EMI	Elektromanyetik Girişim
HLW	Yüksek Seviyeli Atık (<i>High Level Waste</i>)
HVL	Yarı Değer Kalınlığı (<i>Half Value Layer</i>)
LAC	Lineer Azalım Katsayısı (<i>Linear Attenuation Coefficient</i>)
MAC	Kütle Azalım Katsayısı (<i>Mass Attenuation Coefficient</i>)
MFP	Ortalama Serbest Yol (<i>Mean Free Path</i>)
NPT	Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması (<i>Non-Proliferation Treaty</i>)
Phy-X/PSD	Foton Zırhlama ve Dozimetri (<i>Photon Shielding and Dosimetry</i>)
PNRI	Filipin Nükleer Araştırma Enstitüsü (<i>Philippine Nuclear Research Institute</i>)
RFI	Radyo Frekans Girişimi
RoHS	Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama (<i>Restriction of Hazardous Substances Directive</i>)
RTG	Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörü (<i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i>)
SPECT	Tek Foton Emisyonlu Bilgisayarlı Tomografi
SRS	Mühürlenmiş Radyoaktif Kaynaklar (<i>Sealed Radioactive Sources</i>)
TVL	Onda Bir Değer Kalınlığı (<i>Tenth Value Layer</i>)
UAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

1. GİRİŞ

Tüketilmiş uranyum (*Depleted Uranium – DU*), zenginleştirilmiş uranyum üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. U-235 izotopunun doğal uranyuma göre daha düşük oranda bulunduğu uranyum türü olarak tanımlanır. DU'nun radyasyon ve radyoaktif cihazlarda zırhlama malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılması, radyoaktif atık yönetimi açısından önemli bir konudur. Çünkü birçok durumda, mühürlenmiş radyoaktif kaynakların (*Sealed Radioactive Sources – SRS*) zırhlamasında kullanılan DU'nun radyoaktif atık olarak sınıflandırılması gerekebilir. DU zırhlama, genellikle aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır [1]:

- Teleterapi cihazları, ticari ışınlayıcılar ve endüstriyel radyografi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yüksek aktiviteli gama kaynakları;
- Doğrusal hızlandırıcılar;
- Yüksek seviyeli atıkların (*High Level Waste- HLW*) veya kullanılmış nükleer yakıtın depolanması, taşınması ve bertarafı için tasarlanmış konteynerler ve paketler.

DU, 19,1 g/cm³'lük yüksek yoğunluğuyla bilinen en ağır metaller arasında yer almaktadır. Parlak, gümüş-altın tonlarında metalik bir görünüme sahip olan DU, özellikle talaş veya toz formuna getirildiğinde piroforik özellik sergiler; bu da havayla temas ettiğinde kendiliğinden tutuşma eğilimi gösterdiği anlamına gelir. Atmosferik oksijenle kolayca reaksiyona girerek yüzeyinde sarı-yeşil veya siyah renkte uranyum oksit bileşikleri oluşturur. DU'nun yoğunluğu, kurşunun yaklaşık 1,67 katıdır; bu özelliği onu yüksek enerjili iyonlaştırıcı radyasyonlara karşı etkili bir zırhlama materyali haline getirir. Bu nedenle, nükleer enerji santrallerinde, radyasyon koruyucu ekipmanlarda ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Biyolojik açıdan değerlendirildiğinde, DU'nun başlıca sağlık riski, düşük seviyeli radyoaktivitesinden ziyade kimyasal toksisitesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle mikron boyutundaki DU parçacıkları solunduğunda veya sindirim yoluyla alındığında böbrek fonksiyonları üzerinde toksik etki yaratabilir. Ayrıca, DU çevresel koşullarda ince toz formuna dönüşmüşse ya da korozyona uğramışsa hem ekosistem hem de insan sağlığı açısından kontaminasyon riski taşır.

Radyolojik açıdan, DU öncelikli olarak alfa parçacıkları yayar. Bu parçacıklar düşük penetrasyon kapasitesine sahip olduğundan, bütün bir cilt yüzeyine temas ettiğinde ciddi bir dış radyasyon riski oluşturmaz. Ancak DU, vücut içine alındığında (inhalasyon, ingestiyon veya yaralanma yoluyla), alfa yayımı nedeniyle hücre düzeyinde DNA hasarına yol açabilecek içsel radyolojik tehlike haline gelir.

Aşağıdaki tabloda, DU'nun bazı teknolojik ve endüstriyel cihazlardaki işlevsel kullanımları ile bu uygulamalarda rol oynayan radyonüklitler yer almaktadır [1]:

Çizelge 1.1. Medikal ve endüstriyel alanda kullanılan radyonüklitler

Cihazlar/faaliyetler	Radyonüklitler
Medikal/Kanser tedavisi	Co-60, Cs-137, I-131
Gamma Knife tedavisi	Co-60
Brakiterapi cihazları	Co-60, Cs-137, Ir-192
Teleterapi cihazları	Co-60, Cs-137
Endüstriyel radyografi cihazları	Co-60, Se-75, Cs-137, Yb-169, Tm-170, Ir-192
Nem ölçüm cihazları	Co-60, Cs-137, Ir-192, Am-241

Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması'na (Non-Proliferation Treaty – NPT) taraf olan ve nükleer silaha sahip olmayan tüm ülkeler, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) ile bir güvenlik denetimi (güvence) anlaşması imzalamakla yükümlüdür. Bu anlaşma çerçevesinde, ilgili ülkeler kendi topraklarında, yetki alanlarında ya da denetimleri altındaki tüm nükleer madde ve faaliyetlerin UAEA'nın nükleer güvence önlemlerine tabi tutulmasına izin vermeyi taahhüt eder. UAEA'nın temel görevi, söz konusu nükleer maddelerin nükleer silahlar ya da diğer nükleer patlayıcı aygıtların üretiminde kullanılmadığını doğrulamaktır. Bu kapsamda, UAEA ilgili materyaller üzerinde doğrulama, denetim ve gözetim uygulama yetkisine ve sorumluluğuna sahiptir [1].

Uranyumun zenginleştirilmemiş hali olan 'tüketilmiş uranyum', 'kaynak madde' olarak sınıflandırıldığı için nükleer güvence denetimlerinin kapsamına girer ve beyan edilmesi zorunludur. Güvence anlaşması yürürlükte olan ülkeler, DU da dahil olmak üzere ellerinde bulunan tüm nükleer maddelerin envanterini ve bu maddelerin hareketlerini düzenli olarak UAEA'ya raporlamakla yükümlüdür. Ayrıca, bu ülkeler UAEA'nın ilgili nükleer tesislere ve sahalara denetim amacıyla erişimini sağlamayı taahhüt eder [1].

Bu tez çalışmasının amacı; teleterapi cihazları, ticari ışınlayıcılar ve endüstriyel radyografi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yüksek aktiviteli gama kaynakları ile doğrusal hızlandırıcılar ve ayrıca yüksek seviyeli radyoaktif atıklar veya kullanılmış nükleer yakıtın taşınması, depolanması ve bertarafında kullanılan DU zırh malzemesinin, nükleer güvence kapsamında denetime tabi olması nedeniyle, mevcut alternatif zırhlama malzemeleriyle zırhlama performansının karşılaştırılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda, DU'nun yerine geçebilecek; daha hafif, daha düşük maliyetli, toksisitesi daha az olan ve üretimi ile kullanımı açısından daha avantajlı zırhlama malzemeleri belirlenerek bir alternatif malzeme önerisinde bulunulması hedeflenmektedir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

İyonlaştırıcı radyasyon, atomlardan gelen bir enerji türüdür. Gama veya X-ışınları gibi elektromanyetik dalgalar şeklinde veya nötronlar veya alfa ve beta parçacıkları gibi parçacıklar halinde yayılabilir. Atomlar kendi kendilerine parçalandıklarında buna radyoaktivite denir ve saldıkları enerji bir tür iyonlaştırıcı radyasyondur. Kararsız olan ve parçalanarak bu radyasyonu açığa çıkaran atomlara radyonüklit denir.

Her radyonüklit, yaydığı radyasyonun türüne, bu radyasyonun enerjisine ve atomların yarısının bozunmasının ne kadar sürdüğüne bağlı olarak tanımlanır, buna yarı ömrü denir [2].

Bir radyonüklitin mevcut miktarı, becquerel (Bq) cinsinden ifade edilen aktivitesi ile ölçülür. Bir becquerel, bir atomun saniyede bir parçalanmasına (veya bozulmasına) eşittir. Yarılanma ömrü, bir radyonüklit örneğindeki atomların yarısının bozunması için geçen süredir. Bu süre saniyenin çok küçük bir kısmından milyonlarca yıla kadar değişebilir. Örneğin, iyot-131'in yarı ömrü 8 gün iken, karbon-14'ün yarı ömrü 5730 yıldır [2].

2.2. Radyasyon Uygulamaları

Radyasyon, 1890'lı yıllarda bilim insanları tarafından keşfedilmiş olup, o zamandan bu yana insanlığın yararına olacak çeşitli kullanım alanları geliştirilmiştir. Günümüzde radyasyon; tıp, bilimsel araştırmalar ve sanayi gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmakta, aynı zamanda elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, tarımsal verimliliğin artırılmasından arkeolojik buluntuların tarihlendirilmesine (karbon tarihlleme), uzay araştırmalarından kolluk kuvvetlerinin güvenlik uygulamalarına, yer kabuğunun incelenmesinden madencilik faaliyetlerine kadar birçok farklı alanda da faydalı uygulamalara sahiptir [3].

Medikal uygulamalar

Radyasyon, tıpta tiroit hastalıkları ve kanser gibi sağlık sorunlarının tanı ve tedavisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. En bilinen örneklerden biri, vücut dokularından geçerek

kemik ve organ görüntüleri oluşturan X ışınlarıdır. Bu sayede doktorlar kırık kemikler ya da dış problemlerini kolayca tespit edebilir. X ışınlarının yanı sıra diğer radyasyon türleri de, zararlı hücreleri yok ederek ya da tümörleri küçülterek kanser gibi hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Örneğin, radyoaktif iyot, tiroit kanserini tedavi etmek amacıyla sıkça tercih edilmektedir [3].

Geleneksel röntgenlerin ötesinde, vücudun iç yapısını daha ayrıntılı ve renkli olarak görüntüleyen CT (Bilgisayarlı Tomografi – *Computational Tomography*) cihazları gibi ileri teknoloji ürünü görüntüleme sistemleri de kullanılmaktadır. Bu cihazlar, tümör gibi sağlık sorunlarının saptanmasında önemli rol oynar. Ayrıca bazı durumlarda hastalara, belirli organlardaki problemleri daha iyi teşhis edebilmek için düşük miktarda radyoaktif madde verilmektedir [3].

Endüstriyel uygulamalar

Araştırma kurumları ve eğitim kuruluşları, nükleer materyalleri öğretim, deney ve bilimsel çalışmalar için kullanmaktadır. Örneğin, bilim insanları çevre kirliliğini, okyanus akıntılarını ya da ekosistemlerdeki değişimleri incelemek için bitkilerde, hayvanlarda ve çevresel maddelerdeki radyoaktif izleri takip edebilirler. Radyasyon teknolojisi ayrıca toprak türlerini, petrol yataklarını ve maddelerin (örneğin petrol, duman, proteinler) yapısını analiz etmeye de yardımcı olmaktadır [3].

