

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



ABS-PLA FİLAMENTLERİNİN NÖTRON ZİRHLANMASI İÇİN
KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MUSTAFA YÜKSEKYAYLA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

DOÇ. DR. HASAN OĞUL

SİNOP-2023

TEZ KABUL

MUSTAFA YÜKSEKYAYLA tarafından hazırlanan “**ABS-PLA FİLAMENTLERİNİN NÖTRON ZIRHLAMASI İÇİN KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**”

başlıklı bu çalışma, **05.01.2023** tarihinde yapılan savunma sonucunda **OYBİRLİĞİ** ile **BAŞARILI** bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Başkan
(Danışman)**

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

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ
Sinop Üniversitesi/ Mühendislik ve Mimarlık
Fakültesi

İmza

Üye

Doç. Dr. Ferdi AKMAN
Bingöl Üniversitesi / Sosyal Bilimler Meslek
Yüksekokulu

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Fadime DİRİK

.....

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.

Mustafa YÜKSEKYAYLA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABS-PLA FİLAMENTLERİNİN NÖTRON ZIRHLANMASI İÇİN KULLANILABİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MUSTAFA YÜKSEKYAYLA

SİNOP ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Doç. Dr. HASAN OĞUL

Radyasyonun canlı hücrelerine yararı ve zararının bilinmesi, radyasyon teknolojisindeki uygulama sayısını ekonomik gelişmelere paralel olarak artırmaktadır. Radyasyonun zararından korunabilmek için üç temel yasa olan zaman, mesafe ve zırhlama parametrelerinden faydalanılmaktadır. Ayrıca, 3D yazıcılar ev ve iş yerlerine kullandığımız küçük ve büyük nesneleri üretebilir hale gelmiştir. Günümüzde, radyasyon zırhlama çalışmaları ve 3D yazıcı teknolojisinin bir arada kullanılabilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların sonucunda aktif ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu bağlamda, 3D yazıcıların radyasyon zırhlama malzemelerini istenilen ölçüde ve tasarımda üretilmesi kolaylığı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada, 3D yazıcılarda kullanılan ABS-PLA polimerlerine bazı geçiş metalleri eklenmiş ve elde edilen polimer kompozitlerin nötron enerjisine ve malzeme kalınlığına göre nötron zırhlama kabiliyetleri GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları kullanılarak belirlenmiştir. Ek olarak, hızlı nötron ayırma tesir kesiti teorik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen polimer kompozitler arasında nötron zırhlama için Tungsten katkılı kompozitlerin literatüre katkıda bulunması beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Nötron Zırhlama, 3D yazıcı, ABS, PLA, FLUKA, GEANT4, Hafniyum, Tungsten.

Ocak 2023, 91 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

INVESTIGATION ON THE USABILITY OF ABS-PLA FILAMENTS FOR NEUTRON SHIELDING

MUSTAFA YÜKSEKYAYLA

**SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS
DEPARTMENT OF INTERDISCIPLINARY NUCLEAR ENERGY AND
ENERGY SYSTEMS
SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. HASAN OĞUL**

Knowing the benefits and harms of radiation to living cells increases the number of applications in radiation technology in parallel with economic developments. In order to be protected from the damage of radiation, the three basic laws of time, distance and shielding parameters are used. In addition, 3D printers have become able to produce small and large objects that we use for homes and businesses. Today, researches are carried out to use radiation shielding studies and 3D printer technology together. Active progress has been made as a result of these studies. In this context, it is thought that 3D printers will facilitate the production of radiation shielding materials in the desired size and design. In this study, some transition metals were added to ABS-PLA polymers used in 3D printers and the neutron shielding abilities of the obtained polymer composites were determined by using GEANT4 and FLUKA simulation programs according to neutron energy and material thickness. In addition, the fast neutron separation cross section was calculated theoretically. Among the obtained polymer composites, Tungsten doped composites for neutron shielding are expected to contribute to the literature.

KEYWORDS: Neutron Shielding, 3D Printer, ABS, PLA, GEANT4, FLUKA, Hafnium, Tungsten

January 2023, 91 Pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, Doç. Dr. Hasan OĞUL, Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ ve Doç. Dr. Ferdi AKMAN'a teşekkürü bir borç bilir şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca bu zorlu çalışma sürecinde ve tüm eğitim hayatım boyunca bana her türlü desteği sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve olacağından emin olduğum annem Nergiz YÜKSEKYAYLA ve bütün aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, aldığım kararları her zaman destekleyen, benim için her türlü fedakârlıkta bulunan değerli arkadaşlarım, Abuzer YAZ, Eyyüb POLAT, Muhammed Sadık TANDOĞAN ve Ayaz BARAN'a teşekkür ederim.

