

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ
SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI



SICAK PRES KALIPLAMA TEKNİĞİ İLE İKİ KATMANLI
KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE İYONLAŞTIRICI
RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

MERVE ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
PROF. DR. HASAN OĞUL

SİNOP- 2025

TEZ KABUL

MERVE ŞAHİN tarafından hazırlanan “**SICAK PRES KALIPLAMA TEKNİĞİ İLE İKİ KATMANLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı bu çalışma, 17.12.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından oybirliği ile **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Ferdi AKMAN
Bingöl Üniversitesi/ Bingöl Sosyal Bilimler
Meslek Yüksek Okulu

İmza

**Üye
(Danışman)**

Prof. Dr. Hasan OĞUL
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Doç. Dr. Mehmet Onur KARAAĞAÇ
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Onur ŞAHİN

İmza

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; 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 çalışmasında 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.

Merve ŞAHİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SICAK PRES KALIPLAMA TEKNİĞİ İLE İKİ KATMANLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE İYONLAŞTIRICI RADYASYON ZIRHLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MERVE ŞAHİN

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. HASAN OĞUL

Bu tez çalışmasında, sıcak pres kalıplama yöntemi kullanılarak polilaktik asit (PLA) matrisine mikron parçacık boyutlu tungsten (W) ve molibden (Mo) tozları farklı ağırlıkça oranlarda (%5, %10 ve %20) eklenmiş ve bu katkıların gama ile nötron radyasyonu karşısındaki zırhlama performanslarına etkileri araştırılmıştır. Öncelikle tek katmanlı PLA-W ve PLA-Mo kompozitleri üretilmiş, ardından gama radyasyonu azaltma kapasitesi yüksek olan PLA-W20 ve PLA-Mo20 numuneleri birleştirilerek iki katmanlı hibrit yapı oluşturulmuştur. Üretilen numunelerin gama radyasyonu etkileşim parametreleri, HPGe dedektörü ile yapılan deneysel ölçümler, WinXCOM teorik hesaplamaları ve GEANT4-FLUKA Monte Carlo simülasyonları aracılığıyla değerlendirilmiştir. Nötron etkileşimleri için ise farklı enerji bölgelerinde etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanmış ve GEANT4-FLUKA Monte Carlo simülasyon programları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, katkı oranının artmasıyla kütle azaltma katsayısı ve radyasyon koruma verimliliği değerlerinde belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. En yüksek gama zırhlama etkinliği %20 katkılı numunelerde gözlenmiştir. Ayrıca, katman kalınlığının artışıyla zırhlama performansının iyileştiği ve kalınlığın radyasyonun malzeme içerisindeki azaltılma oranını doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte oluşan ikincil radyasyon sayısında artışta belirlenmiştir. Yıllık etkin doz hesaplamaları sonucunda, geliştirilen iki katmanlı yapıların doz limitlerinin altında kaldığı görülmüştür. Bu bulgular, PLA esaslı kompozitlerin çevre dostu, hafif ve toksik olmayan özellikleriyle literatüre kazandırılacak alternatif malzemeler olduklarını ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: İki katmanlı zırhlama; İyonlaştırıcı radyasyon; Sıcak pres tekniği; Polimer kompozit; İkincil radyasyon

Aralık 2025, 54 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PRODUCTION OF TWO-LAYER COMPOSITES USING HOT PRESS MOLDING TECHNIQUE AND INVESTIGATION OF THEIR IONIZING RADIATION SHIELDING PROPERTIES

MERVE ŞAHİN

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF INTERDISCIPLINARY NUCLEAR ENERGY AND
ENERGY SYSTEMS
SUPERVISOR: PROF. DR. HASAN OĞUL**

In this thesis, micron-sized tungsten (W) and molybdenum (Mo) powders were incorporated into a polylactic acid (PLA) matrix at different weight ratios (5%, 10%, and 20%) using the hot press molding technique, and the effects of these additives on the shielding performance against gamma and neutron radiation were investigated. Initially, single-layer PLA–W and PLA–Mo composites were fabricated, and then a two-layer hybrid structure was formed by combining the PLA–W20 and PLA–Mo20 samples, which exhibited the highest gamma radiation attenuation capacity. The gamma radiation interaction parameters of the produced samples were evaluated through experimental measurements performed with an HPGe detector, theoretical calculations using the WinXCOM software, and Monte Carlo simulations conducted with the GEANT4-FLUKA codes. For neutron interactions, effective neutron removal cross-sections were calculated and GEANT4-FLUKA Monte Carlo simulation programs are used. The results revealed that increasing the additive ratio significantly enhanced the mass attenuation coefficient and radiation protection efficiency. The highest gamma shielding performance was observed in the 20% reinforced samples. Additionally, it was determined that increasing the layer thickness improved the overall shielding performance, as thickness directly affected the attenuation rate of radiation within the material. However, an increase in secondary radiation generation was also observed with increasing thickness. Based on annual effective dose calculations, it was found that the developed two-layer structures remained well below the permissible dose limits. These findings demonstrate that PLA-based composites, with their environmentally friendly, lightweight and non-toxic characteristics, can serve as promising alternative materials for radiation shielding applications.

KEYWORDS:Two-layer shielding; Ionizing radiation; Hot press technique; Polymer composite; Secondary radiation

December 2025, 54 pages

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Prof. Dr. Hasan OĞUL’a lisansüstü eğitim sürecim boyunca göstermiş olduğu destek ve yönlendirmelerinden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmam sürecinde desteklerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Ferdi AKMAN, Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL, Elif Ahsen BAŞTUĞ ve Tunahan Recep TORUN’a teşekkürlerimi sunmak isterim. Ayrıca, tezime vakit ayırarak değerli yorum ve düzeltmeleriyle katkıda bulunan jüri üyeleri Prof. Dr. Ferdi AKMAN ve Doç. Dr. Mehmet Onur KARAAĞAÇ’a minnettarlığımı sunarım.

Merve ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Radyasyonun Tanımı ve Sınıflandırılması	4
2.2. Radyasyonun Sağlık ve Çevre Üzerindeki Etkileri	5
2.3. Radyasyon Zırhlama Kavramı	6
2.4. Polimer Tabanlı Zırhlama Malzemeleri.....	7
2.5. Katkı Malzemeleri: Tungsten ve Molibden	8
2.6. Radyasyon Doz Hesapları ve Malzeme Performans Kriterleri.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Materyal.....	9
3.2. Yöntem	10
3.2.1. Kompozitlerin üretim süreci	10
3.2.2. Radyasyon etkileşimlerinin değerlendirilmesi.....	13
3.2.3. Monte Carlo simülasyonları ve teorik hesaplamalar	16
3.2.4. Yıllık etkin doz hesabı	19
4. BULGULAR.....	21
4.1. Gama Radyasyonu Etkileşim Parametreleri	21
4.2. Nötron Radyasyonu Etkileşim Parametreleri	29
4.3. İki Katmanlı Sistem Analizi	33
4.4. Yıllık Etkin Doz Hesabı.....	37
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	39
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	44

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Gama fotonları ve nötronların madde ile etkileşim mekanizmaları (enerjiye bağlı olarak baskın süreçler).....	5
Tablo 3.1 Ağırlık yüzdesi cinsinden kimyasal bileşimler ve yoğunluk değerleri	11
Tablo 3.2 ICRP-103 tarafından önerilen radyasyon ağırlık faktörü değerleri.....	20
Tablo 4.1 PLA-0 malzemesi için kütle azaltma katsayısı değeri (cm^2/g)	22
Tablo 4.2 Katkılı polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayısı değerleri (cm^2/g)	23
Tablo 4.3 Katkılı polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayısı değerleri (cm^2/g)	24
Tablo 4.4 Üretilen numunelerin etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri.....	30
Tablo 4.5 GEANT4 simülasyonu sonucu farklı nötron enerjilerinde numune üzerinden geçen nötron sayıları ve ikincil radyasyon oluşumları	31
Tablo 4.6 Tek ve iki katmanlı PLA kompozitler için lineer azaltma katsayısı değerleri	33
Tablo 4.7 2 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı.....	37
Tablo 4.8 4 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı.....	38
Tablo 4.9 6 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı.....	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Sıcak pres kalıplama sistemi	11
Şekil 3.2 Matsuhaku MH-300DR elektronik yoğunluk ölçer makinesi	12
Şekil 3.3 Üretilen numunelerin görselleri.....	13
Şekil 3.4 HPGe detektör sistemi.....	14
Şekil 3.5 Çok katmanlı radyasyon zırhlama şeması.	16
Şekil 3.6 XCOM programı ara yüz görseli.....	17
Şekil 3.7 GEANT4 simülasyon programı ara yüz görseli	18
Şekil 3.8 FLUKA'ya entegre edilmiş Flair ara yüzü görseli.....	19
Şekil 4.1 PLA-W serisi için kütle azaltma katsayısı değerlerinin grafik gösterimi.....	26
Şekil 4.2 PLA-Mo serisi için kütle azaltma katsayısı değerlerinin grafik gösterimi.....	26
Şekil 4.3 Lineer azaltma katsayısı, onda-bir kalınlık değeri, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı grafikleri	28
Şekil 4.4 Radyasyon koruma verimliliği grafiği	34
Şekil 4.5 4,5 MeV enerjili nötronların iki katmanlı yapı ile etkileşimi.....	35
Şekil 4.6 Numune kalınlığının etkileşim parametreleri üzerine etkisi: a-) PLA-W20 (1 cm)+PLA-Mo20 (1 cm), b-) PLA-W20 (2 cm)+PLA-Mo20 (2 cm) ve c-) PLA- W20 (3 cm)+PLA-Mo20 (3 cm).....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

PLA	: Polilaktik asit
HPGe	: Yüksek Safılıkta Germanyum
LAC, μ	: Lineer azaltma katsayısı
MAC, μ/ρ	: Kütle azaltma katsayısı
eV	: Elektron volt
MeV	: Milyon elektron volt
OSY	: Ortalama Serbest Yol
RKV	: Radyasyon Koruma Verimliliği
YDK	: Yarı Değer Kalınlığı
ODK	: Onda-bir Değer Kalınlığı
ρ	: Yoğunluk
MC	: Monte Carlo
CH₂Cl₂	: Diklorometan (DCM)

1. GİRİŞ

Radyasyon, doğal ya da yapay kaynaklardan ortaya çıkabilen ve farklı alanlarda çok sayıda yararlı kullanımı bulunan bir olgudur. Temel olarak iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılan radyasyonun kullanım alanları ve etkileri, insan sağlığı ve çevre güvenliği açısından mutlaka kontrol altında tutulmalıdır. Bu nedenle, uzun yıllardır radyasyon kullanımını güvenli bir şekilde sınırlandırmak ve faydalı uygulamalarını sürdürülebilir kılmak amacıyla çeşitli geleneksel radyasyon zırhlama malzemeleri geliştirilmiştir. Ancak, söz konusu malzemeler toksik özellik göstermeleri, yüksek ağırlığa sahip olmaları, esneklikten yoksun bulunmaları ve çoğunlukla yalnızca tek bir radyasyon türüne karşı etkinlik sağlamaları gibi dezavantajlarla öne çıkmaktadır.

Zırhlama malzemesinin seçimi, yalnızca radyasyonun türü ve enerjisine bağlı olmayıp kullanım alanının özellikleri ve çevresel koşullar doğrultusunda da yapılmalıdır. Örneğin tıbbi uygulamalarda hafif, biyouyumlu ve toksik olmayan malzemeler tercih edilirken; nükleer tesislerde yüksek sıcaklık, mekanik dayanım ve uzun süreli stabilite ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, radyasyon zırhlamasında malzeme seçimi çok yönlü bir değerlendirme gerektirmekte ve geliştirilecek kompozit veya hibrit malzemeler bu ihtiyaca cevap verecek şekilde tasarlanmalıdır. Sıklıkla çalışılan malzeme tipleri cam (Al-Buriah vd., 2024; El-Mallawany vd., 2018), beton (Wang vd., 2024; Shi vd., 2024), alaşım (Sayyed vd., 2024; Sarswat vd., 2024) ve polimer (Chang vd., 2015; Ahmed vd., 2020) olarak listelenebilir. Bu malzemeler arasında polimerler düşük yoğunlukları, kolay şekillendirilebilir olmaları ve farklı katkı maddeleri ile fonksiyonel hale getirilebilmeleri sayesinde, özellikle hafif ve esnek zırhlama uygulamalarında dikkat çekici bir alternatif oluşturmaktadır.

Literatürde pek çok çalışma, polimer matrisli radyasyon zırhlama kompozitlerini konu edinmektedir. Velásquez vd. (2024), üç boyutlu yazıcı kullanarak radyoterapi alanında uygulanabilecek tungsten (W) katkılı polilaktik asit (PLA) kompozitler üretmiş ve lineer hızlandırıcıdan yayılan fotonlar karşısında zırhlama performansını değerlendirmiştir. Benzer şekilde, Issa vd. (2023) sol-jel tekniği ile WO_3 tozunu PLA içerisine dâhil etmiş; elde edilen numunelerin radyasyon zırhlama özelliklerini teorik hesaplamalar ve Monte Carlo (MC) simülasyonları ile incelemiştir. Çalışma sonuçları, kompozitlerdeki WO_3 miktarının artmasının, PLA malzemesinin gama ışınlarına karşı zırhlama kabiliyetini

belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Li vd. (2018) ise nano boyutlu bizmut parçacıklarının polimer malzemeye eklenmesi ile X-ışınlarına karşı zırhlama performansını incelemiş ve hafif, düşük maliyetli malzemeler elde ettiklerini bildirmiştir. Prabhu vd. (2022) ise katkı türü, katkı oranı, parçacık boyutu ve foton enerjisi gibi parametrelerin kompozitlerde X-ışını ve gama ışını zırhlamasına etkilerini ayrıntılı biçimde raporlamıştır.

Yüksek atom numarası ve yoğunluğa sahip elementler gama ışınlarının zırhlamasında üstün performans sergilerken, hidrojen gibi hafif elementler hızlı nötronların yavaşlatılmasında ve zırhlamasında ön plana çıkmaktadır (Tasnım vd., 2021). Bu bağlamda, yapılarında yüksek oranda hidrojen bulunduran polimerler hızlı nötron zırhlaması için öne çıkarken, tungsten ve molibden gibi yüksek atom numaralı ve yoğunluklu katkı malzemeleri de gama ışını zırhlama açısından dikkate değer seçenekler arasında yer almaktadır. PLA ($C_3H_4O_2$), biyoyumlu, biyobozunur ve toksik olmayan özellikleri sayesinde özellikle tıbbi uygulamalarda geleneksel zırhlama malzemelerine çevre dostu bir alternatif sunmaktadır (Oğul vd., 2024). Ayrıca kolay işlenebilirliği ve üç boyutlu yazıcılarla üretime uygunluğu, PLA tabanlı kompozitlerin kişiselleştirilmiş ve karmaşık geometrilere sahip zırh elemanlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Oğul vd., 2024). Tungsten, yüksek atom numarası ve yoğunluğu ile foton radyasyonuna karşı etkili bir zırhlama malzemesi iken; molibden, görece daha düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen iyi mekanik özellikleri ve işlenebilirliği ile zırhlamada tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Literatürde, bu iki elementin polimer matrislere katkılanmasıyla kompozitlerin radyasyon zırhlama verimliliğinin arttığını gösteren çalışmalar mevcuttur (Chang vd., 2015; Ahmed vd., 2020; Almurayshid vd., 2021; Oğul vd., 2023). Bu doğrultuda, tez kapsamında PLA matrisli kompozitlerin geliştirilmesinde tungsten ve molibden katkı malzemeleri olarak seçilmiştir.