Arkeologlar ise, "karbon tarihleme" yöntemiyle fosillerin ve antik eserlerin yaşını belirlemede radyasyondan yararlanır. Tüm canlılarda bulunan karbon-14 adlı radyoaktif element, organizma öldüğünde zamanla azalmaya başlar. Nesnede kalan karbon-14 miktarı ölçülerek, o nesnenin yaklaşık yaşı hesaplanabilir [3].

Bilimsel ve akademik uygulamalar

Okullar ve araştırma merkezleri, nükleer materyalleri hem eğitim hem de deneysel araştırmalarda kullanır. Bilim insanları, çevre kirliliği, toprak yapısı, enerji kaynakları ve deniz akıntıları gibi konuları incelemek için bitkilerdeki, hayvanlardaki ve diğer doğal unsurlardaki radyoaktif maddeleri takip eder. Ayrıca radyasyon, maddelerin bileşenlerini (örneğin petrol, duman, proteinler) analiz etmek için de faydalı bir araçtır [3].

Tarım uygulamaları

Radyoizotoplar, kuraklığa ve hastalıklara karşı dayanıklı, daha hızlı büyüyen ve verimi yüksek bitki türleri geliştirmek için yapılan araştırmalarda kullanılmaktadır. Radyasyon, sağlık ve bilim alanlarının yanı sıra tarımda da çeşitli uygulamalara sahiptir [4].

Tarımda radyasyon kullanımı; mahsul verimini ve kalitesini artırmak, zararlılarla mücadele etmek ve gübre ya da pestisit kullanımını en etkili hale getirmek gibi alanlarda önemli katkılar sağlar. Ayrıca, gıda ve tarım ürünlerinin korunmasında da radyasyondan yararlanılmaktadır. Bu sayede tarım sektörü daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmektedir [4].

Enerji üretimi

Nükleer fisyon, yani atom çekirdeğinin parçalanması, günümüzde elektrik üretiminin temel yöntemlerinden biridir. Artan enerji ihtiyacına karşılık, nükleer enerji; güvenilirliği, temizliği ve uygun maliyeti sayesinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, ABD'de elektrik üretiminin yaklaşık %21'i nükleer enerji santrallerinden sağlanmakta ve bu oranla kömürden sonra ikinci büyük enerji kaynağı konumundadır [3].

Nükleer santraller, suyu buhara dönüştürerek jeneratörleri çalıştırır ve bu sayede elektrik üretir. Kömür veya doğal gaz gibi fosil yakıt yakan santrallerin aksine, nükleer santrallerde uranyum kullanılarak yakma işlemi olmadan, fisyon yoluyla ısı elde edilir [3].

Uranyum gibi nükleer yakıtlar radyoaktif maddeler içerir. Bu maddeler genellikle yakıt çubuklarında bulunur, ancak reaktörün soğutulmasında kullanılan suya az miktarda radyoaktif gaz karışabilir. Bu su, çevreye salınmadan önce dikkatle arıtılır. Yine de çok küçük miktarlarda radyoaktif madde, sıkı kontroller altında dışarıya bırakılabilir [3].

2.3. Radyasyon Uygulamalarında Kullanılan Radyonüklitler

Radyonüklitler, diğer adıyla radyoizotoplar, çeşitli bilimsel, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kritik öneme sahip izotopik maddelerdir. Tanısal nükleer tıp görüntüleme tekniklerinden (örneğin PET ve SPECT) onkolojik tedavilere, endüstriyel radyografiden akademik araştırmalara kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptirler. Bu izotopların

yaydığı radyasyon türü (alfa, beta, gama), fiziksel yarı ömürleri ve üretim yöntemleri gibi özellikleri, her birini belirli uygulamalar için özel olarak uygun kılar.

Radyonüklit teknolojisi, özellikle nükleer tıp ve endüstriyel tarama sistemlerinde giderek artan bir öneme sahip olup, devam eden bilimsel araştırmalar bu izotopların yeni ve yenilikçi kullanım alanlarını ortaya çıkarmaktadır. Aşağıda, çeşitli radyonüklitlerin başlıca kullanım alanlarına dair örnekler sunulmaktadır:

Teknesyum-99m (Tc-99m)

Teknesyum-99m (Tc-99m), nükleer tıpta tanınal amaçlarla en yaygın kullanılan radyonüklitlerden biridir. Özellikle tek foton emisyonlu bilgisayarlı tomografi (SPECT) görüntüleme tekniklerinde tercih edilen Tc-99m, kalp, beyin, kemik ve böbrek gibi organların fonksiyonel ve yapısal değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Bu izotop, tümöral oluşumlar, kardiyovasküler hastalıklar ve osteo-enfeksiyonlar gibi patolojik durumların non-invaziv olarak tespitinde yaygın şekilde kullanılmaktadır [5].

Yaklaşık 6 saatlik fiziksel yarı ömrü, Tc-99m'yi tıbbi görüntüleme açısından ideal kılar; bu süre zarfında yüksek kaliteli görüntüler elde edilebilirken, izotopun hızlı bozunması sayesinde hastanın maruz kaldığı radyasyon dozu da minimize edilir. Tc-99m, gama kameraları tarafından kolaylıkla tespit edilebilen 140 keV enerjili gama ışınları yayar; bu da yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesine olanak tanır [5].

Tc-99m, genellikle nükleer reaktörlerde elde edilen molibden-99'un (Mo-99) β^- bozunması yoluyla üretilir. Mo-99, bir jeneratör sistemi içerisinde Tc-99m'ye dönüşerek, sağlık tesislerinde radyofarmasötik formda kullanılmak üzere kolayca ayrıştırılabilir. Bu jeneratör tabanlı üretim yöntemi, Tc-99m'nin taze ve güvenilir biçimde temin edilmesini sağlar ve dünya genelinde nükleer tıbbın temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir [5].

İyot-131 (I-131)

I-131, öncelikle hipertiroidizm ve tiroid kanseri gibi tiroid rahatsızlıklarının tedavisinde olmak üzere hem tanınal hem de terapötik olarak kullanılmaktadır. Özellikle tiroid dokusunu ablate etmek veya tiroid kanseri metastazını tedavi etmek için etkilidir [6].

I-131 beta ve gama emisyonu ile bozunmaktadır ve tiroid ile ilgili hastalıkların tedavisi ve görüntülenmesi için idealdir. Yaklaşık 8 günlük yarılanma ömrü, tiroid dokusunu hedeflemek ve tedavi etmek için yeterli zaman sağladığından terapötik uygulamalar için uygundur. I-131, genellikle Tellür-130 gibi hedeflerden elde edildiği nükleer reaktörlerde üretilir [6].

Kobalt-60 (Co-60)

Co-60, kanser tedavisi için harici ışın radyoterapisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kaynaklar ve metal yapılar gibi malzemelerin tahribatsız testleri de dahil olmak üzere endüstriyel radyografide de kullanılmaktadır [7].

Co-60, derin dokulara nüfuz edebilen güçlü gama radyasyonu yaymaktadır ve bu da radyasyon tedavisinde tümörleri hedeflemek için etkili olmasını sağlamaktadır. Yarılanma ömrünün 5,27 yıl olması, tıbbi kullanım ve endüstriyel uygulamalar için uygun olan uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Co-60, nükleer reaktörlerde kobalt-59'un nötronlarla ışınlanmasıyla üretilir [7].

Karbon-14 (C-14)

C-14 öncelikle arkeologlar, jeologlar ve paleontologlar tarafından fosiller, kemikler ve ahşap gibi eski organik malzemelerin yaşını tahmin etmek için kullanılan bir yöntem olan radyokarbon tarihlemeye kullanılmaktadır [8].

C-14'ün yarı ömrü 5.730 yıldır, bu da onu binlerce ila on binlerce yıllık nesnelerin tarihlendirilmesi için uygun hale getirmektedir. Canlı organizmalarda doğal olarak bulunur ve çürümesi ölümden bu yana geçen süreyi hesaplamak için kullanılmaktadır. C-14, kozmik ışınların nitrojen ile etkileşimi sonucu atmosferde doğal olarak veya reaktörlerde yapay olarak üretilmektedir [8].

Fosfor-32 (P-32)

P-32, moleküler biyoloji ve genetik araştırmalarında, özellikle DNA ve RNA'nın etiketlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tıbbi teşhislerde ve hücrelerdeki biyokimyasal süreçleri incelemek için de kullanılmaktadır [9].

P-32, çeşitli biyolojik süreçlerde moleküllerin davranışını izlemek ve incelemek için yararlı olan beta parçacıkları yaymaktadır. Oldukça hassastır ve çok küçük miktarlardaki maddeleri tespit edebilmektedir. P-32, bir nükleer reaktörde fosforlu bir hedefin nötron ışınlamasıyla üretilmektedir [9].

Stronsiyum-90 (Sr-90)

Sr-90, kanser tedavisi için radyoterapi gibi tıbbi uygulamalarda, özellikle kemik kanserinde palyatif bakım için veya uzay görevlerinde güç sağlamak için radyoizotop termoelektrik jeneratörlerinde (RTG'ler) kullanılmaktadır [10].

Sr-90'ın 28,8 yıllık bir yarı ömrü vardır, bu da uzay araştırmaları için RTG'lerde uzun süreli kullanıma izin vermektedir. Ayrıca bazı kanser tedavilerinde tümörlerin hedeflenmesinde etkili olan beta radyasyonu yaymaktadır. Sr-90 reaktörlerdeki nükleer fisyonun bir yan ürünüdür ve hem tıbbi hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [10].

Sezyum-137 (Cs-137)

Cs-137 endüstriyel radyografide boru hatlarını ve malzemeleri incelemek için kullanılır. Ayrıca kanser tedavisinde radyasyon terapisi için kullanılmaktadır [11].

Cs-137, 30 yıllık bir yarı ömre sahiptir ve malzemelerin derinliklerine nüfuz edebilen gama radyasyonu yaymaktadır, bu da onu hem endüstriyel hem de terapötik uygulamalar için yararlı kılmaktadır. Cs-137 nükleer reaktörlerde nükleer fisyonun bir yan ürünü olarak üretilmektedir [11].

Amerisyum-241 (Am-241)

Am-241, duman dedektörlerinde yaygın olarak kullanılır ve ayrıca bazı kanserler için radyasyon tedavisinde kullanılmaktadır.

Am-241, duman dedektörlerinde hava partiküllerini iyonize etmek için kullanılan alfa partikülleri yaymaktadır. Ayrıca kanserde hedefe yönelik tedavi araştırmalarında da uygulamaları vardır. Am-241, nükleer reaktörlerde plütonyum-239'un nötronlarla ışınlanmasıyla üretilmektedir [12].