Mustafa YÜKSEKYAYLA

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİ	4
2.1. Atom Tarihçesi ve Yapısı.....	4
2.2. Atomun Nükleonları.....	5
2.2.1. Protonlar	5
2.2.2. Nötronlar ve Keşfi	5
2.3. Nötron Kaynakları.....	10
2.3.1. Alfa-Nötron Kaynakları	10
2.3.2. Fotonötron Kaynakları	10
2.3.3. Aktivasyon Nötronlar	11
2.3.4. Kendiliğinden Fisyon	11
2.3.5. Nükleer Reaksiyonlar	11
2.3.6. Reaktörler	11
2.4. Radyasyon Çeşitleri.....	12
2.4.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	12
2.4.2. İyonlaştırıcı Radyasyon.....	13
2.5. Radyasyondan Korunma Yolları	13
2.5.1. Zaman Kuralı.....	14
2.5.2. Mesafe Kuralı	14
2.5.3. Zırhlama Kuralı	15
2.6. 3D Yazıcılar ve Filamentler	16
2.6.1. 3D Yazıcılar	16
2.6.2. PLA (Polilaktik Asit)	18
2.6.3. ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)	22
3. MATERYAL VE METOD	23

3.1. Kullanılan Elementler	23
3.1.1. Hidrojen (H)	24
3.1.2. Karbon (C).....	24
3.1.3. Oksijen (O).....	24
3.1.5. Kükürt (S).....	25
3.1.6. Potasyum (K).....	26
3.1.7. Hafniyum (Hf).....	27
3.1.8. Tungsten (W).....	28
3.1.9. Altın (Au)	29
3.2. Parafin.....	30
3.3. GEANT4 Simülasyon Programı ve Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi	31
3.4. FLUKA Simülasyon Programı ve Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi	36
3.5. Teorik Hesaplama ile Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi.....	39
3.5.1. Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti	39
4. BULGULAR	44
4.1. 1 MeV Nötron Enerjisinde ve 5 cm Numune Kalınlığında Elde Edilen Sonuçlar...45	
4.1.1. Saf Haldeki PLA, ABS ve Parafin	45
4.1.2. ABS Tabanlı Kompozitler için Sonuçlar	45
4.1.3. PLA Tabanlı Kompozitler İçin Sonuçlar.....	47
4.1.4. PLA veya ABS Tabanlı Üçlü Kompozitler İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	49
4.2. 1 MeV Nötron Enerjisinde Farklı Numune Kalınlıklarında Elde Edilen Simülasyon Sonuçları	49
4.2.1. PLA	50
4.2.2. ABS	50
4.2.3. Parafin	51
4.2.4. PLAWHf	51
4.2.5. ABSWHf	52
4.3. 5 cm Kalınlığındaki Numuneler ve Farklı Enerjilerdeki Nötronlar İçin Simülasyon Sonuçları	53
4.3.1. PLA	53
4.3.2. ABS	54
4.3.3. Parafin	54
4.3.3. PLAWHf	55

4.3.4. ABSWHf	56
4.4. Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Kalınlık Değeri ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları	57
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	61
KAYNAKÇA	71
ÖZGEÇMİŞ	76



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Nötronun Özellikleri	7
Tablo 2. Nötronların Kullanım Alanları.....	7
Tablo 3. Son Nesil Kaynakların Özelliklerini Kapsayan Genel Kabul Görmüş Nötron Enerji Aralıkları	8
Tablo 4. Hafif Çekirdeklerden (α , n) Tepkimesi Q Değeri ve Nötron Verimi.....	10
Tablo 5. Radyasyon Çeşitleri	12
Tablo 6. Azot Özellikleri.....	25
Tablo 7. Kükürtün Özellikleri	26
Tablo 8. Hafniyumun Özellikleri	27
Tablo 9. Tungstenin Özellikleri	28
Tablo 10. Altın Elementinin Fiziksel Özellikleri	29
Tablo 11. PLA, ABS Polimerlerinin Kimyasal Bileşenleri ve Kütlece Yüzdelikleri	32
Tablo 12. FLUKA Birim Sistemi.....	36
Tablo 13. Bu Çalışmada Kullanılan Bazı Elementlerin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı Değerleri.....	40
Tablo 14. Bu Çalışmada Ele Alınan Ana Malzemeler ve Parafinin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı Değerleri.	41
Tablo 15. PLA polimerine Hafniyum, Tungsten ve Altın Elementlerinin Kütlece Belirli Yüzdelik Eklemeyle Oluşan Kompozitler.....	41
Tablo 16. ABS polimerine Hafniyum, Tungsten ve Altın Elementlerinin Kütlece Belirli Yüzdelik Eklemeyle Oluşan Kompozitler.....	42
Tablo 17. Kompozitlerin Kütlece Yüzdece Dağılımı.	43
Tablo 18. Organik Kompozitlerin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı.....	43
Tablo 19. 1 MeV Nötron Enerjisinde 5 cm Numune Kalınlığındaki Saf Organik Polimerler ve Parafinden Geçen Nötron Sayısı.	45
Tablo 20. ABS Tabanlı Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.....	46
Tablo 21. ABS Tabanlı Altın ve Tungsten Elementi Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	46
Tablo 22. PLA tabanlı Hafniyumun Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	47
Tablo 23. PLA Tabanlı Polimere Altın ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	48