Tek katmanlı sistemlerin yanı sıra, çok katmanlı radyasyon zırhlama tasarımları da literatürde incelenmiştir. Kim vd. (2020), BiSn/polymer/W kompozit levhalar üretmiş ve katmanlı yapının gama ışınlarını etkin şekilde zırhladığını göstermiştir. Gilys vd. (2022) ise kurşun içermeyen ve kalay, seryum oksit, tungsten oksit ve bizmut katkısı içeren çok katmanlı yapılar geliştirmiş ve katkı miktarlarını ayarlayarak kurşun eşdeğeri X-ışını zırhlaması sağlayan malzemeler elde edilebileceğini raporlamıştır. Hu vd. (2020) polietilen (PE), kurşun ve bor içeren katmanlı yapıları tasarlamış ve hem nötron hem de gama ışınlarına karşı zırhlamada yapının ve bileşenlerin optimize edilebileceğini

göstermiştir. Bu bulgular, tamamlayıcı özellikler sunan iki katmanlı zırhlama tasarımlarının önemini ortaya koymaktadır.

Radyasyon zırhlama çalışmalarında, malzemenin etkinliğini değerlendirmek ve tasarım kriterlerini belirlemek için doz hesapları kritik öneme sahiptir. Yıllık doz hesapları, çalışanların veya çevrenin maruz kalacağı toplam radyasyon miktarını tahmin ederek güvenli sınırların belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede zırhlama malzemelerinin kalınlığı, katman dizilimi ve kompozit yapısı optimize edilebilir; hem malzeme performansı hem de kullanıcı güvenliği sağlanabilmektedir.

Belirtilen tüm bilgiler ışığında, bu tez kapsamında radyasyon zırhlama için tamamlayıcı özellikler sunan iki katmanlı bir yapı tasarlanmıştır: ilk katmanda yüksek atom numarası ve yoğunluğu ile foton radyasyonunu etkin şekilde azaltan tungsten, ikinci katmanda ise iyi mekanik özellikleri ve işlenebilirliği ile bilinen molibden kullanılmıştır. Hidrojen içeriği yüksek PLA ile W ve Mo'nun birleşimi sayesinde, hem foton hem de nötron radyasyonuna karşı verimli ve uygulamaya uygun bir kompozit zırhlama sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen kompozit yapı, radyasyon zırhlama performansı, ikincil radyasyon üretimi ve malzeme hasarı parametreleri açısından değerlendirilmiş; ayrıca yıllık doz hesapları ile çalışan ve çevresel güvenliği de incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tasarlanan iki katmanlı PLA–W/Mo kompozitlerin hem malzeme hem de kullanıcı güvenliği açısından etkin bir zırhlama çözümü sunup sunmadığını ortaya koymaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyasyonun Tanımı ve Sınıflandırılması

Radyasyon, enerjinin parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar şeklinde bir kaynaktan yayılarak uzayda yayılması olarak tanımlanır (Darwin, 1932). Doğal kaynaklardan (kozmetik ışınlar, radyoaktif elementler) veya yapay kaynaklardan (röntgen cihazları, nükleer reaktörler, hızlandırıcılar) radyasyon üretimi olabilirken tıp, endüstri, enerji üretimi gibi birçok alanda radyasyonun yararlı uygulamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, kontrolsüz maruziyet durumunda insan sağlığı ve çevre açısından riskler oluşturması nedeniyle sınıflandırılması ve madde ile etkileşim mekanizmalarının anlaşılması büyük önem taşımaktadır (Goldberg ve Lehnert, 2002).

Genel olarak radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir (Lahir, 2023). İyonlaştırıcı radyasyon, atom ve moleküllerde iyonlaşmaya sebep olabilecek enerjiye sahiptir ve alfa, beta, gama, X-ışınları ile nötronlar bu sınıfa girmektedir. Bu tür radyasyonlar özellikle biyolojik dokularda kalıcı moleküler hasara neden olabilmektedir (Little vd., 2021). İyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise atomları iyonlaştırmaya yetecek kadar enerjiye sahip değildir; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür ışık ve düşük enerjili ultraviyole ışınları bu gruba örnek olarak gösterilebilir (Lahir, 2023).

Bu tez çalışmasında iyonlaştırıcı radyasyon türünden gama ışınları ve nötronlar üzerine odaklanılmıştır. Gama ışınlarının maddeyle etkileşimi üç temel mekanizma üzerinden açıklanmaktadır. Düşük enerjili fotonlarda baskın olan fotoelektrik etki, bir fotonun atomun bir elektronuna enerjisini aktararak bu elektronun kopmasına neden olmasıdır. Orta enerjili fotonlarda daha çok gözlenen Compton saçılması, fotonun enerjisinin bir kısmını serbest veya zayıf bağlı bir elektrona aktarması ve yön değiştirerek yoluna devam etmesiyle gerçekleşir. Yüksek enerjili fotonlarda ise çift oluşumu süreci devreye girmektedir. Fotonun atom çekirdeğinin Coulomb alanında madde ile etkileşerek bir elektron-pozitron çifti üretmesidir. Bahis geçen düşük, orta ve yüksek enerji bölgeleri Tablo 2.1 de özetlenmiştir. Nötronların madde ile etkileşimi ise doğrudan iyonlaştırıcı olmamaları nedeniyle çekirdek reaksiyonları üzerinden gerçekleşmektedir. Düşük enerjili nötronlarda en sık rastlanan mekanizma elastik saçılma olup, nötronun atom çekirdeğine çarpmasıyla enerjisini kısmen çekirdeğe aktarması ve yön değiştirerek yoluna devam

etmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu durumda özellikle hidrojen gibi hafif çekirdekler etkili yavaşlatıcı rol üstlenebilirler. İnelastik saçılma sürecinde ise nötron çekirdeğe çarparak onu uyarılmış hale getirir; çekirdek kısa süre sonra gama ışını yayarak temel haline dönebilmektedir. Ayrıca nötronlar, yakalanma (nötron tutma) reaksiyonları ile çekirdek tarafından absorbe edilebilir; bu durumda çekirdek ya kararlı hale gelir ya da gama ışını, proton veya alfa parçacığı gibi ikincil radyasyonlar açığa çıkmaktadır. İkincil radyasyon bu tezin ana başlıklarından bir tanesidir. Yüksek enerjili nötronlarda ise fisyon olasılığı ortaya çıkar; nötronun ağır bir çekirdeğe çarpması sonucu çekirdeğin ikiye bölünmesi ve beraberinde büyük miktarda enerji, ikincil nötronlar ve gama ışınlarının açığa çıkması söz konusudur. Bu mekanizmalar, zırhlamada uygun malzeme seçiminde de dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 2.1 Gama fotonları ve nötronların madde ile etkileşim mekanizmaları (enerjiye bağlı olarak baskın süreçler) (ICRP, 2007)

Radyasyon türü	Enerji aralığı	Baskın etkileşim mekanizması
Gama ışınları	$< 0,1 \text{ MeV}$	Fotoelektrik etki
	$0,1 - 1 \text{ MeV}$	Compton saçılması
	$> 1,022 \text{ MeV}$	Çift oluşumu
Nötronlar	Termal ($0,025 \text{ eV}$ civarı)	Yakalanma (tutma)
	Yavaş ($\text{eV} - \text{keV}$)	Elastik saçılma
	Orta ($\text{keV} - \text{MeV}$)	İnelastik saçılma
	Hızlı ($> 1 \text{ MeV}$)	Fisyon / ($n,2n$) reaksiyonları

2.2. Radyasyonun Sağlık ve Çevre Üzerindeki Etkileri

Radyasyonun insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri, radyasyon türüne, enerjisine, maruziyet süresine ve doz büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Hücrelerde oluşan etkiler kısa vadede radyasyon yanıkları, hematolojik bozukluklar, bulantı ve bağışıklık sisteminde zayıflama gibi deterministik etkiler şeklinde görülürken; uzun vadede kanser, genetik bozukluklar ve kısırlık gibi stokastik etkiler ortaya çıkabilmektedir (UNSCEAR, 2021). Maruziyetin dozu, süresi ve vücudun hangi bölgesine etki ettiği, biyolojik hasarın boyutunu belirleyen temel faktörlerdir.

Çevresel açıdan bakıldığında, doğal kaynaklardan kaynaklanan radyasyon genellikle düşük dozlu ve sürekli maruziyet şeklinde gerçekleşirken, nükleer tesisler veya kazalar sonucu açığa çıkan yapay radyoizotoplar çok daha ciddi riskler barındırmaktadır. Bu durum, yalnızca insan sağlığını değil, aynı zamanda ekosistemlerin bütünlüğünü ve çevresel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Radyasyonun insan sağlığına ve çevreye

zararlarını en aza indirmek için çeşitli ulusal ve uluslararası düzenlemeler geliştirilmiştir. ICRP tarafından belirlenen doz limitleri çalışanlar için herhangi bir yılda 50 mSv'yi geçmemek koşuluyla, 5 yılın ortalaması 20 mSv/yıl olacak şekilde, toplum için ise yılda 1 mSv olarak önerilmiştir (ICRP, 2007). IAEA güvenlik standartlarında da benzer sınırlar benimsenmiş olup, radyasyon güvenliği uygulamalarında üç temel prensip olan zamanın kısaltılması, mesafenin artırılması ve uygun zırhlama kullanımı ön plandadır. Bu kapsamlı önlemler sayesinde hem çalışanların hem de toplumun radyasyondan korunması, hem de çevresel güvenliğin sağlanması mümkün olmaktadır.

2.3. Radyasyon Zırhlama Kavramı

Daha önce de belirtildiği gibi radyasyon güvenliği uygulamalarında üç temel prensip bulunmaktadır: zamanın kısaltılması, mesafenin artırılması ve uygun zırhlama kullanımı. Radyasyonun sağlık ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için başvuru en önemli yöntemlerden biri zırhlama. Zırhlama, radyasyonun şiddetini azaltmak veya tamamen engellemek amacıyla radyasyon kaynağı ile maruz kalan kişi veya ortam arasına uygun malzemelerin yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Radyasyon zırhlamasının başarısını belirleyen başlıca faktörlerden biri malzemenin yoğunluğudur. Yüksek yoğunluklu malzemeler, foton radyasyonu için daha fazla azaltma olanağı sunarak gama ışınlarının ve X-ışınlarının nüfuz etmesini zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte atom numarası da kritik bir parametredir; yüksek atom numarasına sahip elementler fotoelektrik etki ve Compton saçılması gibi süreçlerde daha yüksek etkileşim olasılığına sahiptir. Bu nedenle kurşun, tungsten, molibden ve bizmut gibi elementler uzun yıllardır gama ve X-ışınlarının zırhlamasında tercih edilmektedir. Malzemenin kalınlığı da zırhlama performansında doğrudan etkili olup, artan kalınlık ile radyasyonun şiddeti üstel biçimde azalmaktadır. Ancak kalınlık artışı beraberinde ağır ve hacimli yapılar getirdiğinden, mühendislik uygulamalarında optimum dengeyi sağlayacak çözümler aranmaktadır.

Nötron radyasyonu için ise farklı parametreler ön plana çıkmaktadır. Nötronlar doğrudan iyonlaşma oluşturmaz, bunun yerine atom çekirdekleriyle saçılma veya yakalama süreçleri yoluyla enerjilerini kaybederler. Bu nedenle hidrojen bakımından zengin malzemeler, elastik saçılma yoluyla nötronların etkin bir şekilde yavaşlatılmasını sağlar. Polimerler, içeriklerindeki hidrojen oranı sayesinde nötron zırhlamasında sıkça kullanılmaktadır. Ek olarak, bor ve kadmiyum gibi elementler yüksek nötron tutma tesir

kesitine sahip oldukları için hidrojen içeriği yüksek malzemelerle birlikte kullanıldığında nötron zırhlamasında tamamlayıcı rol oynayabilmektedirler.

Sonuç olarak radyasyon zırhlamasında etkinlik, yoğunluk, atom numarası, kalınlık ve katkı içeriği gibi fiziksel parametrelerin yanı sıra, uygulama alanına uygun malzeme seçimiyle sağlanabilmektedir. Bu nedenle günümüzde farklı özellikleri bir araya getiren kompozit ve çok katmanlı zırhlama sistemleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

2.4. Polimer Tabanlı Zırhlama Malzemeleri

Polimerler, uzun zincirli makromoleküllerden oluşan ve fiziksel ile kimyasal özellikleri geniş bir yelpazede değişiklik gösterebilen malzemelerdir (Gandini ve Lacerda, 2021). Düşük yoğunlukları, kolay şekillendirilebilir olmaları, mekanik esneklikleri ve farklı katkı maddeleri ile fonksiyonel hale getirilebilmeleri nedeniyle polimerler, birçok endüstriyel ve teknolojik uygulamada tercih edilmektedir (Wang vd., 2023). Öte yandan polimerler tek başlarına foton radyasyonuna (X-ışını ve gama ışınları) karşı yeterince etkin değildir. Ancak yüksek atom numaralı katkılar ile birleştirildiklerinde, polimer matrisli kompozitler hem nötron hem de foton zırhlamasında kullanılabilen çok yönlü çözümler haline gelme kabiliyetleri bulunmaktadır. Bu yönüyle polimerler, hafiflik ve esneklik gibi avantajlarını korurken aynı zamanda yüksek yoğunluklu katkılar sayesinde foton radyasyonuna karşı da verimlilik kazanabilmektedirler.

Polimer tabanlı zırhlama çalışmalarında öne çıkan malzemelerden biri polilaktik asit olmuştur. PLA, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bir polimer türüdür. Kimyasal yapısı $C_3H_4O_2$ birimine dayanan PLA, ester bağları üzerinden tekrarlayan laktid monomerlerinden oluşmaktadır. Termoplastik özellik göstermesi sayesinde kolaylıkla eritilip şekillendirilebilir (Villadiego vd., 2022) ve üç boyutlu yazıcılarla üretime uygunluğu ile kişiselleştirilmiş zırh tasarımlarına olanak sağlayabilmektedir. PLA'nın biyouyumlu ve biyobozunur olması, insan vücudu ile etkileşime girdiğinde toksik etki göstermemesi ve kontrollü bir şekilde doğal bileşenlere ayrışabilmesi açısından önemlidir (Raj vd., 2023). PLA'nın termal ve mekanik özellikleri de zırhlama uygulamaları açısından değerlidir. PLA'nın erime sıcaklığı yaklaşık 150-160 °C ve yoğunluğu 1,24 g/cm³ olarak bilinmektedir (Ambrus vd., 2021). Mekanik özellikler açısından PLA'nın çekme dayanımı 50-70 MPa, elastisite modülü 3,5-4 GPa aralığında olup, bu değerler termoplastik polimerler arasında oldukça yüksek sayılabilir (Agalotis

vd., 2022). Bu özellikler, PLA'yı hem işlenebilir hem de mekanik açıdan dayanıklı bir zırh matrisi olarak kullanılabilir kılmaktadır.

2.5. Katkı Malzemeleri: Tungsten ve Molibden

Tungsten ve molibden, polimer tabanlı radyasyon zırhlama kompozitlerinde katkı malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Tungsten, atom numarası 74 ve yoğunluğu $19,25 \text{ g/cm}^3$ olan yüksek yoğunluklu bir metaldir. Bu özellikleri sayesinde özellikle yüksek enerjili foton ve X-ışınlarının zırhlanmasında son derece etkilidir. Yüksek erime noktası ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$) ve kimyasal stabilitesi, tungstenin hem yüksek sıcaklık uygulamalarında hem de uzun süreli radyasyon maruziyetinde etkinliğini korumasına olanak sağlamaktadır. Molibden ise atom numarası 42 ve yoğunluğu $10,28 \text{ g/cm}^3$ olan orta yoğunluklu bir metaldir. Tungstene kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen, yüksek mekanik dayanımı ve işlenebilirliği ile polimer matrisli kompozitlerde tamamlayıcı bir rol üstlenebilmektedir. Her iki metal de polimer matrisler ile birleştirildiğinde, zırhlama kompozitleri hem foton hem de nötron radyasyonu karşısında yüksek performans sergileyebilir. Literatürde, PLA ve diğer polimer matrislere tungsten ve molibden katkısı eklenerek geliştirilmiş kompozitlerin, foton radyasyonuna karşı yüksek etkinlik ve yapısal stabilite sağladığı rapor edilmiştir.