2.4. Radyasyon Zırhlaması

Radyasyon zırhlaması, iyonlaştırıcı radyasyonun canlı organizmalar ve hassas ekipman üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak veya önlemek için tasarlanmış radyasyondan korunmanın önemli bir yönüdür [13].

Radyasyon zırhlamanın temel yönleri şunlardır [13]:

- Radyasyon kaynağı ile korunacak alan veya nesne arasında bir bariyer oluşturulur. (Bariyer oluşturma)
- Koruyucu malzemeler, kurşun, beton, çelik ve su gibi radyasyonu emme veya saptırma yeteneklerine göre seçilir. (Malzeme seçimi)
- Teknikler; pasif zırhlama (örn. kurşun kaplı duvarlar), aktif zırhlama (örn. sıvı sintilatörler) veya biyolojik zırhlama (örn. astronotlar için uzay giysileri) içerebilir.

Radyasyon zırhlama uygulamaları arasında sağlık hizmetleri, nükleer enerji ve personelin ve çevrenin güvenliğini sağlamak için uzay araştırmaları yer almaktadır.

Radyasyonu zırhlamak için farklı malzemeler kullanılabilir ve malzeme seçimi radyasyonun türüne ve gücüne bağlıdır. Zırhlama için kullanılan yaygın malzemeler arasında kurşun, beton, çelik ve su bulunmaktadır. Kurşun özellikle gama ışınlarını durdurmada iyiyken, beton genellikle nötronları engellemek için kullanılmaktadır. Su da etkilidir çünkü radyasyonu emmeye ve yaymaya yardımcı olan çok miktarda hidrojen içermektedir [13].

2.5. Radyasyon Zırhlamasında Kullanılan Malzemeler

Bir malzemenin radyasyonu durdurma veya azaltma yeteneği üç temel şeye bağlıdır: atomlarındaki proton sayısı (atom numarası olarak adlandırılır), atomlarının ne kadar sıkı yerleşimi (yoğunluğu) ve malzemenin ne kadar kalın olduğu. Daha ağır atomlara sahip yoğun malzemeler (daha yüksek atom numarasına sahip olanlar) radyasyonu engellemede daha iyidir. Bunun nedeni, radyasyonun çarpışabileceği elektronlar ve atom çekirdeği gibi daha fazla parçacığa sahip olmalarıdır; bu da radyasyonun malzeme ile etkileşime girerken enerji kaybetmesine neden olmaktadır [14].

Radyasyon zırhlamada kullanılan temel malzemeler şunlardır:

Kurşun

Yüksek atom numarası (82) ve yoğunluğu nedeniyle gama ışınlarını ve X-ışınlarını engellemede son derece etkilidir. Tıbbi tesislerde, nükleer enerji santrallerinde ve araştırma laboratuvarlarında kullanılmaktadır [14].

Beton

Nötronları ılımlı hale getiren su içerdiğinden nötron radyasyonuna karşı zırhlama için ekonomik ve etkilidir. Nükleer reaktörlerde ve muhafaza yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır [14].

Su

Nötronları emmede ve yavaşlatmada şaşırtıcı derecede etkilidir, bu da onu nükleer reaktörlerde ve kullanılmış yakıt depolamada kullanışlı hale getirmektedir [14].

Bor

Düşük enerjili nötronları absorbe etmede oldukça etkilidir, genellikle beton veya diğer malzemelerle birlikte kullanılmaktadır. Nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında ve nötron zırhlamada kullanılmaktadır [14].

Tungsten

Yüksek atom numarasına sahip yoğun metal, özellikle ağırlık ve alanın sınırlı olduğu uygulamalarda gama ve X-ışını radyasyonu için etkilidir. Tıbbi görüntüleme ekipmanlarında ve havacılıkta kullanılmaktadır [14].

Tüketilmiş uranyum

Son derece yoğun, yüksek gama radyasyonu zırhlama özellikleri nedeniyle radyografide zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır [14].

Özel polimerler

Kişisel koruyucu ekipman ve tıbbi cihazlarda kullanılan, kurşun veya diğer ağır metalleri içeren esnek, hafif malzemelerdir [14].

2.6. Tüketilmiş Uranyumun Özellikleri

DU yüksek yoğunluğu sayesinde mükemmel bir radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılmaktadır, kimyasal toksisitesi radyolojik riskten daha büyük bir tehdit oluşturmaktadır ve askerî ve endüstriyel alanlarda geniş kullanım alanına sahiptir.

2.6.1. Genel özellikler

Tüketilmiş uranyum, doğal uranyumdan zenginleştirme süreci sırasında yan ürün olarak elde edilir. Doğal uranyumda %0,72 oranında bulunan U-235 izotopu azaltılmış olup, DU genellikle %99,75 U-238 içermektedir [1].

- Gümüş metalik parlaklığa sahiptir.
- $19,1 \text{ g/cm}^3$ ile kurşundan %67 daha yoğundur, bu da onu mükemmel bir radyasyon zırhı yapmaktadır.
- 1132°C erime noktasına sahiptir.
- 4131°C kaynama noktasına sahiptir.
- Havadaki oksijenle yavaş yavaş oksitlenerek sarımsı-yeşil veya siyah oksit katmanları oluşturmaktadır.
- İnce toz veya talaş hâlinde piroforiktir (kendiliğinden tutuşabilir).

2.6.2. Radyolojik özellikler

Tüketilmiş uranyum, radyoaktif özelliklere sahip olmakla birlikte, doğal uranyumdan yaklaşık %40 daha az radyoaktiftir. Bunun nedeni, yüksek radyoaktifliğe sahip U-235 ve U-234 izotoplarının büyük oranda uzaklaştırılmış olmasıdır [1].

- Ana radyasyon türü: Alfa radyasyonu (α) yayar.
- Beta ve gama radyasyonu emisyonu çok düşüktür.
- Yarı ömrü:

- U-238: 4,5 milyar yıl
- U-235: 710 milyon yıl
- U-234: 245 bin yıl
- Özgül aktivite:
 - Doğal uranyum: $2,59 \times 10^4$ Bq/g
 - Tüketilmiş uranyum: $1,48 \times 10^4$ Bq/g

DU, iç radyasyon riski taşır ancak dış radyasyon riski oldukça düşüktür [1].

2.6.3. Kimyasal özellikler ve toksisite

Tüketilmiş uranyum, ağır metaller kategorisinde yer aldığı için kimyasal toksisite açısından risk oluşturmaktadır [1].

İç organlara etkisi [1]

- Böbrekler için zehirlidir (toksik uranil iyonları nedeniyle).
- Solunduğunda akciğerlere zarar verebilmektedir.
- Sindirim yoluyla alındığında kemiklerde ve böbreklerde birikebilmektedir.

Biyolojik yarı ömür [1]

Vücuda girdiğinde büyük kısmı idrarla atılır, ancak bir kısmı kemiklerde uzun süre kalabilmektedir.

2.6.4. Kullanım alanları

Tüketilmiş uranyumun yüksek yoğunluğu ve düşük maliyeti nedeniyle birçok farklı alanda kullanımı vardır [1]:

Radyasyon zırhlama

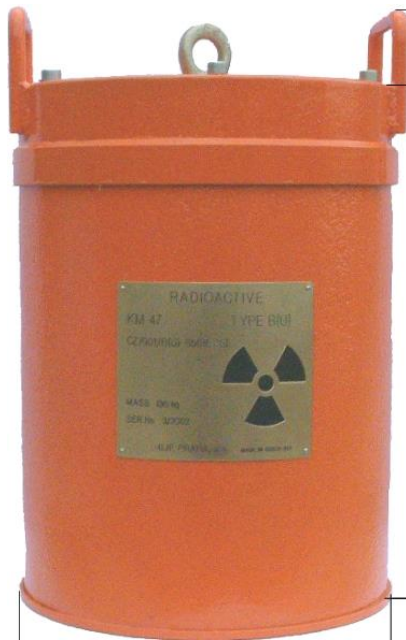
- Teleterapi cihazları
- Endüstriyel radyografi cihazları
- Nükleer atık kapları

Askerî amaçlar

- Zırh delici mühimmatlar
- Tank zırhları (Abrams tanklarında kullanılır)

Sivil kullanım

- Uçak ve gemilerde balast ağırlık
- Petrol ve doğalgaz sondajı için ağırlık ve denge malzemesi



Resim 2.1. UJP PRAHA üretimi KM 47 model B(U) tipi taşıma konteynırı [15]

2.6.5. Radyasyon güvenliği ve atık yönetimi

Tüketilmiş uranyum içeren cihazlar kullanıldıktan sonra atık yönetimi büyük önem taşır. DU, nükleer atık olarak değerlendirilebilir ve güvenli depolanması gerekmektedir [1].

- Kapsüllenenerek saklanması önerilmektedir.
- Belli miktarların üzerindeki DU, UAEA tarafından uluslararası nükleer güvence denetimine tabidir.

2.7. Tungsten Polimerler

Tungsten polimerleri, tungsten tozu (elementel tungsten veya bileşikleri) ile bir polimer matrisi (örneğin polietilen, poliüretan veya epoksi reçinesi) karıştırılarak elde edilen kompozit malzemelerdir. Bu malzemeler, tungstenin yüksek yoğunluk ve radyasyon zırlama özelliklerini, polimerlerin kalıplanabilirlik, hafiflik ve çok yönlülüğüyle birleştirir. Genellikle kurşunsuz radyasyon zırlama çözümleri olarak tercih edilirler [16].

2.7.1. Genel özellikler

Tungsten, gümüş-beyaz görünümlü, ancak yüksek erime noktası ve yoğunluğuyla öne çıkan olağanüstü sert bir metaldir; saf tungsten ürünleri (toz, plaka, çubuk, tel vb.) genellikle %99,95'in üzerinde saflıkta üretilir ve iyon implantasyonu, kaplama, tıp ve vakum uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır [17].

- Gümüş metalik bir görünüme sahiptir; polimer matriks nedeniyle esnek veya yarı-sert levha/sac formunda, yüzeyde metalik parlaklık değil daha mat-metalik görünüm olmaktadır [17].
- Polimer tungsten ürünlerinin yoğunluğu üretim ve tungsten dolgu oranına bağlıdır; tipik ticari aralık $\sim 4\text{--}11,3 \text{ g/cm}^3$. Saf tungsten metalin yoğunluğu yaklaşık $19,25 \text{ g/cm}^3$ 'tür [17].
- Saf tungsten metalin erime noktası $\sim 3420\text{--}3422 \text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama noktası çok yüksektir; ancak tungsten-polimer kompozitlerde matriks polimer önce yumuşar veya termal bozunmaya girer [17].
- Tungsten metal ve tungsten oksitleri genelde çevrede stabildir; metal tozları havada nispeten yavaş oksitlenir ve normal koşullarda reaktif, hızlı oksitlenip renk değiştirip paslanır gibi davranmaz. Kompozit bağlamında polimer matriksin kimyasal kararlılığı (asit, baz, çözücülere karşı) seçilen polimere bağlıdır; bazı polimer-tungsten kompozitler nem/kimyasallara karşı dayanıklı tasarlanır [17].