Tablo 24. 1 MeV Nötron Enerjisinde ve 5 cm Numune Kalınlığındaki Polimer Tabanlı Kompozit ve Alaşımdan Geçen Nötron Sayısı.	49
Tablo 25. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin PLA Organik Polimerinden Geçen Nötron Sayısı	50
Tablo 26. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin ABS Organik Polimerinden Geçen Nötron Sayısı.....	50
Tablo 27. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Parafin Malzemesinden Geçen Nötron Sayısı.	51
Tablo 28. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin PLA Polimerine Tungsten Hafniyum Alaşımının Eklemesiyle Oluşan Kompozitten Geçen Nötron Sayısı	52
Tablo 29. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin ABS Polimerine Tungsten Hafniyum Alaşımının Eklemesiyle Oluşan Kompozitten Geçen Nötron Sayısı	52
Tablo 30. PLA Polimerinin 5 cm Kalınlığındaki Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı.	53
Tablo 31. ABS Polimerinin 5 cm Kalınlığındaki Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı.	54
Tablo 32. 5 cm Kalınlığındaki Parafinden Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı.	55
Tablo 33. 5 cm Kalınlığında, Farklı Enerjilerde PLA Polimerine Tungsten-Hafniyum Alaşımının Eklenmesiyle Geçen Nötron Sayısı.....	55
Tablo 34. 5 cm Kalınlığında, Farklı Enerjilerde ABS Polimerine Tungsten-Hafniyum Alaşımının Eklenmesiyle Geçen Nötron Sayısı.....	56
Tablo 35. GEANT4 Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları.	57
Tablo 36. FLUKA Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları.....	58
Tablo 37. GEANT4 Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları.	58
Tablo 38. FLUKA Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Atomun Yapısı	4
Şekil 2. Chadwick Alfa Parçacıklarını Soğurma Düzenegi.....	6
Şekil 3. Atomdaki Nötron, Proton ve Elektronlar.	6
Şekil 4. Nükleer Santral.....	12
Şekil 5. Giriciliklerine Göre İyonlaştırıcı Radyasyonlar.	13
Şekil 6. Mesafe ve Radyasyon Dozu Arasındaki İlişki.	14
Şekil 7. 2012-2025 Aralığında 3D Baskı Pazarı.....	18
Şekil 8. PLA'nın Yapısı.....	19
Şekil 9. PLA'nın Üretiminden Geri Kazanılmasına Kadar Olan Yaşam Döngüsü.	20
Şekil 10. PLA'nın Sentez Metotları.....	21
Şekil 11. Akrilonitril Bütadien Stiren Açılımı.....	22
Şekil 12. Karbon Elementi.....	24
Şekil 13. Limon Sarısı Rengindeki Kükürt	26
Şekil 14. Potasyum Elementi	26
Şekil 15. Hafniyum Elementi	27
Şekil 16. Tungsten Elementi.....	28
Şekil 17. Altın Elementi.	29
Şekil 18. GEANT4 Simülasyon Gösterimi.....	33
Şekil 19. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan Polimerler.	33
Şekil 20. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan PLA Polimeri ile Oluşturulan Bazı Kompozitlerin Yoğunlukları ve Kütlece Yüzdelikleri.	34
Şekil 21. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan ABS Polimeri ile Oluşturulan Bazı Kompozitlerin Yoğunlukları ve Kütlece Yüzdelikleri.	34
Şekil 22. GEANT4 Simülasyon Programı Başlatma Komut ve Parametreleri.	35
Şekil 23. GEANT4 Simülasyon Sonucunun Alındığı Data Ekranı.	35
Şekil 24. FLUKA programının Flair arayüzü ile Oluşturulan Input Dosyası.	37
Şekil 25. Flair Arayüzünde Tanımlanan Element ve Kompozitlerin Çalıştırılması.....	38
Şekil 26. GEANT4 ve FLUKA İçin 5 cm Kalınlığında 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Geçen Nötron Sayısı.	62
Şekil 27. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	63