2.6. Radyasyon Doz Hesapları ve Malzeme Performans Kriterleri

Radyasyon zırhlama çalışmalarında malzemenin etkinliğini değerlendirmek için doz hesapları kritik bir öneme sahiptir. Doz, birim kütle başına radyasyon enerjisi birikimini ifade eder ve biyolojik etkilerin yanı sıra malzeme üzerindeki yapısal değişikliklerin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Uluslararası birim sistemi (SI) kapsamında doz, gray (Gy) birimi ile ifade edilir; 1 Gy, 1 kilogram kütleyle 1 joule enerji aktarımı anlamına gelmektedir.

Bu kapsamda, radyasyon zırhlama tasarımında yıllık doz hesapları büyük önem taşımaktadır. Bu hesaplar, zırhlama altında kalan çalışanların veya çevrenin maruz kalacağı toplam radyasyon miktarını tahmin ederek güvenli sınırların belirlenmesine yardımcı olabilmektedir. Yıllık dozlar, ICRP ve IAEA tarafından önerilen limitler ile karşılaştırılarak malzeme kalınlığı, katman dizilimi ve kompozit yapı optimizasyonu yapılmaktadır. Böylece hem malzeme performansı artırılarak hem de kullanıcı ve çevre güvenliği sağlanabilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, PLA polimerine tungsten (W) ve molibden (Mo) tozları katkılanarak iki katmanlı radyasyon zırlama malzemelerinin üretilmesi ve elde edilen malzemelerin radyasyon etkileşimleri açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kullanılan malzemeler ve izlenen yöntemler bu bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Materyal

Bu çalışmada matris malzeme olarak polilaktik asit kullanılmıştır. PLA, granül formunda ve beyaz renkte olup Türkiye’de faaliyet gösteren Filameon firmasından temin edilmiştir. Yaklaşık 150–180 °C erime sıcaklığına sahip olan PLA, biyobozunur yapısı, kolay işlenebilirliği ve çevre dostu özellikleri nedeniyle polimer matris olarak tercih edilmiştir.

Organik çözücü olarak metilen klorid (diklorometan, DCM, CH_2Cl_2) kullanılmıştır. Çözücü, polimerin homojen bir şekilde çözünmesini sağlayarak katkı malzemeleri ile etkin bir karışım elde edilmesine imkân tanımıştır. Metilen klorid, Türkiye’de faaliyet gösteren Apeks Grup A.Ş.’den temin edilmiş olup, firma tarafından %99 saflıkta olduğu belirtilmiştir. Uçucu bir çözücü olan metilen klorid, oda sıcaklığında toksik buharlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle kullanım sırasında uygun havalandırma sağlanmış ve kişisel koruyucu donanımlar ile çalışılmıştır.

Katkı malzemeleri olarak mikron parçacık boyutunda tungsten ve molibden tozları kullanılmıştır. Bu metaller, yüksek atom numarası ve yoğunlukları sayesinde iyonlaştırıcı radyasyonun azaltılmasında etkili olup kurşun gibi toksik malzemelere alternatif olarak ele alınmıştır. Tungsten ve molibden tozları, Türkiye’de faaliyet gösteren Nanografi firmasından temin edilmiştir. Firma tarafından sağlanan verilere göre, tungsten tozlarının parçacık boyutu 2 μm , molibden tozlarının ise 1-5 μm aralığında olup, her iki katkı malzemesinin saflık dereceleri %99,95’tir. Tungsten siyah renkte ve 3422 °C erime sıcaklığına sahip iken molibden siyah renkte olup 2623 °C erime sıcaklığına sahiptir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Kompozitlerin üretim süreci

PLA kompozitlerini üretme işlemi 5 ayrı basamakta gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemeyi üretmek için bir çözelti işleme tekniği kullanılmıştır:

1. İlk olarak, PLA granülleri metilen klorid içinde çözülme işlemine tabii tutulmuştur (Örnekleme için 100 g PLA granülüne 200 mL metilen klorid ilave edilmiştir). 2 saat boyunca PLA granüllerinin çözülmesi beklenmiştir. Beklerken çözücü olan metilen klorid uçmaması için çözelti kapalı bir beher içinde tutulmuştur. Bekledikten sonra homojenliği sağlamak için mekanik karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılmıştır. Metilen klorid seçilmesinin sebebi PLA, polar yapılı bir polimerdir. Metilen klorid ise orta derecede polar bir çözücüdür ve PLA'yı kolaylıkla çözebilecek uygun Hildebrand çözünürlük parametrelerine sahiptir. Bu nedenle PLA'yı hızlı ve verimli şekilde oda sıcaklığında kısa sürede çözebilmektedir. Uçucu olduğu için çözücü sonradan kolayca uzaklaşmaktadır. Bu çözücünün dezavantajı toksik olmasıdır.
2. Çözeltiye katkı malzemesi karıştırılır ve partikülleri eşit şekilde dağıtmak için mekanik karıştırmaya tabi tutulmuştur.
3. Toz ve kirden temizlenmiş tepsiler kalıp ayırıcı vaks ile vakslanmıştır. Bu işlemin amacı kuruyan karışımın kolay çıkarılması motivasyonuna dayanmaktadır. İnce bir şekilde kıvamlanmış çözelti tepsiye yayılmıştır.
4. Daha sonra, kurutulmuş kompozit, tepside alınıp ve granül haline getirilmiştir. Herhangi bir kalıntı çözücü bırakmamak için 50 °C'de ekstra 30 dakika kurutma işlemine tabi tutulmuştur.
5. Son basamakta Şekil 3.1'de gösterilen sistem sayesinde sıcak pres kalıplama tekniği ile eritilen kompozitler kalıplar içerisine aktarılmıştır.



Şekil 3.1 Sıcak pres kalıplama sistemi

Ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 katkı oranları belirlenmiştir. Bu oranlar katkı miktarı değiştikçe zırhlama karakteristiklerindeki değişim eğilimi görmek için seçilmiştir. Numuneler içerdiği katkı ve katkı oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin, PLA-W10 ismi PLA matrisine ağırlıkça %10 tungsten katılan numuneye verilmiştir. Tablo 3.1’de tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin elemental içerikleri, teorik yoğunlukları ve deneysel yoğunlukları sunulmuştur.

Tablo 3.1 Ağırlık yüzdesi cinsinden kimyasal bileşimler ve yoğunluk değerleri

Numune Kodu	C	O	H	W	Mo	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)
PLA-0	0,5000	0,4440	0,0560	-	-	1,2500	1,2500
PLA-W5	0,4760	0,4230	0,0530	0,0480	-	1,3080	1,3070
PLA-W10	0,4550	0,4040	0,0510	0,0900	-	1,3660	1,3730
PLA-W20	0,4170	0,3700	0,0470	0,1670	-	1,4810	1,4720
PLA-Mo5	0,4760	0,4230	0,0530	-	0,0480	1,3050	1,2900
PLA-Mo10	0,4550	0,4040	0,0510	-	0,0910	1,3590	1,3250
PLA-Mo20	0,4170	0,3700	0,0470	-	0,1670	1,4640	1,4320

Tablo 3.1’de belirtilen deneysel yoğunluklar MatsuHaku MH-300DR elektronik yoğunluk ölçer makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ölçerin görseli Şekil 3.2’de sunulmuştur. Kompozitlerin teorik yoğunluk değerleri, karışım kuralı (rule of mixtures) esas alınarak hesaplanmıştır. Bu yöntemde, her bir bileşenin ağırlıkça oranı (w_i) ve yoğunluğu (ρ_i) dikkate alınarak kompozitlerin yoğunlukları denklem (3.1) ile elde edilmiştir.

$$\frac{1}{\rho_{teorik}} = \sum \frac{w_i}{\rho_i} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2 MatsuHaku MH-300DR elektronik yoğunluk ölçer makinesi

Üretilen numunelerin görselleri ise Şekil 3.3 de sunulmaktadır. Saf PLA numunesi de tez çalışması kapsamında üretilerek referans olarak sunulmuştur. Daha sonra tungsten ve Mo numuneler içerisinde en yüksek gamma zırhlama kabiliyetine sahip olan %20 katkılı numuneler birleştirilerek iki katmanlı yapı oluşturulmuş ve radyasyon zırhlama analizleri yeni üretilen katmanlı yapı içinde gerçekleştirilmiştir.



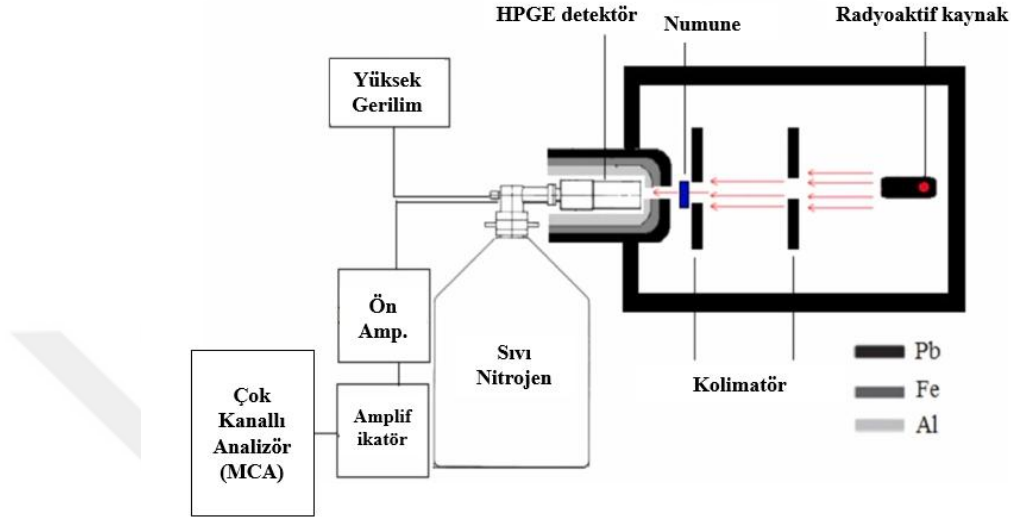
Şekil 3.3 Üretilen numunelerin görselleri

3.2.2. Radyasyon etkileşimlerinin değerlendirilmesi

Katkı maddeleri ile takviye edilmiş numuneler, gama radyasyonunu zayıflatma yeteneklerinin değerlendirilmesi amacıyla farklı radyoaktif nokta kaynakları kullanılarak test edilmiştir: ^{241}Am (59,5 keV), ^{133}Ba (80,9, 276,3, 302,8, 356,0 ve 383,8 keV), ^{137}Cs (661,6 keV), ^{22}Na (511,0 ve 1274,5 keV) ve ^{60}Co (1173,2 ve 1332,5 keV). Bu testler, deneysel olarak HPGe detektör sistemi ile, teorik olarak WinXCOM yazılımı ile ve simülasyon yöntemleri olarak FLUKA ve GEANT4 ile gerçekleştirilmiştir. Giresun Üniversitesi Fizik Bölümünün sahip olduğu HPGe detektörü kullanılarak üretilen numunelerin gama radyasyonu zırlama kabiliyetleri değerlendirilmiş ve raporlanmıştır. Çalışmada kullanılan HPGe detektörü, 70 mm kristal çapına ve 25 mm aktif kalınlığa sahiptir. Detektörün enerji çözünürlükleri; 5,9 keV için 380 eV, 122 keV için 585 eV ve 1330 keV için 1,8 keV olarak üretici tarafından garanti edilmiştir. Deneysel geometride yer alan kolimatörlerden bazıları, gelen fotonları kolime etmek amacıyla kullanılırken, diğerleri temel (arka plan) sayımı minimize etmek amacıyla, çevresel radyasyonu zırlamak için yerleştirilmiştir. Her bir radyoaktif kaynakla yapılan ölçüm süresi, ilgili enerji pikinin altında en az 10.000 sayım elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece,

istatistiksel belirsizliğin yaklaşık %1'in altında tutulması hedeflenmiştir. Deney düzeneğine ait şematik görsel Şekil 3.4'te sunulmuştur.

Şekil 3.4 HPGe detektör sistemi



PLA esaslı kompozit malzemelerin gama radyasyonuna karşı zırhlama performansları kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Radyasyonla etkileşim süreçlerinin anlaşılabilmesi ve zırhlama kabiliyetinin nicel olarak ortaya konulabilmesi için öncelikle temel teorik parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler arasında özellikle lineer azaltma katsayısı (LAC, μ) ve kütle azaltma katsayısı (MAC, μ/ρ) kritik bir öneme sahiptir. Lineer azaltma katsayısı, bir foton demetinin malzeme içerisindeki etkileşimler sonucunda ne ölçüde azaldığını ifade ederken; kütle azaltma katsayısı, aynı büyüklüğü yoğunluktan bağımsız bir bakış açısıyla değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Böylece farklı yoğunluklara sahip malzemelerin gama radyasyonuna karşı performansları daha sağlıklı bir biçimde karşılaştırılabilmektedir. Bu parametreler aşağıdaki Denklem (3.2) aracılığıyla ifade edilmektedir:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.2)$$

Burada I , malzemedan geçtikten sonra ölçülen radyasyon şiddetini; I_0 , malzemeye yönlendirilen başlangıç radyasyon şiddetini; x ise malzemenin kalınlığını temsil etmektedir. I ve I_0 değerleri HPGe detektöründen elde edildikten sonra μ katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen μ değerinin malzemenin yoğunluğuna

oranlanmasıyla μ/ρ parametresi elde edilmiştir. μ parametresinin birimi cm^{-1} iken, μ/ρ parametresi cm^2/g cinsinden ifade edilmektedir.

Buna ek olarak, radyasyonun malzeme ile etkileşimlerini daha ayrıntılı değerlendirebilmek için yarı değer kalınlığı (YDK), onda-bir değer kalınlığı (ODK) ve ortalama serbest yol (OSY) gibi türevsel parametreler de hesaplanmıştır. Bu parametrelerin tamamı cm birimi cinsinden ifade edilmektedir. Yarı değer kalınlığı, radyasyon şiddetinin yarıya inmesi için gerekli kalınlığı; onda-bir değer kalınlığı, şiddetin onda bir düşmesi için gerekli kalınlığı; ortalama serbest yol ise fotonların malzeme içinde etkileşime girmeden önce kat ettiği ortalama mesafeyi tanımlamaktadır. İlgili matematiksel ifadeler Denklem (3.3)'de verilmektedir:

$$\text{YDK} = \frac{\ln 2}{\mu}; \text{ODK} = \frac{\ln 10}{\mu}; \text{OSY} = \frac{1}{\mu} \quad (3.3)$$

Ayrıca, zırlama etkinliğinin pratik bir göstergesi olarak Radyasyon Koruma Verimi (RKV) de hesaplanmıştır. RKV, giriş ve çıkış radyasyon şiddetleri arasındaki azalma oranını ifade eder ve yüzde olarak Denklem (3.4)'teki gibi ifade edilmektedir:

$$\text{RKV} = (1 - e^{-\mu x}) \cdot 100 \quad (3.4)$$

Bu parametreler, yalnızca temel bir gösterge olmakla kalmayıp, aynı zamanda farklı kompozitlerin karşılaştırılmasında standart bir ölçüt sunabilmektedir. PLA tabanlı kompozitlerin değerlendirilmesi sürecinde bu parametrelerin incelenmesi hem malzemenin yapısal özellikleri hem de radyasyon etkileşim mekanizmaları hakkında daha kapsamlı bir bakış açısı sağlamaktadır.