2.7.2. Radyolojik özellikler

Tungsten yüksek bir atom numarasına ($Z = 74$) sahiptir ve bu da onu yüksek enerjili fotonları emmede etkili kılar [18]. Tungsten dolgulu kompozitler, belirli enerji aralıklarında kurşun bazlı zırlama ile rekabet edebilir veya hatta onu geçebilir [18].

Tungsten katkısını artırarak (~%95'e kadar ağırlıkça) yoğunluklar kurşuna benzer şekilde 10–11,3 g/cm³'e ulaşabilir [19]. Daha yoğun olması sebebiyle daha iyi zırhlama verimliliğine sahip olduğu ifade edilebilmektedir.

Termal nötron zırhlaması için ideal değildir (tungsten nötronları iyi emmez) [20]. Genellikle nötron zayıflaması için hidrojen açısından zengin polimerler veya bor içeren katkı maddeleri ile birleştirilmektedir [20].

2.7.3. Kimyasal özellikler ve toksisite

Tungsten'in radyasyon zırhlama malzemesi olarak kimyasal özellikleri ve toksisitesi, bu alandaki kullanımının güvenliğini ve etkinliğini doğrudan etkilemektedir.

Korozyon direnci [17]

- Polimer kapsülleme, tungsteni oksidasyondan ve kimyasal saldırıdan korur.
- Kullanılan polimere bağlı olarak dış mekan veya nemli ortamlar için uygundur.

Termal stabilite [18]

- Matrise bağlı olarak:
 - o Polietilen bazlı kompozitler: ~90–130°C
 - o Epoksi veya PTFE bazlı: ~200–250°C
- Termal sınırların ötesinde ayrışma veya performans kaybı meydana gelebilir.

Kimyasal eylemsizlik [18]

- Genellikle reaktif olmayan, toksik olmayan ve RoHS uyumlu (çevresel olarak güvenli).
- Çoğu ticari uygulamada asitlere ve bazlara karşı eylemsizdir.

2.7.4. Kullanım alanları

Tungsten, yüksek yoğunluğu ve erime noktası sayesinde radyasyon zırhlama malzemesi olarak birçok alanda tercih edilmektedir. Tungsten'in radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanıldığı başlıca alanlar aşağıda yer almaktadır:

Tıbbi alan [21]

- X-ray odalarında, BT tarayıcılarında ve kanser tedavisi ekipmanlarında zırhlama.
- Şırınga korumaları, koruyucu giysiler ve taşınabilir teşhis kapları.

Nükleer endüstri [19]

- Radyoaktif izotopları depolamak için zırhlanmış kaplar.
- Nükleer reaktör bakımı için modüler zırhlama panelleri.

Havacılık ve savunma [16]

- Radyasyon zırhlaması için uydularda ve uzay araçlarında kullanılmaktadır.
- Yeşil mühimmatta toksik olmayan mermi ve şarapnel alternatifleri.

2.8. Zırhlama Malzemelerinin Maliyetleri

Taşıma konteynerleri için bir zırh malzemesi olarak kullanılmasının maliyeti, hammadde maliyetleri, üretim, düzenlemelere uyumluluk ve bertaraf dahil olmak üzere birkaç temel faktöre bağlıdır. Bu bölümde, radyoaktif kaynaklarının taşınması için kullanılan taşıma konteynerlerine özgü maliyetlerinden bahsedilmiştir.

Tungsten polimeri, tungsten tozu ve bir polimer matrisinden (polietilen, epoksi veya kauçuk gibi) yapılmış bir kompozit malzemedir. Özellikle tıbbi, havacılık ve nükleer uygulamalarda radyasyon zırhı için kurşun ve tüketilmiş uranyuma alternatif olarak kullanılmaktadır.

2.8.1. Ham madde maliyeti

DU yüksek yoğunluğa ($19,1 \text{ g/cm}^3$) sahiptir ve bu da onu gama ve nötron radyasyonuna karşı zırhlamada oldukça etkili hale getirmektedir. Her ne kadar ham DU metalinin maliyeti tungstene göre uygun olsa da işlenmiş ve alaşımlı DU (örneğin, DU-Titanyum) daha pahalıdır [1]. Gerekli DU kütlesi zırhının kalınlığına bağlıdır. Radyoaktif kaynak taşımada kullanılan bir nakliye konteynırı ($\sim 5\text{--}10 \text{ cm}$ DU zırhı) 136 kg DU içerebilmektedir [15].

Tungsten polimeri genellikle ağırlıkça %60-%95 oranında tungsten içerir. Tungsten tozu ham madde maliyeti kg başına 50-80 ABD doları, polimer bağlayıcı maliyeti türe (kauçuk, plastik, epoksi) bağlı olmakla beraber kg başına 2-10 ABD doları ve son tungsten polimer maliyeti, tungsten içeriğine bağlı olarak genellikle kg başına 50-90 ABD doları arasında olmaktadır [22].

2.8.2. İşleme ve üretim maliyetleri

DU, oksidasyonu önlemek için genellikle çelik veya diğer koruyucu malzemelerle kaplanmaktadır. DU levha, blok veya panel hâline getirilirken sinterleme, talaşlı imalat ve yüzey işleme gerekir. DU'nun toksik ve düşük düzeyde radyoaktif olması nedeniyle bu işlemler özel ekipman ve tesis gerektirir [23].

Kompozit granüller, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon veya presleme gibi yöntemlerle levha veya parça formuna getirilmektedir. Enjeksiyon kalıplama en yaygın ve verimli yöntemdir. Tungsten polimer enjeksiyon kalıplama veya ekstrüde edilmektedir ve bu da onu metal bazlı zırhlamadan daha esnek hale getirir. İşlenebilirlik açısından kurşun veya DU'ya göre çok daha kolaydır. Ekstradan toksik ortam veya lisanslı tesis gerektirmez [24].

2.8.3. Düzenleme ve güvenlik uyumluluğu

DU zırhlı kapların taşınması, UAEA, NRC, DOT ve yerel düzenlemelere uyumu gerektirmektedir. Bu kapsamdaki maliyetler şunlardır [1]:

- Lisanslama ve sertifikasyon
- Radyasyon izleme ve güvenlik önlemleri
- İşçi eğitimi ve taşıma protokolleri

Kurşun veya DU'nun aksine, tungsten polimeri toksik ve radyoaktif değildir, bu da düzenleyici maliyetleri azaltmaktadır. Özel bir bertaraf süreci veya tehlikeli madde elleçleme gerektirmemektedir [24].

2.8.4. Bertaraf ve uzun vadeli depolama

DU konteynerleri sonunda hizmet dışı bırakıldıktan sonra bertaraf maliyetleri yüksek olabilmektedir. Kurşun veya DU'dan farklı olarak, tungsten polimerler ise toksik ve radyoaktif değildir, bu sebeple özel bir bertaraf sürecine tabi değildir [1].

2.8.5. İşlenmiş malzeme maliyetleri

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere DU maliyeti, biçimine, saflığına ve amaçlanan uygulamaya bağlı olarak önemli ölçüde değişmekle beraber, bazı kaynaklarda 101,6x101,6x45,72 mm boyutlarındaki bir DU levhası 3.500 ABD dolarına listelenmiştir, buna göre de DU levhası kg başına yaklaşık 5.500 ABD dolarına denk gelmektedir [25].

Çin Tungsten Endüstrisi Derneği'ne göre, 1000x200x0,5 mm ölçülerindeki polimer tungsten levhaların fiyatı kg başına 110 ABD dolarıdır [26].

2.9. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı Nükleer Güvence Denetimleri

Nükleer Silahların Yayılmasının Önlenmesi Antlaşması'na (NPT) taraf olan ve nükleer silaha sahip olmayan tüm ülkeler, UAEA ile güvence anlaşması yaparak, ülkelerinin sınırları içinde, yetkileri kapsamında veya kontrol ettikleri herhangi bir yerde yürütülen tüm nükleer faaliyetler ve nükleer materyaller üzerinde UAEA'nın güvence denetimlerini uygulamasına izin vermeyi taahhüt etmektedirler. UAEA, bu malzemelerin nükleer silah veya diğer nükleer patlayıcı cihazlara yönlendirilmediğini doğrulamak amacıyla güvence denetimleri gerçekleştirme yetkisine ve sorumluluğuna sahiptir. DU, 'kaynak madde' kategorisine girdiğinden, nükleer güvence denetimleri kapsamında değerlendirilir ve ilgili ülkeler tarafından beyan edilmesi zorunludur. Güvence anlaşması bulunan ülkeler, envanterlerindeki tüm nükleer materyallerin (DU dahil) miktarlarını ve hareketlerini UAEA'ya bildirmekle yükümlüdür. Ayrıca, UAEA'nın bu malzemelerin bulunduğu tesisleri ve sahaları denetleyebilmesi için gerekli erişim kolaylığını sağlamaları gerekmektedir [1].



Resim 2.2. UAEA denetimi esnasında etiket üzerindeki bilgiler mevcut veya görünür olmadığında DU zırhın gama spektrometresi ile tanımlanmasına örnek [1]

2.10. Radyasyon Zırhlaması için İncelenen Parametreler

Bu tez kapsamında, zırhlama özelliklerini hesaplamak ve karşılaştırmak amacıyla bazı parametreler incelenmiş ve bu bölümde hesaplamalarda kullanılan formüllere yer verilmiştir:

- Lineer ve kütle azalım katsayıları (LAC, MAC),
- Yarı ve onda bir değer kalınlıkları (HVL).

2.10.1. Toplam kütle azalım katsayısı (MAC)

Kütle azalım katsayısı (μ/ρ), fotonların yoğunluğunun bir malzemedan geçerken ne kadar azaldığını gösterir ve bu azalma malzemenin birim kütlesi başına ölçülmektedir. Bu denklemde; I fotonların malzemedan geçtikten sonraki yoğunluğunu, I_0 ise malzemeye girmeden önceki yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu azalımı etkileyen malzemenin yoğunluğu tipik olarak ρ ile gösterilmektedir.

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x}$$

$$\mu = (\mu/\rho)\rho$$

Kütle azalım katsayısı yukarıdaki ve aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [27].

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$$

w_i , i_{th} ve $(\mu/\rho)_i$ sırasıyla ağırlık oranını, karışımdaki elementi ve kompozitteki her bir elementin kütle azalım katsayısını temsil etmektedir [28].

2.10.2. Lineer azalım katsayısı (LAC)

LAC'yi hesaplamak için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$I = I_0 e^{-\mu_{\rho} t}$$

Bu denklemdeki;

- I_0 değeri zırh malzemesine gelen radyasyonu,
- I ise malzemeden geçtikten sonra zayıflatılan radyasyonu,
- t (g/cm^2) numunedeki kütle kalınlığını,
- μ_{ρ} (cm^2/g) kütle azalım katsayısını

temsil etmektedir [27].

2.10.3. Yarı değer kalınlığı (HVL)

Yarı değer kalınlığı (HVL), ilk radyasyon seviyesini zırh malzemesinden geçerken yarıya indirmek için gereken soğurucu malzemenin kalınlığıdır. HVL aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [29].