Gama etkileşim parametrelerinin incelenmesinin ardından, tez kapsamında nötron etkileşim parametreleri detaylı olarak ele alınmıştır. Her bir malzemenin hızlı nötronları uzaklaştırma kapasitesi, etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) ile tanımlanmakta olup üretilen kompozit malzemeler için Σ_R hesaplamaları Denklem (3.5) ve (3.6) takip edilerek yapılmıştır. Daha sonra MC simülasyonları kullanılarak farklı nötron enerjilerinde (0.025

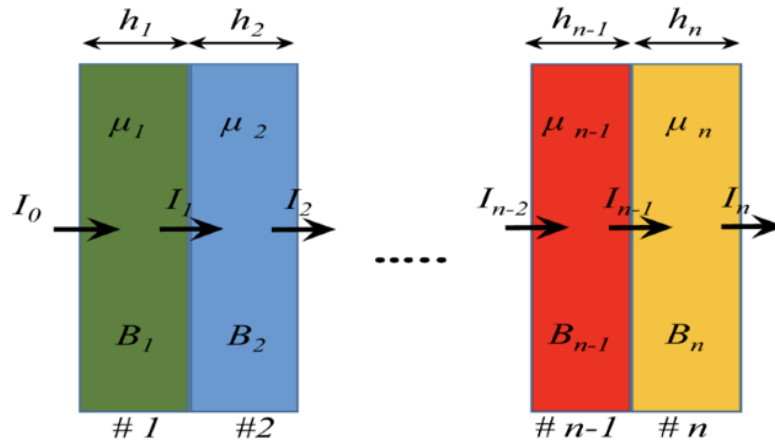
eV, 100 eV ve 4,5 MeV) malzemelerden geçen nötron sayıları ve ikincil radyasyon miktarları nicel olarak değerlendirilmiştir.

$$\Sigma_R = \sum \rho_i (\Sigma_{R/\rho})_i \quad (3.5)$$

$$\Sigma_{R/\rho} = \sum w_i (\Sigma_{R/\rho})_i \quad (3.6)$$

Burada ρ_i , i. bileşenin yoğunluğunu; w_i , i. elementin ağırlık fraksiyonunu göstermektedir.

İki katmanlı numunelerin zırlama parametrelerini hesaplayabilmek için Daneshar vd. (2021) tarafından yayınlanan çalışma dikkate alınmıştır. Şekil 3.5 en genel haliyle çok katmanlı radyasyon zırlama şemasını göstermektedir. Denklem (3.7) ise bu tez çalışması kapsamında ele alınan iki katmanlı sistem için lineer azaltma katsayısının belirlenmesine olanak sunmaktadır.



Şekil 3.5 Çok katmanlı radyasyon zırlama şeması (Daneshar ve ark., 2021)

$$\mu_{\text{tüm sistem}} \cdot x_{\text{tüm sistem}} = \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 \quad (3.7)$$

Burada $\mu_{\text{tüm sistem}}$ iki katmanlı malzemenin lineer azaltma katsayısını ifade ederken $x_{\text{tüm sistem}}$ iki katmanın oluşturduğu kalınlığa karşılık gelmektedir.

3.2.3. Monte Carlo simülasyonları ve teorik hesaplamalar

Bu tez çalışması kapsamında Monte Carlo simülasyonları (GEANT4 ve FLUKA) ile teorik hesaplama aracı (WinXCOM) kullanılmıştır. Monte Carlo tabanlı simülasyon paketleri, özellikle radyasyonun madde ile etkileşimini incelemek amacıyla geliştirilen güçlü araçlardır. GEANT4 (Geant4 Collaboration, 2003) ve FLUKA (Böhlen vd., 2014), foton ve nötronların soğurulması, saçılması ve ikincil parçacık üretimi gibi karmaşık süreçlerin modellenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Her iki program, hem

temel araştırmalarda hem de tıbbi fizik, nükleer mühendislik ve radyasyon güvenliği uygulamalarında güvenilir sonuçlar sunmaktadır.

Burada vurgulanması gereken nokta, deneysel yöntemin yalnızca gama etkileşim parametrelerinin elde edilmesinde uygulanmış olmasıdır. Deneysel ölçümlerde kullanılan gama ışını enerji seviyeleri, simülasyonlarda da aynı şekilde seçilmiş olup, böylece deneysel ve hesaplamalı sonuçların doğrudan karşılaştırılması mümkün olmuştur. Nötron etkileşimlerinde ise farklı enerji bölgelerini temsil etmek amacıyla termal nötronlar için 0,025 eV, epitermal bölgeye karşılık gelen nötronlar için 100 eV ve hızlı nötronlar için 4,5 MeV enerji değerleri seçilmiştir. Bu sayede düşük, orta ve yüksek enerjili nötronların etkileşim süreçleri ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçların geniş bir enerji spektrumunu kapsaması sağlanmıştır.

Teorik değerlendirmeler kapsamında, gama ışınlarının maddeyle etkileşim parametrelerini hızlı ve pratik biçimde hesaplamak için WinXCOM yazılımı kullanılmıştır. WinXCOM, XCOM (Gerward vd., 2004) veri tabanına dayalı bir program olup, foton soğurma, saçılma ve toplam tesir kesitler gibi temel etkileşim parametrelerini enerjiye bağlı olarak hesaplama olanağı sunmaktadır. XCOM ara yüzüne ait görsel Şekil 3.6 da sunulmuştur. Nötronlar için teorik değerlendirme ise etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitinin hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir.

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:
H2O 0.9
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

Optional output title:

Graph options:

- ☐ Total Attenuation with Coherent Scattering
- ☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
- ☐ Coherent Scattering
- ☐ Incoherent Scattering
- ☐ Photoelectric Absorption
- ☐ Pair Production in Nuclear Field
- ☐ Pair Production in Electron Field
- ☒ None

Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

Include the standard grid

Energy Range:

Minimum: 0.001 MeV

Maximum: 100000 MeV

Submit Information Reset

Şekil 3.6 XCOM programı ara yüz görseli

Simülasyon ve teorik araçlarda, fotonların numune içerisindeki etkileşimlerine bağlı olarak lineer azaltma katsayısı, kütle azaltma katsayısı, yarı değer kalınlığı, onda-bir

değer kalınlığı ve ortalama serbest yol değerleri deneysel ölçümlerle uyumlu şekilde hesaplanmıştır. Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve numune üzerinden geçen nötron sayıları GEANT4 ve FLUKA kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca daha detaylı etkileşim parametrelerini incelemek amacıyla, nötron etkileşimleri sonucunda oluşan ikincil radyasyon da değerlendirilmiştir. Bu kapsamda GEANT4/Hadr03 örnek paketi kullanılarak ikincil nötronların ve gama ışınlarının ortalama enerjileri ile sayıları elde edilmiştir. Böylece hem birincil hem de ikincil parçacık katkıları dikkate alınarak toplam etkileşim karakteristiği daha kapsamlı bir biçimde ortaya konmuştur. Şekil 3.7 GEANT4 simülasyon programına ait ara yüz görselini sunmaktadır.

```

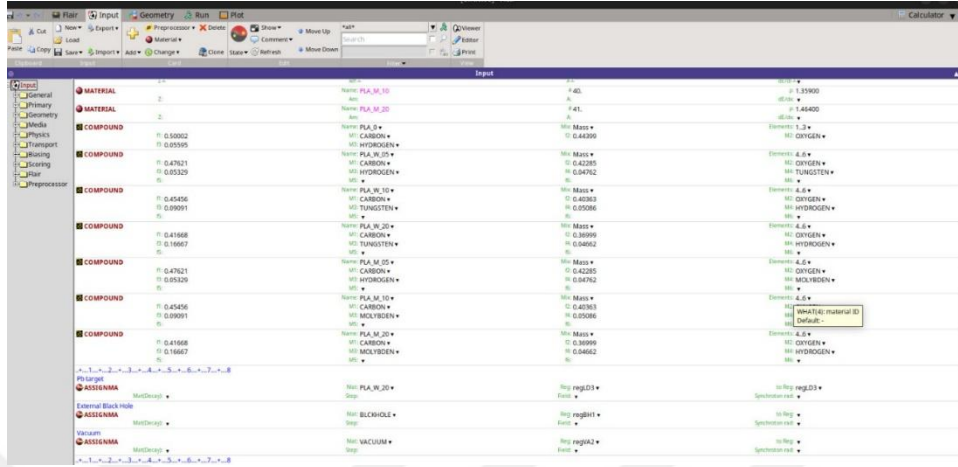
200 PLA_0->AddElement(H, fractionmass=5.595 * perCent);
201
202 G4Material* PLA_W_05 = new G4Material("PLA_W_05", density= 1.308 * g / cm3, ncomponents=4);
203 PLA_W_05->AddElement(C, fractionmass=47.621 * perCent);
204 PLA_W_05->AddElement(O, fractionmass=42.285 * perCent);
205 PLA_W_05->AddElement(H, fractionmass=5.329 * perCent);
206 PLA_W_05->AddElement(W, fractionmass=4.762 * perCent);
207
208 G4Material* PLA_W_10 = new G4Material("PLA_W_10", density= 1.366 * g / cm3, ncomponents=4);
209 PLA_W_10->AddElement(C, fractionmass=45.456 * perCent);
210 PLA_W_10->AddElement(O, fractionmass=40.363 * perCent);
211 PLA_W_10->AddElement(W, fractionmass=9.091 * perCent);
212 PLA_W_10->AddElement(H, fractionmass=5.086 * perCent);
213
214 G4Material* PLA_W_20 = new G4Material("PLA_W_20", density= 1.481 * g / cm3, ncomponents=4);
215 PLA_W_20->AddElement(C, fractionmass=41.668 * perCent);
216 PLA_W_20->AddElement(O, fractionmass=36.999 * perCent);
217 PLA_W_20->AddElement(W, fractionmass=16.667 * perCent);
218 PLA_W_20->AddElement(H, fractionmass=4.662 * perCent);
219
220 G4Material* PLA_M_05 = new G4Material("PLA_M_05", density= 1.305 * g / cm3, ncomponents=4);
221 PLA_M_05->AddElement(C, fractionmass=47.621 * perCent);
222 PLA_M_05->AddElement(O, fractionmass=42.285 * perCent);
223 PLA_M_05->AddElement(H, fractionmass=5.329 * perCent);
224 PLA_M_05->AddElement(Mo, fractionmass=4.762 * perCent);
225
226 G4Material* PLA_M_10 = new G4Material("PLA_M_10", density= 1.359 * g / cm3, ncomponents=4);
227 PLA_M_10->AddElement(C, fractionmass=45.456 * perCent);
228 PLA_M_10->AddElement(O, fractionmass=40.363 * perCent);
229 PLA_M_10->AddElement(Mo, fractionmass=9.091 * perCent);
230 PLA_M_10->AddElement(H, fractionmass=5.086 * perCent);
231
232 G4Material* PLA_M_20 = new G4Material("PLA_M_20", density= 1.464 * g / cm3, ncomponents=4);
233 PLA_M_20->AddElement(C, fractionmass=41.668 * perCent);
234 PLA_M_20->AddElement(O, fractionmass=36.999 * perCent);
235 PLA_M_20->AddElement(Mo, fractionmass=16.667 * perCent);
236 PLA_M_20->AddElement(H, fractionmass=4.662 * perCent);

```

Şekil 3.7 GEANT4 simülasyon programı ara yüz görseli

GEANT4 için Ubuntu işletim sistemine sahip bir bilgisayarın terminal ekranı kullanılırken FLUKA simülasyonları Flair ara yüzü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir simülasyonda, deneysel koşulları yansıtacak şekilde seçilen enerji seviyelerinde 10^7 adet mono enerjik foton veya nötron numune üzerine gönderilmiştir. GEANT4 ortamında, detektör hacmi içerisindeki ikincil parçacıkların bıraktığı enerji G4PSEnergyDeposit sınıfı kullanılarak hesaplanmıştır. FLUKA tarafında ise her numune ayrı ayrı modellenmiş; radyasyon kaynağı BEAM kartı ile foton veya nötron olarak tanımlanmış, kaynak konumu BEAM-POS komutuyla belirlenmiştir. Numune geometrileri GEOBEGIN kartı ile oluşturulmuş, malzeme bileşenleri ve yoğunlukları MATERIAL ve

COMPOUND kartları ile tanımlanmıştır. Numune üzerinden geçen foton veya nötron sayısının belirlenmesi için ise USRBDX kartı kullanılmıştır. Şekil 3.8 FLUKA'ya entegre edilmiş Flair ara yüzü görseli sunulmuştur



Şekil 3.8 FLUKA'ya entegre edilmiş Flair ara yüzü görseli

3.2.4. Yıllık etkin doz hesabı

Uluslararası düzenlemeler, radyasyon çalışanları için yıllık doz sınırları belirlemektedir; bu sınır genellikle 50 mSv civarındadır. Bu çalışmada iki katmanlı malzeme üzerine yalnızca nötronlar dikkate alınmıştır. Toplam absorbe edilen enerji (E_{top}) birim zamanda, dokuya ulaşan nötron sayısı (N) ile tek bir nötronun enerjisi (E_n) çarpılarak hesaplanmaktadır. Matematiksel tanımı Denklem (3.8) ile verilmektedir:

$$E_{top} = N \cdot E_n \quad (3.8)$$

Absorbe edilen doz hızı ($\dot{D}$) ise bu enerjinin doku kütlesine (m) bölünmesiyle bulunmaktadır. Denklem (3.9) absorbe edilen doz hızı formülünü sunmaktadır:

$$\dot{D} = \frac{E_{top}}{m} \quad (3.9)$$

1 kg doku varsayımı altında $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ilişkisi kullanılabilmektedir. Eşdeğer doz hızı ($\dot{H}$), absorbe edilen doz hızı ile enerjiye bağlı radyasyon ağırlık faktörü (w_R) çarpılarak hesaplanabilmektedir denklem (3.10):

$$\dot{H} = w_R \dot{D} \quad (3.10)$$

Uluslararası Radyolojik Koruma Komitesi (ICRP), 2007 yılında yayımladığı ICRP-103 yayını ile radyasyon dozlarının hesaplanmasında kullanılan radyasyon ağırlık faktörlerini güncelleştirilmiştir. Tablo 3.2 ICRP-103 (2007) tarafından önerilen değerleri özetlemektedir.

Bu faktörler, farklı radyasyon türlerinin biyolojik etkilerini yansıtmak amacıyla kullanılmakta ve eşdeğer doz (H_t) hesaplamasında önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 3.2 ICRP-103 (2007) tarafından önerilen radyasyon ağırlık faktörü değerleri

Radyasyon Türü	w_R Değeri
X-ışınları, gama ışınları, beta parçacıkları, müonlar	1
Nötronlar ($E < 1$ MeV)	$2,5 + 18,2e^{-[\ln(E)]^2/6}$
Nötronlar ($1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV}$)	$5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E)]^2/6}$
Nötronlar ($E > 50 \text{ MeV}$)	$2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E)]^2/6}$
Protonlar, yüklü pilyonlar	2
Alfa parçacıkları, nükleer fisyon ürünleri, ağır çekirdekler	20

Yıllık etkin doz (H_{yillik}), eşdeğer doz hızının yıllık çalışma süresi (t_{yillik}) ile çarpılmasıyla elde edilebilmektedir Denklem (3.11):

$$H_{\text{yillik}} = \dot{H} \cdot t_{\text{yillik}} \quad (3.11)$$

Burada standart bir radyasyon çalışanı için yıllık çalışma süresi yaklaşık 2.000 saat olarak alınmaktadır. 2000 saatin saniye birimine dönüştürülerek formüle yazılması gerekmektedir. Bu prosedür, farklı nötron enerjileri için uygulanabilir ve ikincil gama veya nötron katkıları dikkate alınarak zırh konfigürasyonunun optimize edilmesine olanak sağlayabilmektedir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmada üretilen PLA-W ve PLA-Mo kompozitlerinin radyasyon zırhlama performansına ilişkin deneysel ve simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Radyasyon etkileşim parametrelerinin yanı sıra, elde edilen veriler, materyallerin birincil ve ikincil radyasyon katkıları dikkate alınarak yıllık etkin doz hesaplamalarını değerlendirmek amacıyla sistematik olarak analiz edilmiştir. Bulgular, tek ve iki katmanlı zırhlama yapılarına göre karşılaştırmalı olarak sunulmakta ve önerilen kompozitlerin etkinliği ile mevcut literatürdeki benzer çalışmalarla uyumu tartışılmaktadır. Numune kalınlığının etkisinin ikincil radyasyon oluşuma ve doz hesaplamalarına katkısı da değerlendirilmiştir. Bu sayede, materyal seçiminin ve katman düzenlemesinin radyasyon zırhlama performansına katkısı açık bir şekilde ortaya konulmaktadır.

4.1. Gama Radyasyonu Etkileşim Parametreleri

Tez çalışması kapsamında, gama radyasyonu etkileşim parametreleri olarak değerlendirilen ilk parametre kütle azaltma katsayısıdır. Bu parametre HPGe detektörü, WinXCOM kodu, GEANT4 ve FLUKA MC simülasyonları kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 4.1’de referans malzememiz olan PLA malzemesine ait sonuçlar sunulmakta iken Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te Mo ve W katkılı numuneler için kütle azaltma katsayıları verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen kütle azaltma katsayıları ile WinXCOM, GEANT4 ve FLUKA sonuçları arasında genel olarak iyi bir uyum gözlenmiştir. Bununla birlikte, özellikle düşük enerji bölgelerinde bazı noktalarda deneysel veriler ile teorik/simülasyon sonuçları arasındaki farkın yaklaşık %6 seviyelerine kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Bu tür farklılıklar, numune yoğunluğu ve katkı malzemesinin homojen dağılımındaki sapmalar, ölçüm geometrisi ve detektör kalibrasyonu gibi deneysel belirsizliklerden kaynaklanabilmektedir. Bundan dolayı, deney sonuçlarına ait belirsizlikler ilgili tablolarda ayrıca sunulmuştur. Ayrıca, tungsten katkılı kompozitlerde düşük enerjilerde gözlenen belirgin artış (piklenme), tungstenin yaklaşık 69,5 keV olan K-kenarı enerjisi civarında fotoelektrik etkileşimlerin baskın hale gelmesinden kaynaklanmaktadır. Katkılı PLA kompozitlerinde ise özellikle düşük enerjilerde μ/ρ değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. W katkısının düşük enerjilerde PLA’nın zırhlama kapasitesini anlamlı derecede artırdığı, ancak enerji yükseldikçe bu etkinin azalarak Compton saçılmasının baskın hale geldiği görülmektedir.

Tablo 4.1 PLA-0 malzemesi için kütle azaltma katsayısı değeri (cm²/g)

Enerji (keV)	PLA-0			
	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	0,1943±0,0039	0,1912	0,1897	0,1922
80,9	0,1676±0,0035	0,1717	0,1653	0,1719
276,3	0,1218±0,0032	0,1161	0,1154	0,1162
302,8	0,1135±0,0027	0,1123	0,1118	0,1120
356,0	0,1064±0,0022	0,1055	0,1054	0,1055
383,8	0,1042±0,0027	0,1025	0,1026	0,1027
511,0	0,0934±0,0022	0,0912	0,0918	0,0909
661,6	0,0841±0,0017	0,0815	0,0822	0,0811
1173,2	0,0617±0,0014	0,0621	0,0622	0,0621
1274,5	0,0585±0,0017	0,0595	0,0596	0,0591
1332,5	0,0565±0,0012	0,0581	0,0582	0,0579

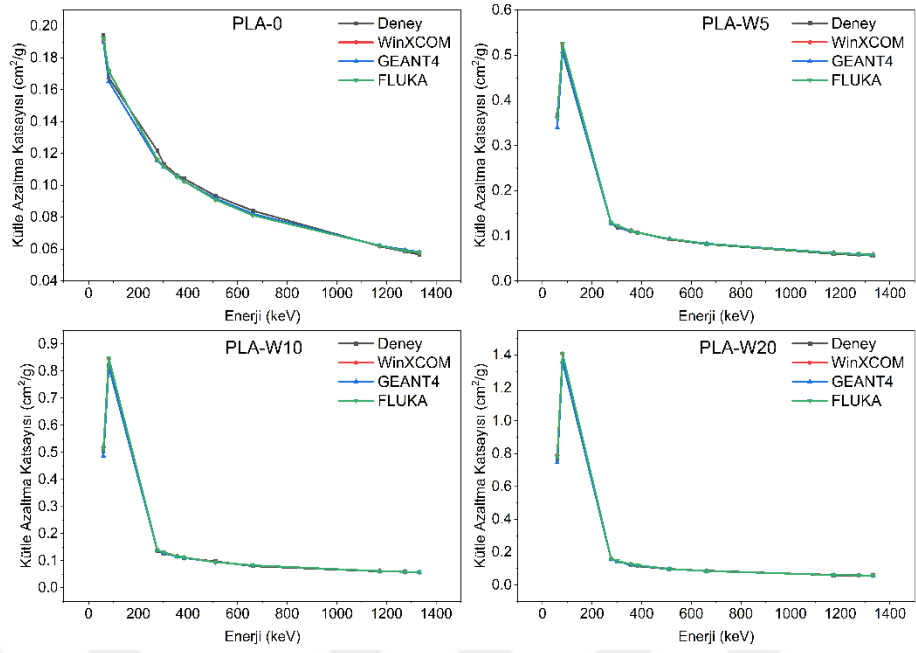
Tablo 4.2 Katkılı polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayısı değerleri (cm²/g)

Enerji (keV)	PLA-W5				PLA-W10				PLA-W20			
	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	0,3681 ±0,0074	0,3628	0,3397	0,3607	0,5045 ±0,0102	0,5187	0,4869	0,5132	0,7679 ±0,0156	0,7916	0,7452	0,7803
80,9	0,5187 ±0,0108	0,5249	0,5073	0,5262	0,8216 ±0,0173	0,8460	0,8170	0,8491	1,3626 ±0,0297	1,4080	1,3601	1,4111
276,3	0,1277 ±0,0033	0,1288	0,1271	0,1287	0,1373 ±0,0036	0,1403	0,1377	0,1399	0,1576 ±0,0042	0,1605	0,1559	0,1606
302,8	0,1182 ±0,0028	0,1220	0,1207	0,1223	0,1266 ±0,0030	0,1310	0,1288	0,1306	0,1465 ±0,0035	0,1465	0,1426	0,1461
356,0	0,1100 ±0,0023	0,1117	0,1108	0,1113	0,1166 ±0,0024	0,1173	0,1157	0,1172	0,1199 ±0,0025	0,1271	0,1244	0,1270
383,8	0,1070 ±0,0028	0,1074	0,1068	0,1069	0,1104 ±0,0029	0,1119	0,1106	0,1115	0,1143 ±0,0031	0,1197	0,1175	0,1200
511,0	0,0918 ±0,0022	0,0932	0,0933	0,0933	0,0976 ±0,0024	0,0951	0,0948	0,0949	0,0964 ±0,0023	0,0983	0,0974	0,0979
661,6	0,0816 ±0,0017	0,0823	0,0827	0,0822	0,0797 ±0,0016	0,0830	0,0832	0,0830	0,0869 ±0,0018	0,0842	0,0841	0,0840
1173,2	0,0601 ±0,0014	0,0619	0,0620	0,0615	0,0610 ±0,0014	0,0617	0,0617	0,0618	0,0594 ±0,0013	0,0614	0,0613	0,0611
1274,5	0,0573 ±0,0016	0,0593	0,0595	0,0590	0,0592 ±0,0018	0,0591	0,0592	0,0587	0,0565 ±0,0016	0,0587	0,0587	0,0587
1332,5	0,0564 ±0,0012	0,0579	0,0580	0,0577	0,0567 ±0,0012	0,0577	0,0578	0,0570	0,0589 ±0,0013	0,0574	0,0573	0,0577

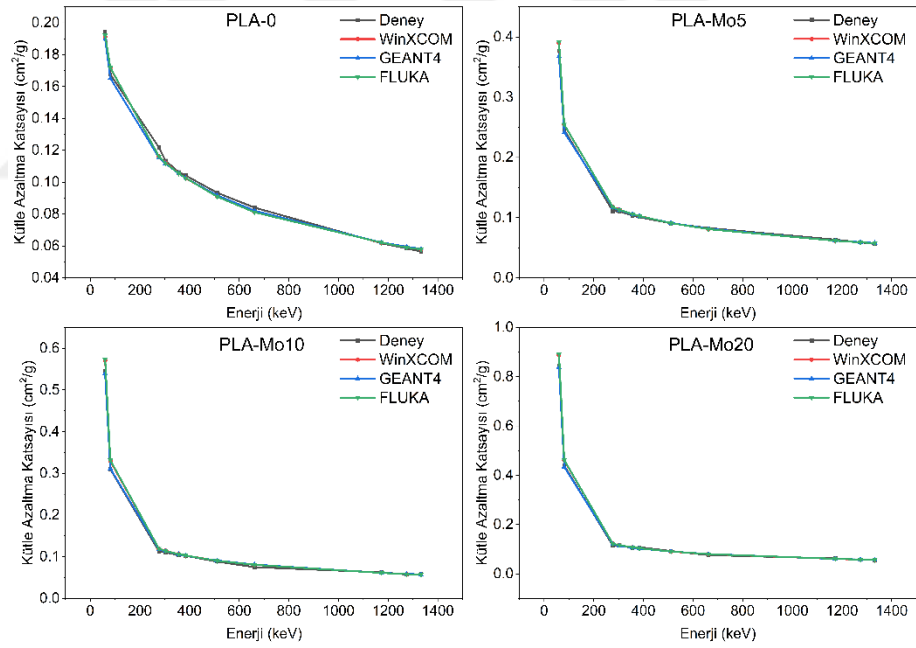
Tablo 4.3 Katkılı polimer kompozitlerin kütle azaltma katsayısı değerleri (cm²/g)

Enerji (keV)	PLA-Mo5				PLA-Mo10				PLA-Mo20			
	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA	Deney	WinXCOM	GEANT4	FLUKA
59,5	0,3766 ±0,0076	0,3903	0,3681	0,3916	0,5451 ±0,0111	0,5713	0,5393	0,5735	0,8442 ±0,0172	0,8881	0,8384	0,8907
80,9	0,2456 ±0,0051	0,2542	0,2418	0,2547	0,3100 ±0,0064	0,3293	0,3114	0,3316	0,4392 ±0,0091	0,4606	0,4340	0,4620
276,3	0,1108 ±0,0029	0,1178	0,1167	0,1178	0,1131 ±0,0029	0,1193	0,1178	0,1196	0,1141 ±0,0030	0,1220	0,1196	0,1220
302,8	0,1105 ±0,0026	0,1134	0,1126	0,1131	0,1105 ±0,0026	0,1145	0,1132	0,1139	0,1150 ±0,0027	0,1163	0,1144	0,1164
356,0	0,1033 ±0,0021	0,1060	0,1057	0,1061	0,1039 ±0,0021	0,1065	0,1058	0,1060	0,1049 ±0,0022	0,1073	0,1061	0,1075
383,8	0,1009 ±0,0026	0,1028	0,1026	0,1026	0,1025 ±0,0027	0,1030	0,1026	0,1030	0,1082 ±0,0029	0,1035	0,1026	0,1035
511,0	0,0906 ±0,00322	0,0910	0,0913	0,0909	0,0883 ±0,0021	0,0908	0,0911	0,0905	0,0925 ±0,0022	0,0905	0,0905	0,0907
661,6	0,0828 ±0,0017	0,0811	0,0817	0,0809	0,0753 ±0,0015	0,0808	0,0814	0,0807	0,0762 ±0,0016	0,0802	0,0806	0,0799
1173,2	0,0636 ±0,0014	0,0616	0,0618	0,0617	0,0625 ±0,0014	0,0613	0,0614	0,0613	0,0625 ±0,0014	0,0606	0,0606	0,0608
1274,5	0,0589 ±0,0017	0,0591	0,0593	0,0589	0,0576 ±0,0017	0,0587	0,0589	0,0585	0,0571 ±0,0016	0,0581	0,0582	0,0578
1332,5	0,0565 ±0,0012	0,0577	0,0579	0,0575	0,0583 ±0,0013	0,0574	0,0576	0,0573	0,0563 ±0,0012	0,0568	0,0569	0,0568

Şekil 4.1 ve 4.2 ise elde edilen sayısal verilerin görselleştirilmiş halini sunmaktadır. Elde edilen bulgulara göre, PLA tabanlı katkılı kompozitlerde kütle azaltma katsayısının enerji ve katkı oranına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Düşük enerji bölgesinde (≤ 100 keV), fotoelektrik etkileşimler baskın olup, tungsten ve molibden katkılı kompozitlerde μ/ρ değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Örneğin 59,5 keV’de katkısız PLA için μ/ρ 0,1912 cm²/g iken, PLA-W5, PLA-W10 ve PLA-W20’de sırasıyla 0,3628, 0,5187 ve 0,7916 cm²/g değerleri elde edilmiştir; bu durum katkı arttıkça kütle azaltma katsayısının PLA-0’a göre yaklaşık %105-314 oranında yükseldiğini göstermektedir. Benzer şekilde, PLA-Mo5, PLA-Mo10 ve PLA-Mo20’de 59,5 keV’de μ/ρ değerleri sırasıyla 0,3903, 0,5713 ve 0,8881 cm²/g olup, katkı artışına bağlı olarak PLA-0’a göre %104–364 arasında bir yükselme sergilemektedir. Orta enerji bölgesinde (100 keV–1 MeV) Compton saçılma baskın hale gelirken, katkı oranı arttıkça μ/ρ değerlerinde hâlâ yükselme gözlenmektedir ancak düşük enerji bölgesindeki kadar keskin değildir. Örneğin 276,3 keV’de PLA-W20 ve PLA-Mo20 için μ/ρ değerleri sırasıyla 0,1605 ve 0,1606 cm²/g olup, katkısız PLA’ya göre yaklaşık %30-31 artış sağlamaktadır. Bu durum, Compton saçılmasının atom numarasına bağımlılığının fotoelektrik etkileşim kadar güçlü olmamasından kaynaklanmaktadır. Yüksek enerji bölgesinde (≥ 1 MeV) ise tüm numunelerde μ/ρ değerleri birbirine yaklaşmakta ve katkının etkisi sınırlı kalmaktadır. Genel olarak, katkı malzemesinin miktarı arttıkça düşük ve orta enerjili fotonların malzeme ile etkileşiminin belirgin biçimde yükseldiğini, yüksek enerjilerde ise etkinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