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Denklemde μ , kompozitin toplam lineer azalım katsayısını temsil etmektedir.

2.10.4. Ağırlık oranı

Malzemenin ağırlığı önemli ölçüde yoğunluğuna bağlıdır ve bu çalışmada DU referans değer olmak üzere denklemlerle temsil edilebilir [29].

$$\% \text{ of heaviness} = \frac{\text{density of material}}{\text{density of DU}} \times 100$$





3. MATERYAL – YÖNTEM

Bu bölümde, tez yazımında kullanılan araştırma yöntemlerinden bahsedilmiştir.

SAMP1, SAMP2, SAMP3, SAMP4 polimer kompozitlerinin DU kütle azalım katsayılarının hesaplanmasında Phy-X/PSD ve XCOM bilgisayar programları kullanılmıştır. Kompozitlerin çeşitli yüzde oranları bilgisayar programına girilmiştir (Çizelge 3.1, Çizelge 3.2). Kütle azalım katsayıları belirlendikten sonra, bu malzemelerin lineer azalım katsayılarını belirlemek için denklem kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. C₂H₄- W polimer kompozitlerinin yüzde fraksiyonlarını ve kısaltmalarını gösteren tablo

Kompozit	% C ₂ H ₄	%W
SAMP1	25	75
SAMP2	20	80
SAMP3	15	85
SAMP4	10	90

Çizelge 3.2. Farmasötiklerde yaygın olarak kullanılan radyoizotopların ortalama enerjilerini gösteren tablo

Radyoizotop	Ortalama Foton Enerjisi (keV)
Cs-137	661,7
I-131	284,3 – 364,5 – 637

3.1. Kullanılan Yazılımlar

Tez kapsamında zırhlama özelliklerinin hesaplanması ve karşılaştırması için geliştirilen Phy-X Photon Shielding and Dosimetry (Phy-X/PSD) ve XCOM yazılımının kullanılması öngörülmektedir. Bu yazılım ile şu parametreler incelenebilmektedir:

- Lineer ve kütleli azalım katsayıları (LAC, MAC),
- Yarı ve onda bir değer kalınlıkları (HVL, TVL),
- Ortalama serbest yol (MFP),
- Etkin atom numarası ve elektron yoğunluğu (Z_{eff} , N_{eff}),

- Etkin iletkenlik (C_{eff})
- Enerji emilimi ve maruziyet birikim faktörleri (EABF, EBF)

EpiXS bilgisayar programı, Phy-X/PSD ve XCOM'dan elde edilen bulguların doğrulanmasına yardımcı olmuştur.

3.1.1. Phy-X Photon Shielding and Dosimetry (Phy-X/PSD)

Phy-X/PSD (Foton Zırhlama ve Dozimetri), Atatürk Üniversitesi ve Bayburt Üniversitesi araştırmacıları tarafından geliştirilen ücretsiz, web tabanlı bir yazılımdır. Foton zayıflaması, radyasyon zırhı ve dozimetri uygulamaları için gerekli olan kapsamlı bir parametre setini hesaplamak üzere tasarlanmıştır [30].

Temel özellikler

Hesaplamalar, çeşitli uygulamalarla ilgili geniş bir foton enerjisi yelpazesini barındıran 1 keV'den 100 GeV'ye kadar sürekli bir enerji spektrumu üzerinde gerçekleştirilebilir (geniş enerji aralığı) [30].

Yazılımda hesaplanan parametreler şunlardır [30]:

- Lineer ve Kütle Azalım Katsayıları (LAC, MAC),
- Yarı Değer Kalınlığı (HVL) ve Onda Bir Değer Kalınlığı (TVL),
- Ortalama Serbest Yol (MFP),
- Etkin Atom Numarası (Z_{eff}) ve Elektron Yoğunluğu (N_{eff}),
- Etkin İletkenlik (C_{eff}),
- Enerji Emilim Biriktirme Faktörü (EABF) ve Maruziyet Biriktirme Faktörü (EBF),
- Hızlı Nötron Giderme Kesiti (FNRCs).

Kullanıcılar, malzemeleri mol kesri veya ağırlık kesri kullanarak bileşimlerini belirterek tanımlayabilirler. Yazılım, karmaşık bileşiklerin ve karışımların girişini destekleyerek özel malzemelerin ayrıntılı analizine olanak tanır (malzeme özelleştirme) [30].

Yazılım, iyi bilinen radyoaktif kaynakların (örneğin, Na-22, Co-60, Cs-137) bir seçimini ve Cu, Rb, Mo, Ag, Ba ve Tb gibi elementlerin karakteristik X-ışını enerjilerini içerir ve pratikte kullanılan yaygın foton enerjilerine hızlı erişimi kolaylaştırır [30].

Sezgisel kullanıcı dostu bir arayüzle tasarlanan Phy-X/PSD, kullanıcıların hesaplamaları verimli bir şekilde yapmalarını ve sonuçları daha fazla analiz için Microsoft Excel gibi araçlarla uyumlu formatlarda dışa aktarmalarını sağlar [30].

Uygulamalar

Phy-X/PSD, özellikle hassas foton etkileşimi verilerinin gerektiği alanlarda faydalıdır [30], örneğin:

- Radyasyon zırhı tasarımı
- Tıbbi fizik ve dozimetri
- Nükleer mühendislik
- Malzeme bilimi araştırması

Yazılım, kütle azalım katsayıları ve etkili atom numaraları gibi parametreleri hesaplayarak camlar ve polimerler de dahil olmak üzere malzemelerin radyasyon zırhı özelliklerini analiz etmek için çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır [30].

3.1.2. NIST XCOM: Photon Cross Section Data

XCOM, Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından geliştirilen kapsamlı bir foton kesit veritabanıdır. Geniş bir enerji aralığında saçılma, fotoelektrik emilim ve çift üretimi dahil olmak üzere maddeyle foton etkileşimlerini hesaplamak için temel veriler sağlar [31].

Temel özellikler

Yazılımın enerji aralığı 1 keV ila 100 GeV arasında olup desteklenen malzemeler; elementler ($Z \leq 100$), bileşikler ve karışımlardır [31].

Yazılımda hesaplanan parametreler şunlardır [31]:

- Kütle azalım katsayıları (MAC),
- Lineer azalım katsayıları (LAC),
- Ortalama serbest yollar (MFP),
- Yarı değer kalınlığı (HVL).

Yazılımda aşağıdaki özelleştirmeler yapılabilmektedir [31]:

- Kullanıcı tanımlı enerji şebekeleri
- Emilim kenarları etrafındaki enerjilerin otomatik olarak dahil edilmesi
- Bileşikler ve karışımlar için kimyasal formüllerin veya ağırlık kesirlerinin girişi

Uygulamalar

XCOM, hassas foton etkileşim verilerinin gerekli olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [31], örneğin:

- Radyasyon zırhı tasarımı
- Tıbbi fizik ve dozimetri
- Nükleer mühendislik
- Malzeme bilimi araştırması

Foton radyasyonuna maruz kalan malzemelerin tasarımı ve analizine yardımcı olarak, foton zayıflaması ve etkileşim katsayılarının hesaplanması için temel bir araç görevi görür.

3.1.3. EpiXS: Windows application for photon attenuation quantity generation using EPICS2017 (ENDF/B-VIII) or the EPDL97 (ENDF/B-VI.8) photoatomic libraries

EpiXS, Filipin Nükleer Araştırma Enstitüsü (PNRI) tarafından, foton zayıflatma, dozimetri ve zırhlama hesaplamaları için geliştirilmiş Windows tabanlı bir yazılımdır. Çeşitli malzemeler için doğru ve kapsamlı veriler sunmak amacıyla EPICS2017 (ENDF/B-VIII) ve EPDL97 (ENDF/B-VI.8) fotoatomik veri kütüphanelerinden yararlanır [32].

Temel özellikler

Yazılım, 1 keV ile 100 GeV enerji aralığı arasında veri enterpolasyonu gerçekleştirmektedir [32].

Yazılımda hesaplanan parametreler şunlardır:

- Kütle azalım katsayıları (MAC),
- Lineer azalım katsayıları (LAC),
- Ortalama serbest yollar (MFP),
- Yarı değer kalınlığı (HVL),
- Etkili atom numaraları (Z_{eff}),
- Elektron yoğunlukları (N_{eff}),
- Enerji emilim birikim faktörleri (EABF) ve Maruziyet birikim faktörleri (EBF).

Veri tablolarının MS Excel için CSV dosyaları ve grafiklerin vektör görüntü EMF dosyaları olarak dışa aktarılmasına olanak tanır. Kullanıcı tarafından tanımlanan herhangi bir malzeme için hesaplamaları destekler [32].

Uygulamalar

EpiXS, özellikle aşağıdakiler gibi hassas foton etkileşimi verilerinin gerektiği alanlarda kullanışlıdır [32]:

- Radyasyon zırhı tasarım
- Tıbbi fizik ve dozimetri
- Nükleer mühendislik
- Malzeme bilimi araştırması

İmmünoterapi ilaçları ve DNA nükleobazları dahil olmak üzere çeşitli maddelerin gama ışını etkileşim parametrelerini analiz eden çalışmalarda kullanılmış ve araştırma uygulamalarındaki çok yönlülüğünü vurgulamıştır [32].

3.2. Yoğunluk

Polimer kompozitlerin yoğunluğu aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\rho_c = \frac{100}{\frac{F}{\rho_F} + \frac{P}{\rho_P}}$$

Bu denklemdeki;

- ρ_c , F ve P sırasıyla polimer kompozitin yoğunluğunu, dolgu maddesi yüzde oranını ve polimer matris yüzde oranını,
- ρ_F ve ρ_p sırasıyla dolgu maddesi ve polimer matrisin yoğunluklarını

temsil etmektedir [29].

Çizelge 3.3. Zırhlama malzemelerinin yoğunlukları

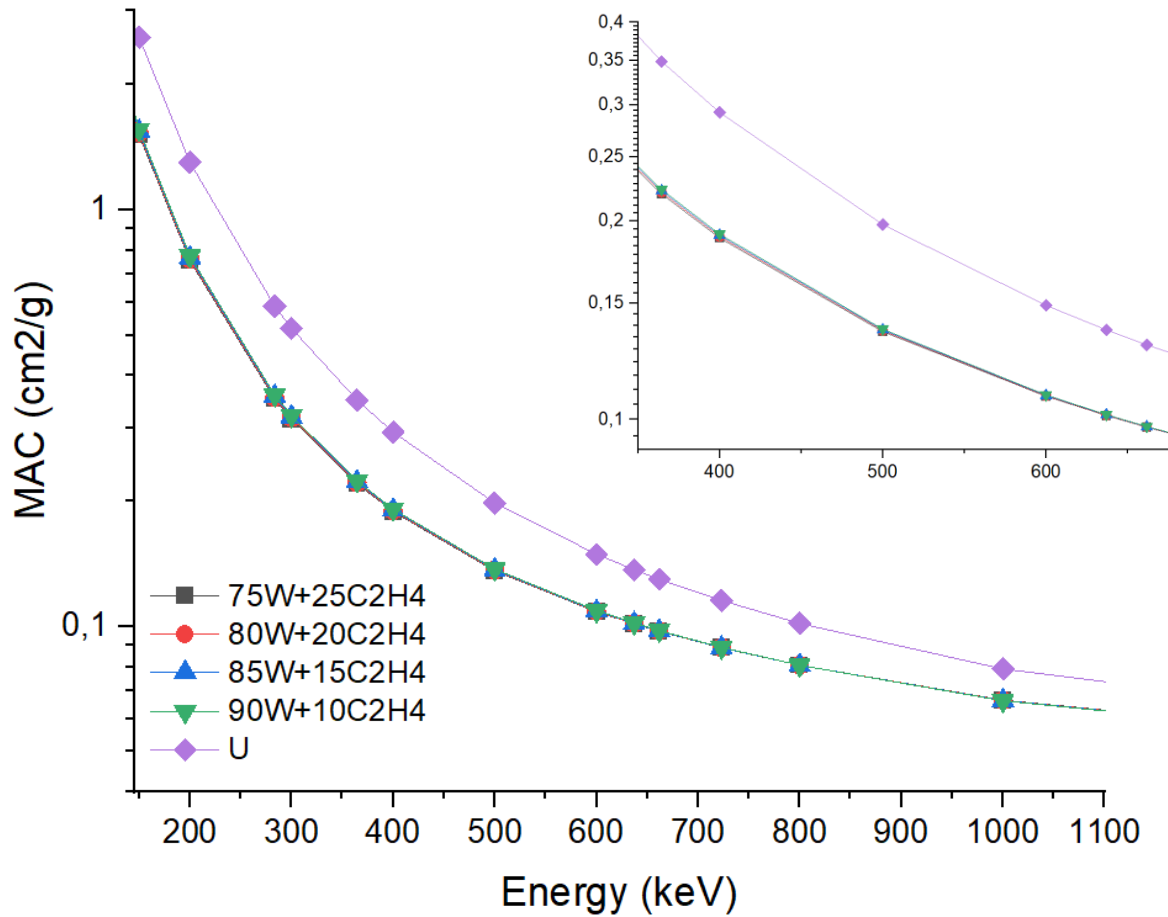
Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)
%75 W - %25 C ₂ H ₄	3,311
%80 W - %20 C ₂ H ₄	3,967
%85 W - %15 C ₂ H ₄	4,952
%90 W - %10 C ₂ H ₄	6,583
%100 DUa	19,07

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde program çıktıları ve hesaplama sonuçlarına yer verilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. Toplam Kütle Azalım Katsayısı (MAC)

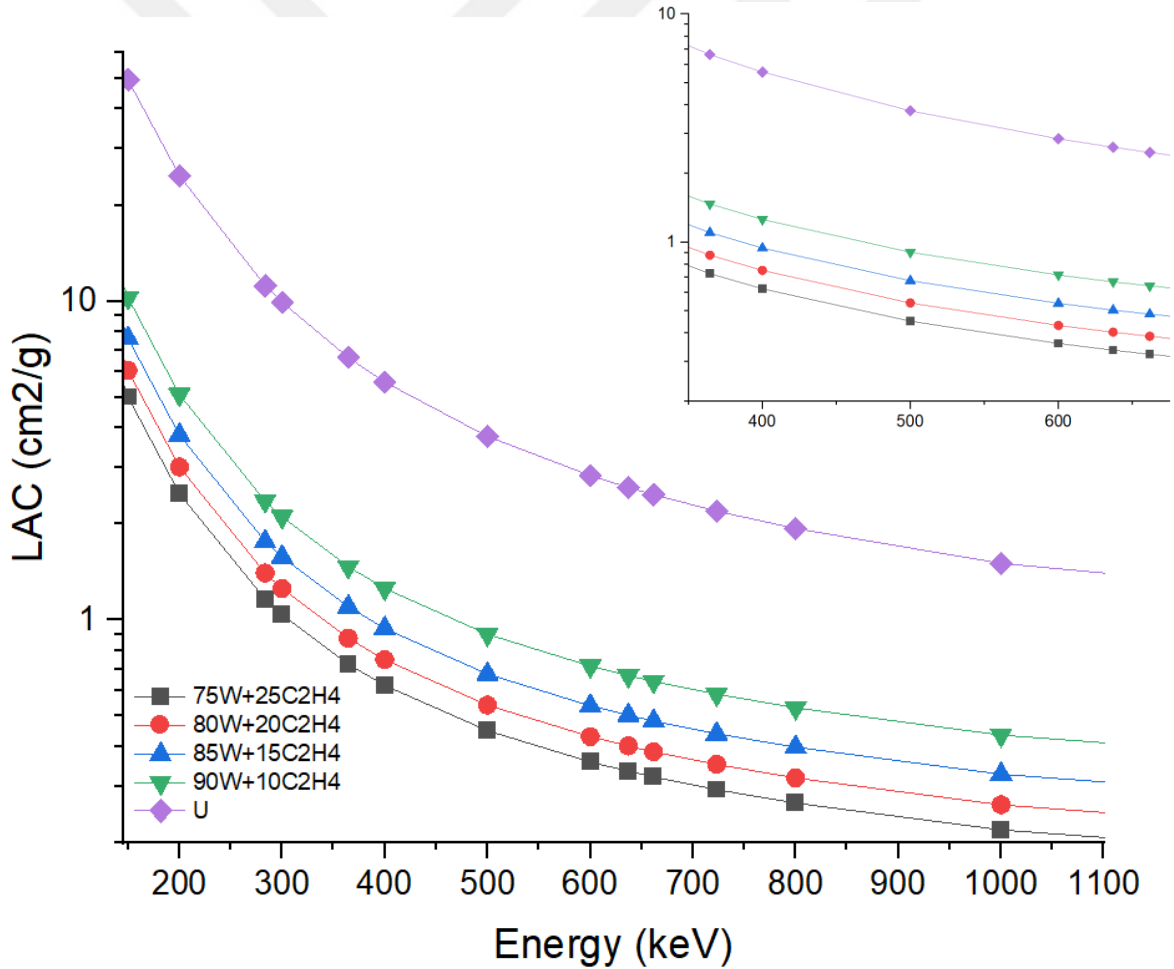
Şekil 4.1, C₂H₄ - W polimer kompozitlerinin ve DU'nun enerjiye karşı toplam kütle azalım katsayılarını (MAC) göstermektedir. Şekil 4.1'den, SAMP4'ün bu çalışmada ilgilenilen tüm enerjilerde DU ile daha yakın bir MAC gösterdiği gözlemlenmektedir. SAMP4'ün diğer tüm kompozitler üzerindeki radyasyon zırhlama etkinliği konusunda DU ile daha yakın olduğu, yüksek tungsten yüzdesi fraksiyonuna bağlanabilir. SAMP4, diğer polimer kompozitlerle (SAMP1, SAMP2 ve SAMP3) karşılaştırıldığında en yüksek tungsten oranına sahiptir.



Şekil 4.1. C₂H₄-W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı toplam kütle azalım katsayılarını gösteren grafik

4.2. Lineer Azalım Katsayısı (LAC)

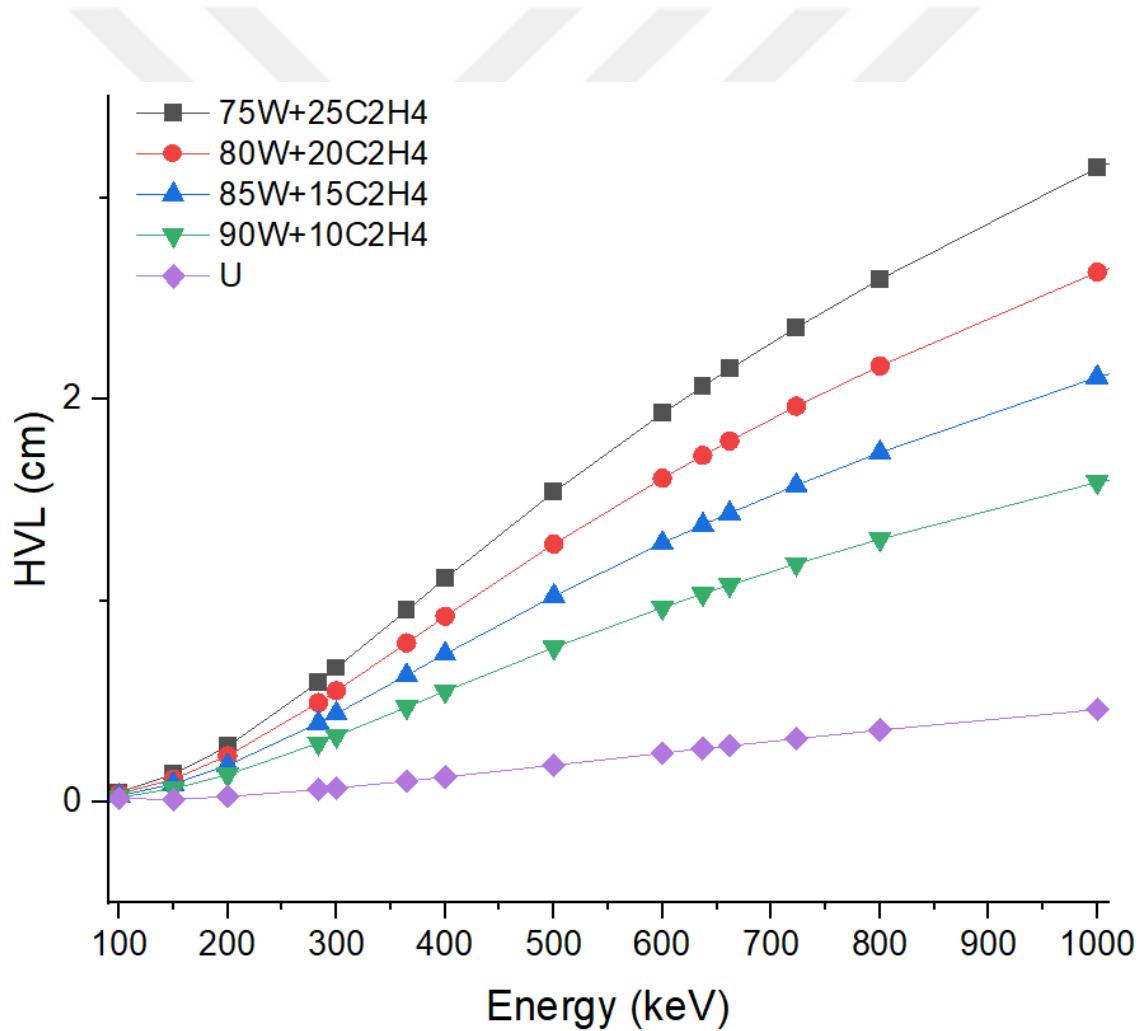
Şekil 4.2, C_2H_4 - W polimer kompozitleri ve DU'nun lineer azalım katsayılarının (LAC) çeşitli değerlerini göstermektedir. SAMP4'ün LAC'sinin bu çalışmada incelenen diğer malzemelerin LAC'sinden 284,3 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV'de daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.2'den, bu çalışmada ele alınan tüm enerjilerde tungstendeki artışla birlikte LAC'nin arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.1'den elde edilen bilgiler, en yüksek tungsten yüzdesine sahip SAMP4'ün radyofarmasötiklerin taşınması sırasında uygulanacak radyasyon zırhlamasında DU'nun yerini alabileceğini göstermektedir. Tungsten dolgulu polimer kompozitler fotonlara karşı umut verici azalım değerleri göstermiştir.