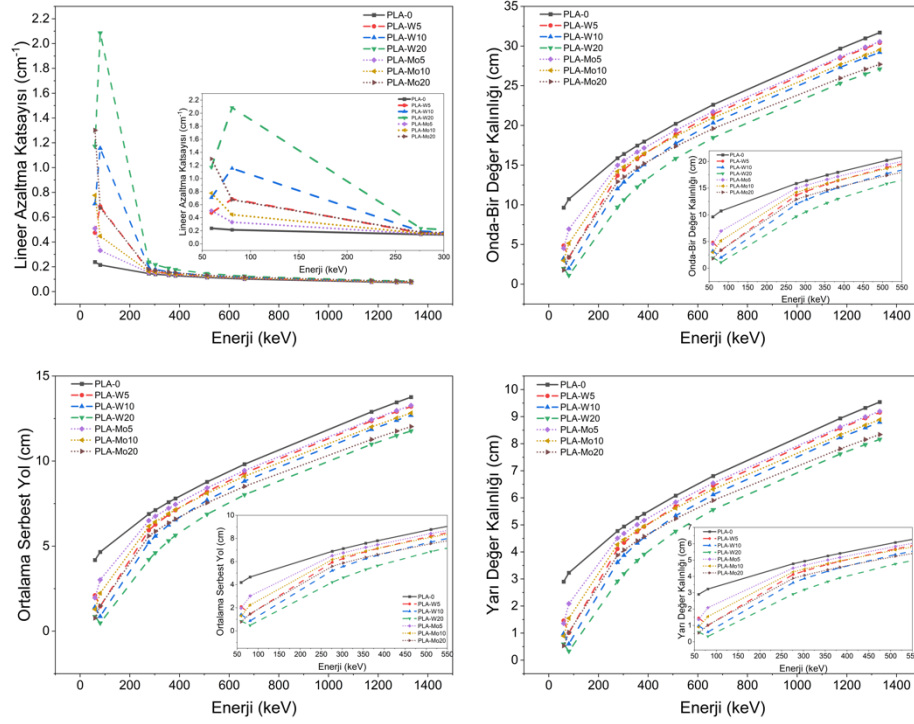


Şekil 4.1 PLA-W serisi için kütle azaltma katsayısı değerlerinin grafik gösterimi



Şekil 4.2 PLA-Mo serisi için kütle azaltma katsayısı değerlerinin grafik gösterimi

Kütle azaltma katsayısına ek olarak lineer azaltma katsayısı, yarı değer kalınlığı, onda-bir değer kalınlığı ve ortalama serbest yol parametreleri de değerlendirilmiştir. Şekil 4.3 elde edilen verilere dayanarak bu dört parametrenin görsel olarak kıyaslamasını sunmaktadır. Çalışmada incelenen numuneler arasında saf PLA referans olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar katkı yapılan numuneler ile kıyaslanmıştır. Saf PLA numunesi, gama fotonlarına karşı en düşük lineer azaltma katsayısı değerlerini göstermiş ve buna bağlı olarak yarı değer kalınlığı ve onda-bir değer kalınlığı en yüksek seviyelerde çıkmıştır. Bu durum, saf PLA'nın radyasyon zırlama açısından sınırlı bir performans sunduğunu ve aynı zayıflatmayı sağlamak için daha kalın tabakalara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. PLA'ya tungsten katkısı yapıldığında LAC değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle düşük enerji bölgesinde W katkısının etkisi daha güçlü olmuş, bu da tungstenin yüksek atom numarası nedeniyle fotoelektrik soğurmayı önemli ölçüde artırmasından kaynaklanmıştır. Katkı oranı arttıkça bu iyileşme daha da belirgin hale gelmiş, %20 W katkılı PLA numunesi en yüksek LAC değerlerini ve en düşük YDK ile ODK değerlerini sergileyerek gama radyasyonu zayıflatmada en başarılı performansı göstermiştir. Tungsten katkılı numunelerde ortalama serbest yol değerlerinin saf PLA'ya göre önemli ölçüde azaldığı görülmüş, bu da fotonların malzeme içinde daha kısa mesafelerde etkileşime girdiğini ve zırlama etkinliğinin arttığını ortaya koymuştur. Molibden katkılı PLA numunelerinde de saf PLA'ya kıyasla belirgin bir iyileşme sağlanmış olmakla birlikte, molibdenin atom numarasının ve yoğunluğunun tungsteninkiler kadar yüksek olmaması nedeniyle bu artışlar daha sınırlı kalmıştır. Düşük enerji bölgesinde LAC değerleri yükselmiş, YDK ve ODK değerleri azalmış, OSY değerleri ise kısalmıştır; ancak tüm katkı oranlarında molibden numuneleri, eşdeğer tungsten numunelerinin performansına ulaşamamıştır. Genel olarak katkı oranı arttıkça tüm parametrelerde iyileşme eğilimi devam etmiş, saf PLA en düşük zırlama etkinliğini gösterirken W katkılı PLA numuneleri en yüksek performansı sağlamıştır. Sonuçlar, yüksek atom numaralı katkıların PLA polimerinin radyasyon azaltma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını ve özellikle tungsten katkısının gama radyasyonu zırlama açısından en uygun seçenek olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.3 Lineer azaltma katsayısı, onda-bir değer kalınlığı, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı grafikleri

Enerji arttıkça tüm numunelerde lineer azaltma katsayısı değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük enerjilerde fotoelektrik etkinin atom numarasına güçlü bağımlılığına karşın, enerji yükseldikçe Compton saçılmasının baskın hale gelmesiyle açıklanabilir. LAC değerlerindeki düşüş, fotonların malzeme içindeki etkileşim olasılığının enerjiye bağlı olarak azaldığını göstermektedir. Düşük enerjilerde fotonlar malzeme ile daha sık etkileşime girerken, enerji yükseldikçe etkileşim olasılığı azalmaktadır. Ortalama serbest yol parametresi de enerji arttıkça artış göstermektedir; bu da fotonların etkileşim olmadan kat ettiği mesafenin uzadığını işaret etmektedir. Yüksek atom numaralı katkılar, enerji artışının etkileşim olasılığı üzerindeki düşürücü etkisini kısmen dengeleyerek malzemelerin etkileşim kapasitesini korumaktadır.

4.2. Nötron Radyasyonu Etkileşim Parametreleri

Nötron radyasyonun malzeme ile etkileşimini değerlendirebilmek için teorik hesaplamalar ve MC simülasyon teknikleri kullanılmıştır. Bunlardan ilki teorik olarak hesaplanan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitinin belirlenmesidir. Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak tez çalışması kapsamında üretilen bütün numunelerin tesir kesitleri hesaplanmıştır. Tablo 4.4 elde edilen bulguları sunmaktadır. Farklı oranlarda tungsten ve molibden katkıları içeren PLA kompozitlerinin nötron etkileşimleri, PLA-0 ile toplam etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti üzerinden karşılaştırılmıştır. PLA-0'ın Σ_R değeri $0,0957 \text{ cm}^{-1}$ iken, W katkılı numunelerde Σ_R sırasıyla $0,0960 \text{ cm}^{-1}$ (PLA-W5), $0,0964 \text{ cm}^{-1}$ (PLA-W10) ve $0,0972 \text{ cm}^{-1}$ (PLA-W20) olarak artış göstermiştir. Molibden katkılı numunelerde de benzer bir eğilim görülmüş olup, Σ_R değerleri PLA-Mo5'te $0,0961 \text{ cm}^{-1}$, PLA-Mo10'da $0,0964 \text{ cm}^{-1}$ ve PLA-Mo20'de $0,0971 \text{ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sayısal karşılaştırma, katkı miktarı arttıkça malzemenin toplam etkin nötron uzaklaştırma kapasitesinin hafifçe yükseldiğini ve katkıların nötron etkileşimini kısmen güçlendirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, hidrojenin hâlâ en baskın etkileşim elementi olması nedeniyle artış sınırlı kalmaktadır. Sonuç olarak, PLA tabanlı kompozitlerde hem katkı türü hem de miktarının nötron etkileşim karakteri üzerinde doğrudan etkili olduğunu net bir biçimde göstermektedir.

Tablo 4.4 Üretilen numunelerin etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri

Numune Kodu		C	O	H	W	Mo	Toplam
PLA-0	Kütle Fraksiyonu	0,50002	0,44399	0,05599	0	0	
	Kısmi Yoğunluk	0,625025	0,554988	0,069988	0	0	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,031376	0,022477	0,041853	0	0	0,0957
PLA-W5	Kütle Fraksiyonu	0,47621	0,42285	0,05329	0,04762	0	
	Kısmi Yoğunluk	0,622883	0,553088	0,069703	0,062287	0	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,031269	0,0224	0,041683	0,000685	0	0,0960
PLA-W10	Kütle Fraksiyonu	0,45456	0,40363	0,05086	0,09091	0	
	Kısmi Yoğunluk	0,620929	0,551359	0,069475	0,124183	0	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,031171	0,02233	0,041546	0,001366	0	0,0964
PLA-W20	Kütle Fraksiyonu	0,41668	0,36999	0,04662	0,16667	0	
	Kısmi Yoğunluk	0,617103	0,547955	0,069044	0,246838	0	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,030979	0,022192	0,041288	0,002715	0	0,0972
PLA-Mo5	Kütle Fraksiyonu	0,47621	0,42285	0,05329	0	0,04762	
	Kısmi Yoğunluk	0,621454	0,551819	0,069543	0	0,062144	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,031197	0,022349	0,041587	0	0,000938	0,0961
PLA-Mo10	Kütle Fraksiyonu	0,45456	0,40363	0,05086	0	0,09091	
	Kısmi Yoğunluk	0,617747	0,548533	0,069119	0	0,123547	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,031011	0,022216	0,041333	0	0,001866	0,0964
PLA-Mo20	Kütle Fraksiyonu	0,41668	0,36999	0,04662	0	0,16667	
	Kısmi Yoğunluk	0,61002	0,541665	0,068252	0	0,244005	
	Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti (cm^{-1})	0,030623	0,021937	0,040815	0	0,003684	0,0971

Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, en yüksek hızlı nötron zırhlama performansına sahip malzemeler PLA-W20 ve PLA-Mo20 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, gama radyasyonu etkileşim parametreleri incelendiğinde de bu iki malzemenin en iyi gama ışını zırhlama özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, tezin bundan sonraki aşamalarında analizler bu iki kompozit malzeme üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu kapsamda, Monte Carlo tabanlı simülasyonlar kullanılarak 1 cm kalınlığındaki bu malzemeler için 4,5 MeV, 100 eV ve 0,025 eV enerjilerindeki nötronlarla olan etkileşimler detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda, numunelerden geçen nötron sayıları ile bu etkileşimler sırasında oluşan ikincil radyasyon (gama ve nötron) miktarları belirlenmiştir. Tablo 4.5 elde edilen bulguları özetlemektedir. GEANT4 simülasyon programı ile elde edilen nötron geçiş sonuçları FLUKA programı aracılığıyla doğrulanmış ve iki yöntem arasında maksimum yaklaşık %7 oranında bir fark gözlemlenmiştir. Bu farkın kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu ve her iki yazılımın da birbirini destekleyen tutarlı sonuçlar ürettiği değerlendirilmiştir.

Tablo 4.5 GEANT4 simülasyonu sonucu farklı nötron enerjilerinde numune üzerinden geçen nötron sayıları ve ikincil radyasyon oluşumları

Termal Nötronlar (0,025 eV)			
PLA-W20 (1 cm)		PLA-Mo20 (1 cm)	
Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı	Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı
10 000 000	3 345 975	10 000 000	3 408 034
İkincil foton sayısı	1 160 215	İkincil foton sayısı	1 036 753
İkincil fotonların ortalama enerji	670,58 keV	İkincil fotonların ortalama enerji	452,76 keV
İkincil nötron sayısı	0	İkincil nötron sayısı	0
İkincil nötronların ortalama enerjisi	-	İkincil nötronların ortalama enerjisi	-
Epitermal Nötronlar (100 eV)			
Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı	Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı
10 000 000	3 328 563	10 000 000	3 468 141
İkincil foton sayısı	89 862	İkincil foton sayısı	17 612
İkincil fotonların ortalama enerji	1,69 MeV	İkincil fotonların ortalama enerji	324,18 keV
İkincil nötron sayısı	0	İkincil nötron sayısı	0
İkincil nötronların ortalama enerjisi	-	İkincil nötronların ortalama enerjisi	-
Hızlı Nötronlar (4,5 MeV)			
Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı	Gönderilen nötron sayısı	Geçen nötron sayısı
10000000	8 527 071	10 000 000	8 532 253
İkincil foton sayısı	60 618	İkincil foton sayısı	30 040
İkincil fotonların ortalama enerji	865,57 keV	İkincil fotonların ortalama enerji	1,17 MeV
İkincil nötron sayısı	20 955	İkincil nötron sayısı	29 079
İkincil nötronların ortalama enerjisi	1,46 MeV	İkincil nötronların ortalama enerjisi	1,36 MeV

PLA-W20 ve PLA-Mo20 numuneleriyle gerçekleştirilen nötron etkileşimi simülasyonları, nötron enerjisi arttıkça her iki malzemenin geçirgenlik ve ikincil radyasyon üretim davranışlarında belirgin değişimler ortaya koymuştur. Termal nötronlar için yapılan hesaplamalarda, gönderilen 10^7 nötrondan yaklaşık %33,46'sının W katkılı ve %34,08'inin Mo katkılı numuneden geçtiği görülmektedir. Ayrıca, termal bölgede tungsten katkılı numune, daha fazla ikincil foton üretmiştir ($1,16 \cdot 10^6$ foton), ancak bu fotonların ortalama enerjisi 670,6 keV civarındadır; Mo katkılı numunede ise foton sayısı daha az ($1,03 \cdot 10^6$) olmasına karşın ortalama enerji 452,8 keV olarak bulunmuştur. Her iki numunede de termal nötron etkileşimleri sonucunda ikincil nötron oluşumu gözlenmemiştir.

Epitermal nötronlar bölgesinde, tungsten katkılı PLA'nın geçirgenliği %33,29, molibden katkılı PLA'nın ise %34,68 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, düşük enerji bölgesine göre nötron zırhlama oranının biraz azaldığını göstermektedir. W katkılı numunede $8,99 \cdot 10^4$ ikincil foton üretilirken, Mo katkılı numunede bu değer $1,76 \cdot 10^4$ 'e düşmüştür. Ancak tungsten katkılı malzeme tarafından yayılan ikincil fotonların ortalama enerjisi 1,69 MeV olup, Mo katkılı örnekteki 324 keV değerine kıyasla oldukça yüksektir. Bu fark, tungstenin epitermal nötron etkileşimlerinde (özellikle (n,γ) reaksiyonları sonucunda) yüksek enerjili gama emisyonlarına neden olma eğilimini açıkça ortaya koymaktadır.

Hızlı nötron bölgesinde her iki numunede de nötron geçiş oranı yaklaşık %85 seviyesine yükselmiş, yani yüksek enerjili nötronların zırhlaması belirgin biçimde azalmıştır. Bununla birlikte, tungsten katkılı numune 60.618 ikincil foton üretirken, molibden katkılı numunede bu sayı 30.040 olarak kaydedilmiştir. Burada tungstenin hem ikincil foton sayısı hem de etkileşim yoğunluğu bakımından daha aktif olduğu görülmektedir. Buna karşın ikincil fotonların ortalama enerjisi Mo katkılı numunede biraz daha yüksek (1,17 MeV) olup, tungsten numunesinde 865,6 keV olarak bulunmuştur; bu fark hızlı nötronların tungsten içinde daha sık, ancak görece düşük enerjili ikincil foton üretimiyle sonuçlandığını göstermektedir. Ayrıca, hızlı nötron etkileşimlerinde ikincil nötron üretimi gözlemlenmiş ve tungsten katkılı numunede 20.955, molibden katkılı numunede 29.079 ikincil nötron tespit edilmiştir. Ortalama ikincil nötron enerjileri de birbirine yakın olup, sırasıyla 1,46 MeV (W) ve 1,36 MeV (Mo) olarak belirlenmiştir.