Şekil 4.2. C_2H_4 -W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı lineer azalım katsayılarını gösteren grafik

4.3. Yarı Değer Kalınlığı (HVL)

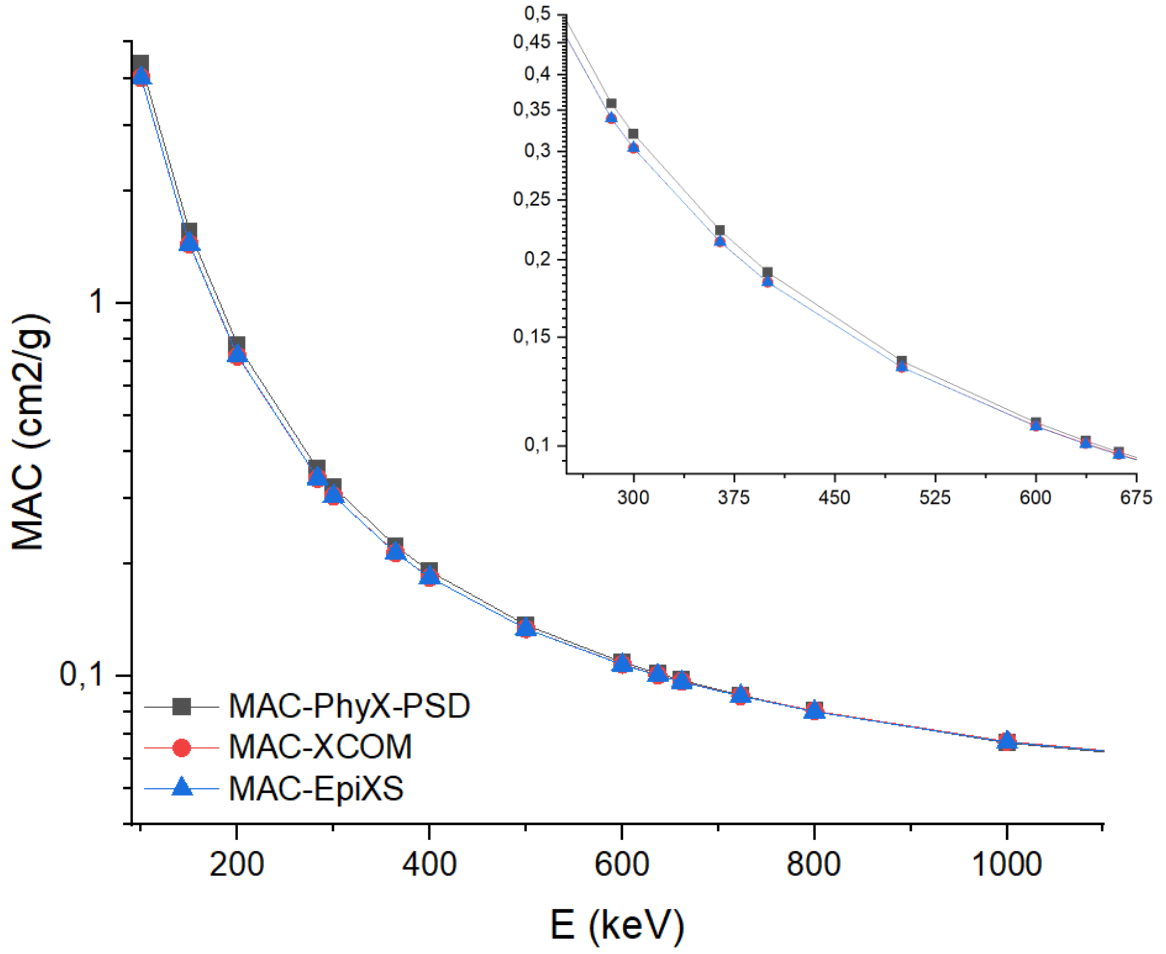
Şekil 4.3, bu çalışmada incelenen tüm polimer kompozitlerin HVL'leri ile 284,3 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV'deki DU arasındaki ilişkinin bir göstergesidir. Ekonomik faktörler göz önünde bulundurulduğunda daha az HVL kalınlığı daha iyidir. Şekil 4.3'te, SAMP4'ün HVL'si DU dahil diğer tüm kompozitler arasında en düşüktür ve bu da DU'yu uygun şekilde ikame etmede SAMP4 için bir artıdır. SAMP4'ün HVL'si 284,3 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV'de DU'nun HVL'sinden sırasıyla 0,231, 0,367, 0,768 ve 0,798 cm daha yüksektir. Sonuç olarak, tungsten dolgu polimer bazlı kompozit malzemelerin radyasyon zırhı olarak uygulanabilir olduğu söylenebilir.



Şekil 4.3. C₂H₄-W polimer kompozitlerin ve DU'nun enerjiye karşı yarı değer kalınlığı değerlerini gösteren grafik

4.4. Doğrulama

Phy-X/PSD, XCOM ve EpiXS kütle azalım katsayıları (MACs) değerleri karşılaştırılmıştır çünkü MAC diğer tüm zırhlama parametrelerinin türetildiği temel özelliktir. Şekil 4.4 bu karşılaştırmayı göstermektedir.



Şekil 4.4. SAMP4 polimer kompozit için Phy-X ve EpiXS sonuçlarının enerjiye karşı karşılaştırmasını gösteren grafik

Aşağıda yer alan Çizelge 4.1’de ise Phy-X/PSD, XCOM ve EpiXS yazılımlarında tüm kompozitler için bu değerlerin karşılaştırılması yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Phy-X ve EpiXS kütle azalım katsayılarını gösteren çizelge

Enerji (keV)	Polimer Kompozit	Phy-X MAC (cm ² /g)	XCOM MAC (cm ² /g)	EpiXS MAC (cm ² /g)
284,3	SAMP1	0,351	0,303	0,303
364,5		0,220	0,197	0,197
637		0,101	0,099	0,099
661,7		0,097	0,095	0,095
284,3	SAMP2	0,354	0,315	0,315
364,5		0,221	0,203	0,203
637		0,102	0,099	0,099
661,7		0,097	0,096	0,096
284,3	SAMP3	0,357	0,327	0,327
364,5		0,222	0,208	0,208
637		0,102	0,100	0,100
661,7		0,098	0,096	0,096
284,3	SAMP4	0,359	0,339	0,339
364,5		0,223	0,214	0,214
637		0,102	0,101	0,101
661,7		0,098	0,097	0,097

Phy-X/PSD ve EpiXS bilgisayar programları arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Phy-X/PSD ve EpiXS değerleri arasında iyi bir uyum olmasına rağmen, EpiXS değerlerinin Phy-X/PSD bilgisayar kodundan elde edilen değerlerden biraz daha düşük olduğunu belirtmek

gerekir. Bu fark, iki kodun yazımında kullanılan kesit kütüphanelerindeki farklılıktan kaynaklanıyor olabilir. Bu durum, bu çalışmadan elde edilen sonuçların güvenilirliğini teyit etmektedir.

4.5. Ağırlık Oranı

Çizelge 4.2’de, SAMP1, SAMP2, SAMP3, SAMP4 ve DU’nun ağırlık oranlarını gösterilmektedir. Tüm kompozitlerin DU’ya göre daha hafif olduğu görülmektedir. Hafif malzemeler, üretim sırasında taşımayı ve manevra yapmayı kolaylaştırdığı için büyük avantaj sağlar. Ayrıca, polimer kompozitlerin her zaman hazır bulunabilmesi, üretim süresinin hızlanmasına katkı sağlar.

Çizelge 4.2. C₂H₄-W polimer kompozitlerinin yüzde ağırlık oranları gösteren çizelge

Kompozit	Malzeme	%Ağırlık Oranı
SAMP1	%75 W - %25 C ₂ H ₄	17,362
SAMP2	%80 W - %20 C ₂ H ₄	20,802
SAMP3	%85 W - %15 C ₂ H ₄	25,968
SAMP4	%90 W - %10 C ₂ H ₄	34,52

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Taşıma konteynerleri için zırhlama malzemesi üretimi ve kullanımı; malzeme maliyeti, üretim süreci, yasal düzenlemelere uyum ve bertaraf işlemleri gibi temel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Her ne kadar DU, yüksek yoğunluğu sayesinde etkili bir radyasyon zırhlama malzemesi olsa da işlenmesi, taşınması ve güvenli şekilde bertaraf edilmesi kurşun gibi alternatiflere kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Ham DU'nun maliyeti düşük olmasına rağmen, bu ek süreçler toplam maliyeti önemli ölçüde artırır. Bu nedenle, DU ve tungsten polimerlerin işlenmiş malzeme maliyetleri karşılaştırıldığında, ham DU daha ucuz olsa da; işleme, üretim, düzenlemelere uyum ve bertaraf maliyetleri dikkate alındığında tungsten polimerlerin toplamda daha ekonomik ve uygulanabilir bir seçenek olduğu görülmektedir (Çizelge 5.1).

Tungsten polimerler ise tungsten tozu ile polietilen, epoksi veya kauçuk gibi polimer matrislerin birleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Bu malzemeler, özellikle tıp, havacılık ve nükleer alanlarda radyasyon zırhı olarak kurşun ve DU'ya alternatif olarak kullanılmaktadır. Tungsten polimerlerin kilogram başına maliyeti genellikle 80 ila 110 dolar aralığında değişmektedir. DU'nun aksine toksik olmayan yapıları sayesinde özel bertaraf gerektirmezler ve çevre dostudurlar. Ayrıca esnek ve kalıplanabilir olmaları sayesinde özel tasarımlı zırh üretimi kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında incelenen, %90 Tungsten (W) ve %10 Polietilen (C_2H_4) içeren SAMP4 isimli polimer kompozit, 283,5 keV, 364,5 keV, 637 keV ve 661,7 keV enerjilerinde sırasıyla %30,1, %26,2, %15,1 ve %12,1 oranlarında kütle azalım katsayısı (MAC) açısından DU'dan daha düşük değerler göstermiştir. Ayrıca, incelenen tüm polimer kompozitlerin DU'ya kıyasla %65'ten daha hafif olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, SAMP4, özellikle belirtilen enerji seviyelerinde sağladığı etkili radyasyon zırhlama özellikleri sayesinde DU'nun yerine kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Hafiflik, malzemelerin taşınabilirliği ve işlenebilirliği açısından önemli bir avantaj sunduğundan, kompozitlerin DU'ya göre daha hafif olması da tercih sebebidir. Buna ek olarak, polimer kompozitlerin yapısal özellikleri, üretim sürecinin daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 5.1. Zırhlama malzemelerinin karşılaştırması

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Yaklaşık Maliyet (\$/kg)	Avantajlar	Dezavantajlar
Tüketilmiş Uranyum (DU)	19,1	\$5–\$10 (hammadde), \$3.500–\$5.500 (işlenmiş)	Daha iyi zırhlama	Radyoaktif, bertaraf maliyeti, denetime tabi
Tungsten Polimer	3,5–14	\$80–\$110	Toksik değil, esnek, kolay işlenebilir	Kurşundan pahalı
Tungsten	19,3	\$50–\$80	Yüksek yoğunluk, etkili zırhlama	Ağır, işleme zorluğu
Kurşun	11,3	\$2–\$3	Ucuz, geniş kullanım alanı	Toksik, elleçleme önlemleri gerektirir

Gelecekteki çalışmalar, yüksek yoğunluklu tungsten polimer kompozitlerin formülasyonunda %95'e kadar tungsten kullanımıyla daha etkili sonuçlar elde edebilir ve bu malzemeleri sadece endüstriyel değil, medikal radyoloji uygulamaları için de umut verici hâle getirebilir. Tungsten polimerler, toksik olmamaları, esnek yapıları ve kullanım kolaylıkları sayesinde, hammadde maliyetinin ön planda olmadığı uygulamalarda uygun maliyetli bir seçenek sunabilir. Öte yandan, DU her ne kadar güçlü bir radyasyon zırhı sağlasa da yüksek işleme ve mevzuata uyum maliyetleri, ayrıca UAEA ve ulusal otoriteler tarafından sıkı denetime tabi olması nedeniyle ek iş gücü ve operasyonel yük getirmektedir. Bu sebeplerle, tungsten polimerler DU'ya alternatif olarak zırhlama malzemesi seçiminde daha avantajlı olabilir.

Bu çalışmada, foton etkileşim parametrelerinin hesaplanmasında Phy-X/PSD yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, kullanıcıya geniş bir enerji aralığında temel radyasyon zırhlama parametrelerini sunabilmekte ve kullanıcı dostu bir platform olarak öne çıkmaktadır. Ancak, enerji aralığının sabit ve görece büyük aralıklarla (örneğin 100 keV) sınırlandırılmış olması, özellikle düşük enerjili foton etkileşimlerinde ya da keskin absorpsiyon kenarlarının gözlemlenmesi gereken malzeme analizlerinde önemli bir belirsizlik kaynağı oluşturmaktadır. Bu durum, kompozit malzeme optimizasyon çalışmalarında parametrik duyarlılığı sınırlamaktadır.

Benzer şekilde, yazılımda yer alan gama kaynaklarına ait sabit enerji verileri yalnızca sınırlı sayıda yaygın izotopu kapsamaktadır. Bu durum, daha az bilinen veya yeni geliştirilen

radasyon kaynaklarının değerlendirilmesi gereken durumlarda yazılımın doğrudan kullanımını kısıtlamakta, kullanıcıyı alternatif yazılımlara veya manuel hesaplamalara yönlendirmektedir. Ayrıca, geniş spektrumlu ya da çok enerjili gama kaynaklarının analizinde yazılım, parametrik çeşitliliği karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

Bu sınırlılıkların aşılabilmesi için, aşağıdaki iyileştirme önerileri sunulmaktadır:

- Enerji aralığı adımının kullanıcı tarafından serbestçe belirlenebileceği bir esnek enerji aralığı yapılandırması, özellikle düşük enerjili fotonların hassas analizini mümkün kılacaktır.
- Daha geniş kapsamlı bir gama kaynak veri tabanı oluşturularak, nadir izotoplara ve karma enerji spektrumlarına dayalı analizlere destek sağlanmalıdır.
- Kullanıcı tanımlı enerji değerlerinin manuel girişine ek olarak, dış kaynaklı spektrum dosyalarının (.txt, .csv) sisteme entegre edilebilmesi, yazılımın esnekliğini ve bilimsel kapsamını artıracaktır.

Sonuç olarak, Phy-X/PSD yazılımı mevcut haliyle önemli bir analiz aracı olmasına karşın, yukarıda belirtilen işlevsel kısıtlar özellikle hassas malzeme karşılaştırmaları ve spektral çözümlemelerde kullanım etkinliğini azaltmaktadır. Yapılacak yazılım güncellemeleriyle bu sınırlamaların giderilmesi, yazılımın akademik ve endüstriyel alandaki yaygınlığını ve geçerliliğini önemli ölçüde artıracaktır.



KAYNAKLAR

1. International Atomic Energy Agency. (2023). Management of Depleted Uranium Used as Shielding in Disused Radiation Devices, *IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.30*, IAEA, Vienna, 3–7.
2. World Health Organization: WHO Web. (2023). *Ionizing radiation and health effects*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects>, Son Erişim Tarihi: 27.02.2025.
3. *Uses of radiation*. (t.y.). NRC Web. <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html>, Son Erişim Tarihi: 11.03.2025.
4. Alam, S. M., Raziuddin Ansari, ve Mohammad Athar Khan. (2001). Application of radioisotopes and radiation in the field of agriculture: review. *Journal of Biological Sciences*, 1(3), 82–86.
5. Alberto, R. (2012). Application of Technetium and Rhenium in Nuclear Medicine. *Cosmos*, 08(01), 83–101.
6. Ravichandran, R., Aamri, M. A., Binukumar, J., ve Balushi, N. A. (2016). Therapeutic applications of radioactive ¹³¹Iodine: Procedures and incidents with capsules. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 31(3), 176.
7. Pinard. (2020). Retrospective study and review of ocular radiation side effects following external-beam Cobalt-60 radiation therapy in 37 dogs and 12 cats. *The Canadian Veterinary Journal = La Revue Veterinaire Canadienne*, 53(12).
8. Libby, W. F. (1955). *Radiocarbon dating*. Chicago: University of Chicago Press.
9. United States Nuclear Regulatory Commission. (2020). Phosphorus-32 (P-32). <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/phosphorus.html>. Son Erişim Tarihi: 19.12.2024.
10. United States Nuclear Regulatory Commission. (2020). Strontium-90 (Sr-90). <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/strontium.html>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2024.
11. United States Environmental Protection Agency. (2019). Radionuclide Basics: Cesium-137 | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cesium-137>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2025.
12. United States Nuclear Regulatory Commission. (2021). Fact sheet on Americium-241. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/americium.html>, Son Erişim Tarihi: 19.12.2024.
13. Clean energy business council. (2024). Radiation Shielding - Definition & Detailed Explanation - Nuclear Energy Glossary Terms -. [cleanenergybusinesscouncil.com](https://cleanenergybusinesscouncil.com/nuclear-energy-glossary/radiation-shielding/). <https://cleanenergybusinesscouncil.com/nuclear-energy-glossary/radiation-shielding/>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2025.

14. Admin, V. (2023). *The many radiation shielding options offered by Vulcan GMS*. Vulcan. <https://vulcangms.com/many-radiation-shielding-options-offered-vulcan-gms/>, Son Erişim Tarihi: 19.02.2025.
15. *Packaging files type B (U) - Offer - UJP Praha a.s.* (t.y.). UJP Praha a.s. <https://ujp.cz/en/offer/packaging-files-type-b-u>, Son Erişim Tarihi: 22.02.2025.
16. More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., et al. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2057–2090.
17. *Poly tungsten | Tungsten polymer | Tungsten radiation shielding*. (n.d.). Stanford Materials, <https://www.stanfordmaterials.com/poly-tungsten.html>, Son Erişim Tarihi: 22.02.2025.
18. Kassim, H., Aldawood, S., Prasad, S., Asemi, N. N., Aziz, A. A., ve AlSalhi, M. S. (2024). Advanced polymeric matrix utilizing nanostructured bismuth and tungsten oxides for gamma rays shielding. *Heliyon*, 10(17), 37289.
19. Yan Binyou. (2020). Tungsten powder filled polymers for flexible radiation shielding in nuclear industries. *China Atomic Energy Press*, 128-131.
20. Nambiar, S., ve Yeow, J. T. W. (2012). Polymer-Composite materials for radiation protection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(11), 5717–5726.
21. Chen, Z., Li, X., Lu, L., Yuan, B., Wang, L., Li, Z., ve Li, H. (2023). Non-Toxic and Flexible Radiation-Shielding Composites Based on Natural Rubber Containing Elemental W Fillers for Efficient Shielding against X/ γ -rays. *Processes*, 11(3), 674.
22. Yiyunyingliping. (2024). Introduction to Tungsten Metal powder | Additive manufacturing material. *Additive Manufacturing Material*. <https://am-material.com/news/introduction-to-tungsten-metal-powder/>, Son Erişim Tarihi: 27.02.2025.
23. Dole, L. R., ve Quapp, W. J. (2002). Radiation shielding using depleted uranium oxide in nonmetallic matrices. *ORNL/TM-2002/111*, Oak Ridge National Laboratory, UT-Battelle, LLC, Oak Ridge, Tennessee (2002), 9, 2003-04.
24. Chang, Q., Guo, S., ve Zhang, X. (2023). Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*, 233, 112253.
25. AR15.COM. (t.y.). *Depleted Uranium 4"x4"x1/8" slab:\$3,500.00*, https://www.ar15.com/forums/general/Depleted_Uranium_4andamp_34_x_4andamp_p_34_x_1_8andamp_34_slab___3_500_00___HOLY_CRAP_/5-334994/, Son Erişim Tarihi: 27.03.2025.
26. Clina. (2024). *Polymer tungsten sheet price on FEB.1,2024China Tungsten Industry News Center*. <https://www.ctia.com.cn/en/price/35500.html>, Son Erişim Tarihi: 27.02.2025.

27. Al-Buriahi, M. S., ve Tonguc, B. T. (2019). Mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some contrast agents for computed tomography. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108507.
28. L. Gerward, N. Guilbert, K. Bjorn Jensen, ve H. Leving. (2001). X-ray absorption in matter Reengineering XCOM, *Radiation Physics and Chemistry*, 60 (2001), 23-24.
29. Almuqrin, A., Tijani, S., Al-Ghamdi, A., Alhuzaymi, T., ve Alotiby, M. F. (2023). Radiation shielding properties of high-density polyethylene (C₂H₄)/molybdenum III oxide (MoO₃) polymer composites for dental diagnostic applications. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), 100681.
30. Şakar, E., Özpolat, Ö. F., Alım, B., Sayyed, M. I., ve Kurudirek, M. (2020). Phy-X/PSD: Development of a user-friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108496.
31. Berger, M.J., Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S., Sukumar, R., Zucker, D.S., ve Olsen, K. (2010). XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.5). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
32. Hila, F. C., Asuncion-Astronomo, A., Dingle, C. A. M., et al. (2021). EpiXS: A Windows-based program for photon attenuation, dosimetry and shielding based on EPICS2017 (ENDF/B-VIII) and EPDL97 (ENDF/B-VI.8). *Radiation Physics and Chemistry*, 182, 109331.





Gazili olmak ayrıcalıktır