4.3. İki Katmanlı Sistem Analizi

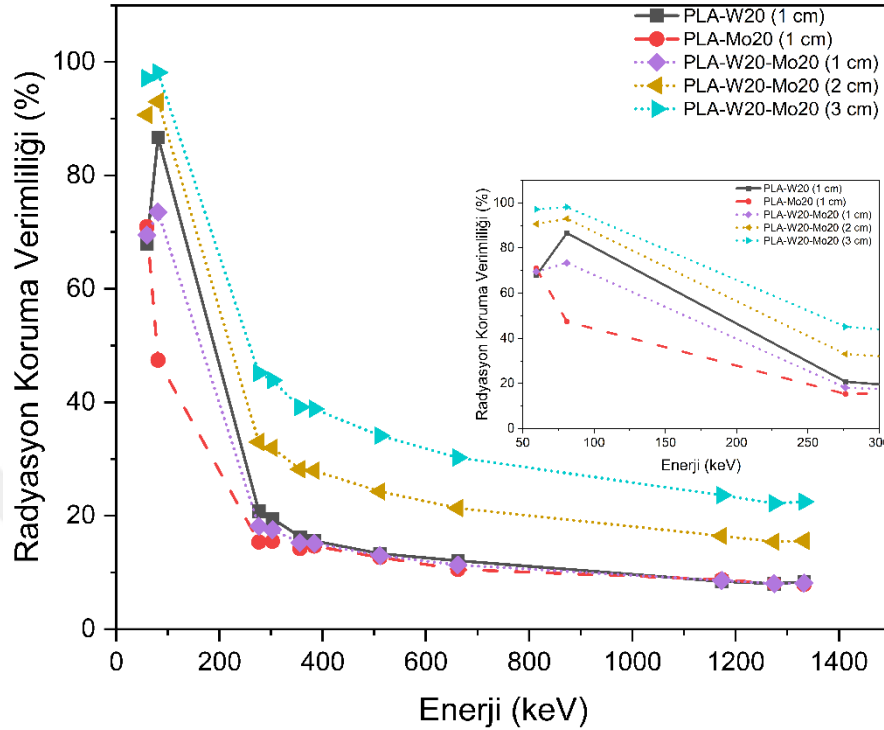
Bu tez kapsamında, sıcak presleme yöntemi kullanılarak PLA matrisine tungsten ve molibden mikron boyutlu tozları farklı ağırlıkça oranlarda (%5, %10 ve %20) ilave edilerek kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler gama radyasyonu zırhlama performansları açısından değerlendirilmiş ve en yüksek etkinin %20 katkılı numunelerde elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, iki katmanlı hibrit kompozit yapılar geliştirilmiş; birinci katman W katkılı, ikinci katman ise Mo katkılı PLA esaslı numunelerden oluşturulmuştur. Denklem 3.6 kullanılarak iki katmanlı sistemin farklı gama ışını enerjilerinde lineer azaltma katsayısı değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.6 Tek ve iki katmanlı PLA kompozitler için lineer azaltma katsayısı değerleri

Enerji (keV)	PLA-W20	PLA-Mo20	PLA-W20-Mo20
59,5	1,1372	1,2359	1,1866
80,9	2,0180	0,6430	1,3305
276,3	0,2335	0,1671	0,2003
302,8	0,2169	0,1683	0,1926
356	0,1776	0,1536	0,1656
383,8	0,1693	0,1584	0,1638
511	0,1428	0,1355	0,1391
661,6	0,1287	0,1115	0,1201
1173,2	0,0880	0,0915	0,0898
1274,5	0,0837	0,0836	0,0836
1332,5	0,0872	0,0824	0,0848

Elde edilen bu değerler kullanılarak, her bir enerji seviyesinde ele alınan kompozit malzemelerin radyasyon koruma verimliliği Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular ile Şekil 4.4 hazırlanmıştır. Enerji arttıkça tek katmanlı numunelerin gama radyasyonu koruma verimliliği azalmış ve özellikle 1 MeV üzeri radyasyon için tek katmanların koruma etkinliği %10–15 civarında kalmıştır. Tek katmanlı numunelerin verimliliklerinin sınırlı olması, daha yüksek kalınlık ve katman sayısına yönlendirmiştir. Bu nedenle, 1 cm kalınlıktaki tek katmanlı numuneler 0,5 cm (PLA-W20) – 0,5 cm (PLA-Mo20) kalınlığında iki katmanlı numunelere dönüştürülmüş ve benzer şekilde 2 cm ve 3 cm kalınlığa sahip iki katmanlı numuneler üretilmiştir. İki katmanlı numuneler, enerji arttıkça artan koruma verimliliği göstermiştir; örneğin orta enerji aralığında (276–383 keV) verimlilik tek katmanlı numunelere göre neredeyse iki katına çıkmış, kalınlık arttıkça özellikle yüksek enerjili radyasyona karşı koruma belirgin biçimde artmıştır. Bu

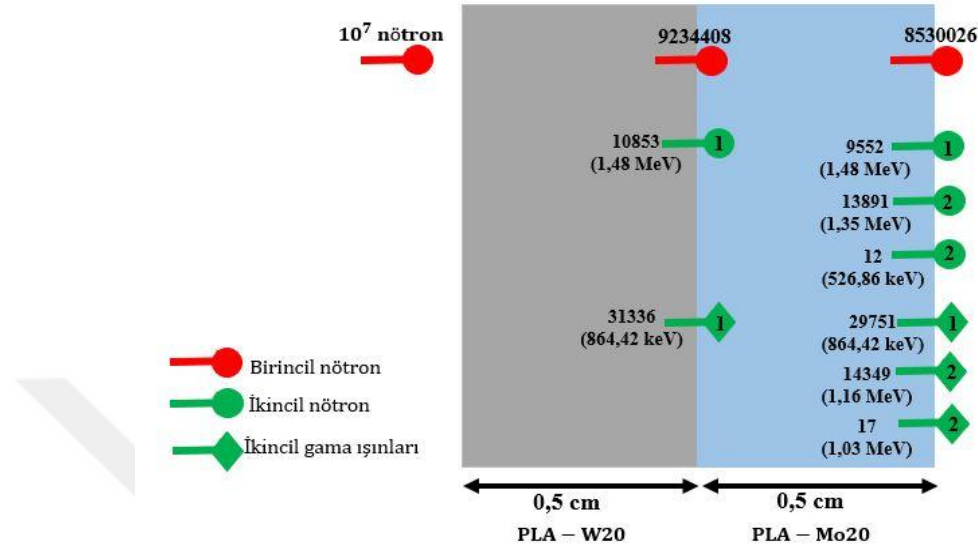
bulgular, PLA tabakalarının katkı tipi ve katman sayısı ile kalınlık kombinasyonlarının radyasyon koruma performansını belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.4 Radyasyon koruma verimliliği grafiği

Oluşturulan iki katmanlı yapı için gama radyasyonu sonrasında nötron etkileşimleri de GEANT4/Hadr03 paketi kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.5, 4,5 MeV nötron enerjisinde iki katmanlı yapıdaki nötronların katmanlarla etkileşimlerini, birincil nötron geçiş sayıları ve ikincil radyasyon oluşumları üzerinden görselleştirmektedir. Şekilde okların uçlarındaki sayılar, her bir ikincil parçacığın hangi katmanda oluştuğunu göstermektedir. Başlangıçta, ilk katmana tek enerjili 10^7 adet nötron gönderilmiş ve bunlardan 9.234.408 tanesi birinci katmanı geçmiştir. Birinci katmandaki etkileşimler sonucunda, ortalama enerjisi 1,48 MeV olan 10.853 adet ikincil nötron meydana gelmiştir. Ayrıca, aynı katmanda gerçekleşen etkileşimler sonucu ortalama enerjisi 864,42 keV olan 31.336 adet gama ışını oluşmuştur. İkinci katmana ulaşan 9.234.408 birincil nötrondan 8.530.026'sı bu katmanı da geçmiştir. Bu nötronların PLA-Mo20 malzemesi ile etkileşimi sonucunda, ortalama enerjisi 1,35 MeV olan 13.891 adet ikincil nötron ve ortalama enerjisi 1,16 MeV olan 14.349 adet ikincil gama ışını üretilmiştir. Birinci katmanda oluşan 31.336 adet ikincil gama ışını ile 10.853 adet ikincil nötronun ikinci katmandaki davranışları da incelenmiştir. Buna göre, ikinci katmanı sırasıyla 29.751 gama ışını ve 9.552 nötron

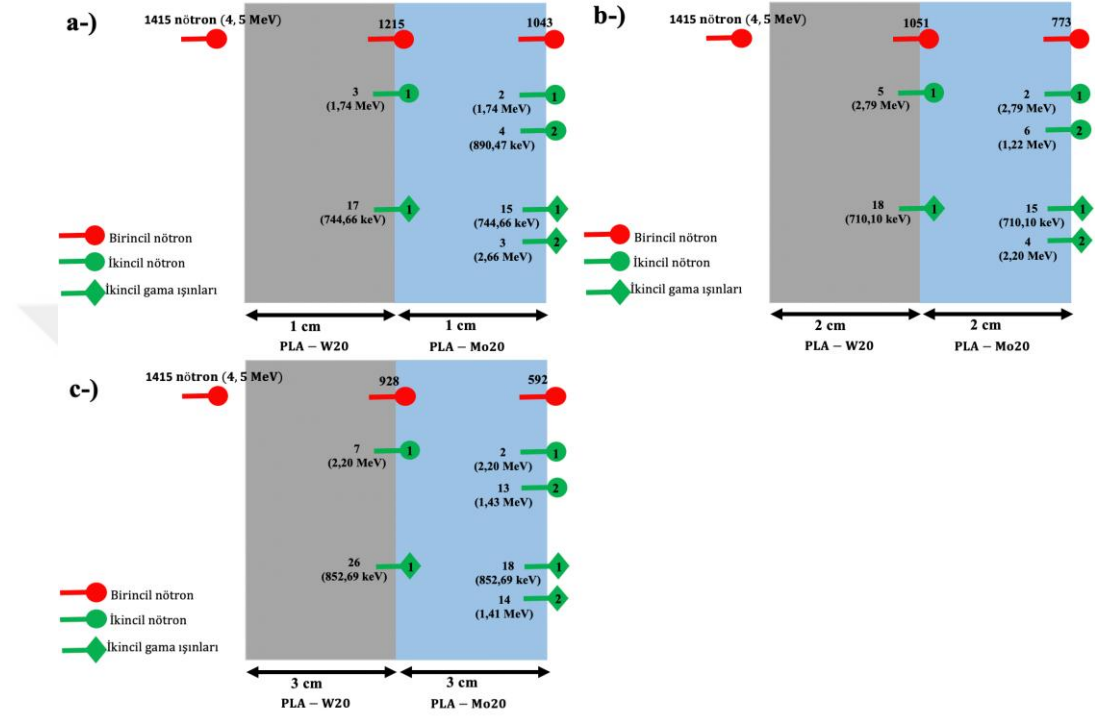
geçmiştir. Ayrıca, birinci katmanda oluşan ikincil nötronların ikinci katmandaki etkileşimleri sonucunda, ortalama enerjisi 526,86 keV olan 12 nötron ve ortalama enerjisi 1,03 MeV olan 17 gama ışını oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5 4,5 MeV enerjili nötronların iki katmanlı yapı ile etkileşimi

Burada gönderilen nötron sayısını 10^7 seçilmesinin sebebi istatistiksel olarak büyük bir sayı ile simülasyonların gerçekleştirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Ancak üretilen malzemenin uygulanabilirliğinin tartışmasını gerçekleştirebilmek için literatürden değerler ile elde edilen iki katmanlı sistemin nötron ile etkileşim diyagramları da çıkarılmıştır. Bu kapsamda, Temel (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir mikro ergimiş tuz reaktörünün zırhlama çalışması gerçekleştirilmiş ve bu reaktörün 9 katmandan oluşan zırhlama tasarımına sahip olduğu belirtilmiştir. Belirtilen 9 katmandan 1415 adet 4,5 MeV enerjili nötronların çıktığı raporlanmıştır (Temel, 2025). Bu doğrultuda oluşturulan iki katmanlı sistem üzerine 1415 nötron gönderilerek geçen nötron sayısı ve oluşan ikincil radyasyonlar simüle edilmiştir. Şekil 4.6'da bu simülasyonlara ait veriler görselleştirilmiştir. Simülasyonlarda katman kalınlığının etkisini anlamak için üç farklı değer dikkate alınmıştır: 2 cm, 4 cm ve 6 cm. Yapılan analizler sonucunda, PLA-W20 ve PLA-Mo20 kompozit katman kalınlığının artmasıyla, malzeme içerisinden geçen birincil nötron sayısının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, artan katman kalınlığıyla birlikte nötronların malzeme atomlarıyla daha fazla etkileşime girerek elastik ve inelastik saçılma olaylarına maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, kalınlık artışıyla birlikte malzeme içerisinde ikincil nötron ve ikincil gama ışını oluşumlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu sonuç, tungsten ve molibden elementlerinin yüksek

atom numaralarına bağlı olarak nötronlarla $n,2n$ ve n,γ türü nükleer reaksiyonlara girmesiyle açıklanmaktadır. Özellikle kalınlığın artması, birincil nötronların bu reaksiyonlara katılma olasılığını yükseltmiş ve dolayısıyla ikincil radyasyon üretimini artırmıştır. Sonuç olarak, nötronların zırhlılaşması ve ikincil radyasyon üretimi açısından optimum kalınlık ve bileşim dengesinin sağlanması gerekmektedir.



Şekil 4.6 Numune kalınlığının etkileşim parametreleri üzerine etkisi: a-) PLA-W20 (1 cm)+PLA-Mo20 (1 cm), b-) PLA-W20 (2 cm)+PLA-Mo20 (2 cm) ve c-) PLA-W20 (3 cm)+PLA-Mo20 (3 cm)

4.4. Yıllık Etkin Doz Hesabı

Elde edilen bulgular doğrultusunda, iki katmanlı yapı sonrası kalan radyasyon miktarları, yıllık etkin (eşdeğer) doz hesabı çerçevesinde yorumlanarak elde edilen sayısal verilerin anlamlandırılması sağlanabilmektedir. Önceki bölümde belirtildiği üzere, 1415 adet 4,5 MeV enerjili nötron sistemden çıktığı kabul edilmiştir. Bölüm 3.2.4 takip edilerek, belirtilen 1415 adet nötronun tamamının 1 kg doku kütlesi tarafından soğrulduğu varsayılırsa toplam yıllık etkin doz miktarı 92,56 mSv/yıl olarak hesaplanmaktadır. Farklı kalınlıktaki iki katmanlı sistemlerden sonra kalan radyasyon miktarları kullanılarak tez çalışması kapsamında üretilen iki katmanlı sistemin etkinliği tartışılabilir ve elde edilen numerik veriler anlamlandırılabilir. Bu kapsamda toplam 2 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem ile 1415 adet 4,5 MeV enerjili nötronun etkileşmesi sonucu 1043 adet 4,5 MeV enerjili nötron, 2 adet 1,74 MeV ortalama enerjili nötron, 4 adet 870,47 keV ortalama enerjili nötron, 15 adet 744,66 keV ortalama enerjili gamma ve 3 adet 2,66 MeV ortalama enerjili gamma hesaba katılmalıdır. Tablo 4.7 iki katmanlı sistemi geçen birincil ve ikincil radyasyonlardan elde edilen bulguları özetleyerek sunmaktadır. Elde edilen 68,41 mSv/yıl değeri ICRP tarafından belirlenen sınırın üstünde bir değerdir.

Tablo 4.7 2 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı

Tür	Enerji (MeV)	Sayı (N)	(w _R)	Toplam Enerji (J)	Etkin Doz (Sv)	Yıllık Etkin Doz (mSv/yıl)
Nötron	4,50	1043	12,60	$7,52 \cdot 10^{-10}$	$9,48 \cdot 10^{-9}$	68,23
Nötron	1,74	2	18,12	$5,57 \cdot 10^{-13}$	$1,01 \cdot 10^{-11}$	0,07
Nötron	0,87	4	20,64	$5,58 \cdot 10^{-13}$	$1,15 \cdot 10^{-11}$	0,08
Gama	0,74	15	1,00	$1,79 \cdot 10^{-12}$	$1,79 \cdot 10^{-12}$	0,01
Gama	2,66	3	1,00	$1,28 \cdot 10^{-12}$	$1,28 \cdot 10^{-12}$	0,01
Toplam	—	1067	—	$7,55 \cdot 10^{-10}$	$9,49 \cdot 10^{-9}$	68,41

Nötronların (1415 adet 4,5 MeV) toplam kalınlığı 4 cm olan iki katmanlı yapı ile etkileşiminden sonra 773 adet 4,5 MeV enerjili nötron, 2 adet 2,79 MeV ortalama enerjili nötron, 6 adet 1,22 MeV ortalama enerjili nötron, 15 adet 710,10 keV ortalama enerjili gamma ve 4 adet 2,20 MeV ortalama enerjili gamma kalmaktadır. Tablo 4.8 4 cm kalınlıkta iki katmanlı sistemi geçen birincil ve ikincil radyasyonlardan elde edilen bulguları özetleyerek sunmaktadır. Elde edilen 50,87 mSv/yıl değeri ICRP tarafından belirlenen sınırın üstünde bir değerdir.

Tablo 4.8 4 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı

Tür	Enerji (MeV)	Sayı (N)	(w _R)	Toplam Enerji (J)	Etkin Doz (Sv)	Yıllık Etkin Doz (mSv/yıl)
Nötron	4,50	773	12,60	$5,57 \cdot 10^{-10}$	$7,02 \cdot 10^{-9}$	50,87
Nötron	2,79	2	15,39	$8,94 \cdot 10^{-13}$	$1,38 \cdot 10^{-11}$	0,10
Nötron	1,22	6	18,99	$1,17 \cdot 10^{-12}$	$2,23 \cdot 10^{-11}$	0,16
Gama	0,71	15	1,00	$1,71 \cdot 10^{-12}$	$1,71 \cdot 10^{-12}$	0,01
Gama	2,20	4	1,00	$1,41 \cdot 10^{-12}$	$1,41 \cdot 10^{-12}$	0,01
Toplam	—	800	—	$5,62 \cdot 10^{-10}$	$7,06 \cdot 10^{-9}$	50,87 mSv/yıl

Nötronların (1415 adet 4,5 MeV) toplam kalınlığı 6 cm olan iki katmanlı yapı ile etkileşiminden sonra 592 adet 4,5 MeV enerjili nötron, 2 adet 2,20 MeV ortalama enerjili nötron, 13 adet 1,43 MeV ortalama enerjili nötron, 18 adet 852,69 keV ortalama enerjili gamma ve 14 adet 1,41 MeV ortalama enerjili gamma kalmaktadır. Tablo 4.9 6 cm kalınlıkta iki katmanlı sistemi geçen birincil ve ikincil radyasyonlardan elde edilen bulguları özetleyerek sunmaktadır. Elde edilen 39,25 mSv/yıl değeri ICRP tarafından belirlenen sınırın altında bir değerdir.

Tablo 4.9 6 cm kalınlığa sahip iki katmanlı sistem için yıllık etkin doz hesabı

Tür	Enerji (MeV)	Sayı (N)	w _R	Toplam Enerji (J)	Etkin Doz (Sv)	Yıllık Etkin Doz (mSv/yıl)
Nötron	4,50	592	12,60	$4,27 \cdot 10^{-10}$	$5,38 \cdot 10^{-9}$	38,72
Nötron	2,20	2	15,34	$7,05 \cdot 10^{-13}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$	0,08
Nötron	1,43	13	19,16	$2,98 \cdot 10^{-12}$	$5,70 \cdot 10^{-11}$	0,41
Gama	0,85	18	1,00	$2,46 \cdot 10^{-12}$	$2,46 \cdot 10^{-12}$	0,02
Gama	1,41	14	1,00	$3,16 \cdot 10^{-12}$	$3,16 \cdot 10^{-12}$	0,02
Toplam	—	639	—	$4,32 \cdot 10^{-10}$	$5,44 \cdot 10^{-9}$	39,25 mSv/yıl

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, çevre dostu polimer tabanlı bir zırhlama malzemesi geliştirilmesi amacıyla polilaktik asit matrisine mikron parçacık boyutuna sahip tungsten ve molibden tozları farklı oranlarda (%5, %10 ve %20) ilave edilerek tek ve iki katmanlı kompozit yapılar üretilmiştir. Araştırmanın temel problemi, geleneksel zırhlama malzemelerine alternatif olabilecek, toksik olmayan, hafif ve yüksek performanslı bir kompozit sistem geliştirmektir. Çalışma kapsamında, katkı oranlarının gama ve nötron radyasyonları üzerindeki etkileri hem deneysel hem de simülasyon yöntemleriyle incelenmiş ve katkı oranının artmasıyla birlikte zırhlama kabiliyetinin arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tungstenin yüksek atom numarası sayesinde özellikle düşük enerjili gama fotonlarını etkin biçimde soğurduğunu, molibdenin ise nötron saçılma süreçlerinde destekleyici bir rol üstlendiğini göstermiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tungsten katkılı PLA numuneleri termal ve epitermal bölgelerde nötron zayıflatma açısından daha başarılı olup, yüksek enerji bölgesinde her iki katkı türü de benzer geçirgenlik göstermektedir. Ancak tungstenin daha fazla ve daha enerjik ikincil foton üretmesi, toplam radyasyon ortamının enerji yoğunluğunu artırabileceği için zırhlama tasarımında bu parametre dikkate alınmalıdır. Buna karşın molibden katkılı PLA numuneleri daha düşük ikincil foton üretimiyle görece daha düşük ikincil radyasyon yükü oluşturmakta, ancak hızlı nötronlarla etkileşimde daha fazla ikincil nötron üretmektedir. Bu bulgular, W ve Mo katkılarının nötron enerjisine bağlı olarak farklı soğurma ve ikincil radyasyon davranışları sergilediğini ve katkı seçiminin uygulama enerjisi aralığına göre optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu bulgular doğrultusunda oluşturulan iki katmanlı W–Mo yapının, hem foton hem de nötron radyasyonuna karşı daha dengeli ve yüksek verimli bir koruma sağladığı belirlenmiştir. Monte Carlo tabanlı GEANT4 ve FLUKA simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle genel uyum göstermesi, elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir. Ayrıca, yıllık etkin doz hesaplamalarının malzeme kalınlığı değiştirilerek ICRP tarafından belirlenen güvenli sınırların altına indirilebileceği de gösterilmiştir. Bu durum, geliştirilen kompozitlerin radyasyon güvenliği uygulamalarında kullanılabilirliğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında üretilen PLA–W/Mo esaslı iki katmanlı kompozitlerin; çevreye duyarlı, biyobozunur, toksik olmayan yapıları ve yüksek zırhlama performansları sayesinde sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğu söylenebilmektedir.

Geliştirilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, elastisite modülü vb.) ayrıntılı olarak incelenmesi ve katkı oranı ile partikül dağılımının bu özellikler üzerindeki etkisinin analiz edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, yüksek dozda radyasyon altında oluşabilecek yapısal bozulmaların DPA (atom başına yer değiştirme) ve TID (toplam iyonlaştırıcı doz) parametreleri üzerinden uzun dönemli olarak değerlendirilmesi, malzemelerin radyasyon hasarına karşı kararlılığının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık gibi çevresel koşullar altında malzemenin performansının test edilmesi, endüstriyel ve nükleer uygulamalara yönelik güvenilirlik değerlendirmesi açısından faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Agaliotis, E. M., Ake-Concha, B. D., May-Pat, A., Morales-Arias, J. P., Bernal, C., Valadez-Gonzalez, A., Herrera-Franco, P. J., Proust, G., Koh-Dzul, J. F., Carrillo, J. G., & Flores-Johnson, E. A. (2022). Tensile behavior of 3D printed polylactic acid (PLA) based composites reinforced with natural fiber. *Polymers*, 14(19), 3976. <https://doi.org/10.3390/polym14193976>
- Ahmed, B., Shah, G. B., Malik, A. H., & Rizwan, M. (2020). Gamma-ray shielding characteristics of flexible silicone tungsten composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 155, 108901. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108901>
- Al-Buriahi, M. S., Kurtulus, R., Eke, C., Alomairy, S., & Olarinoye, I. O. (2024). An insight into advanced glass systems for radiation shielding applications: A review on different modifiers and heavy metal oxides-based glasses. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40249>
- Almurayshid, M., Alsagabi, S., Alssalim, Y., Alotaibi, Z., & Almsalam, R. (2021). Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109425. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109425>
- Ambrus, S., Soporan, R. A., Kazamer, N., Pascal, D. T., Muntean, R., Dume, A. I., Mărginean, G. M., & Serban, V. A. (2021). Characterization and mechanical properties of fused deposited PLA material. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4356-4363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.760>
- Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., Mairani, A., Sala, P. R., Smirnov, G., Vlachoudis, V. (2014). The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear Data Sheets* 120, 211. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049>
- Chang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Fang, J., Luan, W., Yang, X., & Zhang, W. (2015). Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 356, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.04.062>
- Darwin, C. G. (1932). Notes on the theory of radiation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 136(829), 36-52. <https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0065>
- El-Mallawany, R., Sayyed, M. I., Dong, M. G., & Rammah, Y. S. (2018). Simulation of radiation shielding properties of glasses contain PbO. *Radiation Physics and chemistry*, 151, 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.035>
- Gandini, A., & M. Lacerda, T. (2021). Monomers and macromolecular materials from renewable resources: state of the art and perspectives. *Molecules*, 27(1), 159. <https://doi.org/10.3390/molecules27010159>
- Geant4 Collaboration. (2003). Geant4-a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Levring, H. (2004). WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation physics and chemistry*, 71(3-4), 653-654. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040>
- Gilys, L., Griškonis, E., Griškevičius, P., & Adlienė, D. (2022). Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding. *Polymers*, 14(9), 1696. <https://doi.org/10.3390/polym14091696>

- Goldberg, Z., & Lehnert, B. E. (2002). Radiation-induced effects in unirradiated cells: a review and implications in cancer. *International journal of oncology*, 21(2), 337-349. <https://doi.org/10.3892/ijo.21.2.337>
- Hu, G., Hu, H., Yang, Q., Yu, B., & Sun, W. (2020). Study on the design and experimental verification of multilayer radiation shield against mixed neutrons and γ -rays. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(1), 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.07.016>
- ICRP-103 (2007). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Ann. ICRP* 37, 1-332. ICRP Publication 103.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*, 37(2-4). <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
- Issa, S. A., Alrowaily, A. W., Abulyazied, D. E., Ali, E. S., & Zakaly, H. M. (2023). Effects of WO₃ reinforcement on the properties of poly (lactic acid) composites for radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 212, 111121. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111121>
- Kim, H., Lim, J., Kim, J., Lee, J., & Seo, Y. (2020). Multilayer structuring of nonleaded metal (BiSn)/Polymer/Tungsten composites for enhanced γ -ray shielding. *Advanced Engineering Materials*, 22(6), 1901448. <https://doi.org/10.1002/adem.201901448>
- Lahir, Y. K. (2023). Non-ionizing radiations and their biochemical and biomedical impacts: A review. *Journal of Radiation and Cancer Research*, 14(2), 53-66. https://doi.org/10.4103/jrcr.jrcr_17_22
- Li, Q., Wei, Q., Zheng, W., Zheng, Y., Okosi, N., Wang, Z., & Su, M. (2018). Enhanced radiation shielding with conformal light-weight nanoparticle–polymer composite. *ACS applied materials & interfaces*, 10(41), 35510-35515. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b10600>
- Little, M. P., Azizova, T. V., & Hamada, N. (2021). Low-and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology. *International journal of radiation biology*, 97(6), 782-803. <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1876955>
- Ogul, H., Gultekin, B., Yildiz, H., Us, H., & Bulut, F. (2024). Novel 3D-Printed lead-free radiation protection apron in the medical X-ray and thermal neutron energy range. *Radiation Physics and Chemistry*, 219, 111686. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111686>
- Oğul, H., Agar, O., Bulut, F., Kaçal, M. R., Dilsiz, K., Polat, H., & Akman, F. (2023). A comparative neutron and gamma-ray radiation shielding investigation of molybdenum and boron filled polymer composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 194, 110731. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110731>
- Prabhu, S., Bubbly, S. G., & Gudennavar, S. B. (2023). X-ray and γ -ray shielding efficiency of polymer composites: choice of fillers, effect of loading and filler size, photon energy and multifunctionality. *Polymer Reviews*, 63(1), 246-288. <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2067867>
- Raj, K. H., Gnanavel, S., & Ramalingam, S. (2023). Investigation of 3D printed biodegradable PLA orthopedic screw and surface modified with nanocomposites (Ti–Zr) for biocompatibility. *Ceramics International*, 49(5), 7299-7307. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.188>
- Sarswat, K., Pal, S. K., Khattari, Z. Y., Dahshan, A., & Mehta, N. (2024). A comprehensive study of radiation shielding parameters of chalcogens-rich quaternary alloys for nuclear waste management. *Optical Materials*, 157, 116253. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116253>
- Sayyed, M. I., Mahmoud, K. A., Mohammed, F. Q., & Kaky, K. M. (2024). A comprehensive evaluation of Mg-Ni based alloys radiation shielding features for nuclear protection applications. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(5), 1830-1835. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.040>

- Shi, D., Xia, Y., Zhao, Y., Ma, X., Wang, J., Liu, M., & Yu, K. (2024). Evaluation of technical and gamma radiation shielding properties of sustainable ultra-high performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 436, 137003. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137003>
- Tasnim, A., Sahadath, M. H., & Khan, M. N. I. (2021). Development of high-density radiation shielding materials containing BaSO₄ and investigation of the gamma-ray attenuation properties. *Radiation Physics and Chemistry*, 189, 109772. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109772>
- Temel, İ. H. (2025). *Ergimiş tuz reaktörlerinde radyasyon zırhlama analizi*. (Tez No. 916361) Yayınlanmış yüksek lisans tezi], Sinop Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sinop.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2021). UNSCEAR 2020/2021 Report: Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations, New York.
- Velásquez, J., Fuentealba, M., & Santibáñez, M. (2024). Characterization of Radiation Shielding Capabilities of High Concentration PLA-W Composite for 3D Printing of Radiation Therapy Collimators. *Polymers*, 16(6), 769. <https://doi.org/10.3390/polym16060769>
- Villadiego, K. M., Arias Tapia, M. J., Useche, J., & Escobar Macías, D. (2022). Thermoplastic starch (TPS)/polylactic acid (PLA) blending methodologies: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 75-91. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02207-1>
- Wang, J., Zhao, Y., Shi, D., Xia, Y., Liu, M., Ma, X., & Yu, K. (2024). Microstructure and radiation shielding properties of lead-fiber reinforced high-performance concrete. *Ceramics International*, 50(13), 23656-23667. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.089>
- Wang, Z., Wu, Z., Weng, L., Ge, S., Jiang, D., Huang, M., Mulvihill, D. M., Chen, Q., Guo, Z., Jazzar, A., He, X., Zhang, X., & Xu, B. B. (2023). A roadmap review of thermally conductive polymer composites: critical factors, progress, and prospects. *Advanced functional materials*, 33(36), 2301549. <https://doi.org/10.1002/adfm.202301549>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve ŞAHİN

Yabancı Dili : İngilizce

ORCID ID : 0009-0003-1910-4213

Eğitim Durumu

Lise : Akdeniz Anadolu Lisesi, Erdemli/Mersin 2011

Lisans : Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği, Kırşehir, 2015

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Emniyet Genel Müdürlüğü, Polis Memuru, 2019 yılında göreve başladım.

İstanbul İl Emniyet Müdürlüğü 2019-2021

Sinop İl Emniyet Müdürlüğü 2021-2024

Adana İl Emniyet Müdürlüğü 2024-Halen devam ediyor.