Şekil 28. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Altın Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	64
Şekil 29. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	64
Şekil 30. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	65
Şekil 31. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Altın Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	66
Şekil 32. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı.	66
Şekil 33. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Farklı Kalınlıklardaki PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin GEANT4 Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı.	67
Şekil 34. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Farklı Kalınlıklardaki PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin FLUKA Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı.	68
Şekil 35. 5 cm Kalınlığında Farklı Enerjilerde PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin GEANT4 Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı.	69
Şekil 36. 5 cm Kalınlığında Farklı Enerjilerde PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin FLUKA Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı.	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Au	:	Altın
B	:	Bor
Ba	:	Baryum
Be	:	Berilyum
C	:	Karbon
cm	:	Santimetre
cm²	:	Santimetrekare
cm³	:	Santimetreküp
Cr	:	Krom
Cu	:	Bakır
e	:	Elektron
eV	:	Elektron Volt
Fe	:	Demir
g	:	Gram
H	:	Hidrojen
²H	:	Döteryum
³H	:	Tritiyum
He	:	Helyum
Hf	:	Hafniyum
K	:	Potasyum
keV	:	Kilo Elektron Volt
mm	:	Milimetre
m²	:	Metrekare
MeV	:	Mega Elektron Volt
N	:	Azot
n	:	Nötron
nm	:	Nanometre
Na	:	Sodyum
O	:	Oksijen
°C	:	Santigrat
°K	:	Kelvin
p	:	Proton
Pb	:	Kurşun
Ra	:	Radyum
S	:	Kükürt
s	:	Saniye
U	:	Uranyum
V	:	Vanadyum
W	:	Tungsten
WHf	:	Tungsten Hafniyum Alaşımı
α	:	Alfa
β	:	Beta
γ	:	Gama

$\text{\AA}$	: Nötronun Dalga Boyu (Angstrom)
I	: Malzemededen Geçen Nötron Sayısı
I_0	: Malzemeye Gönderilen Nötron Sayısı
Σ_R/ρ	: Kütle Azaltma Katsayısı
Σ_R	: Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti
Σ_t	: Makroskobik Toplam Tesir Kesiti
μ	: Lineer Zayıflatma Katsayısı
σ_t	: Toplam Tesir Kesiti
A	: Kaynağın Aktivitesi
B	: Düzeltme Faktörü
Bq	: Bequerel
Γ	: Gama Işını Sabiti
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
ALARA	: Mümkün Olan En Düşük Doz (As Low As Reasonably Achievable)
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu
CEM95	: Çağlayan/Basamak – Eksiton Modeli (Cascade-Exciton Model)
CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CO₂	: Karbondioksit
DLP	: Dijital Işık Sistemi
EBM	: Elektronik Işın Eritme
FDA	: Amerikan Gıda ve İlaç Kurumu
FDM	: Eklemeli Üretim
FLUKA	: Dalgalı Çağlayanlar-Basamaklar (Fluktuierende Kaskade)
GEANT4	: Geometri ve İzleme (Geometry And Tracking)
LA	: Laktik Asit
NaN₃	: Sodyum Azotür
OTK	: Onda-bir Kalınlık Değeri
OSY	: Ortalama Serbest Yol
PA	: Poliamid
PLA	: Polilaktik Asit
PEG	: Polietilen Glikol
PHAs	: Polihidroksialkanoat
rad	: Absorbe Radyasyon Dozu
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SLM	: Seçici Lazer Eritme
TALYS	: Kapsamlı Nükleer Reaksiyon Modellemesi
UV	: Ultraviyole Işınları
3D	: 3 Boyutlu Baskı Yazıcı
x	: Malzeme Kalınlığı
YKD	: Yarı Kalınlık Değeri

1. GİRİŞ

Günümüzde radyasyonun tıp, tarım, endüstri, bilimsel araştırma, enerji ve askeri amaçlarla kullanılışı çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Bu alanlarda radyasyondan örnek olarak enerjide nükleer santralleri, tıpta radyasyon aracılığıyla teşhis ve tedavi, tarımda gıdaların raf ömrünün uzatılması ve sterilizasyonu, sanayide ölçüm ve otomasyon ile kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi gibi örnekleri söyleyebiliriz. Radyasyondan korunma uygulama alanında ise radyasyonun şiddetini olabildiğince minimum seviyeye indirmek veya radyasyonu tamamen engellemek amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda radyasyondan korunmanın 3 temel yöntem vardır. Bunlar mesafe, zaman ve zırhlama olarak bilinmektedir. Mesafe ve zaman daha çok biyolojik etki bazında düşünülür ve tek başlarına kontrol etmek bazen yetersiz kalabilir. Bu yüzden zırhlama uygulamaları büyük önem teşkil etmektedir. Dolayısıyla radyasyon yayan kaynak ile radyasyona maruz kalan canlılar ve maddeler arasına zırhlama materyal veya malzemesinin konulması maruz kalınacak doz miktarını şüphesiz azaltır (Kılınçarslan vd., 2007).

Zırhlamalar genelde iyonize radyasyon çeşidi olan gama (γ) ışınları ve nötron parçacıkları dâhilinde yapılırsa da tüm radyasyon çeşitleri için zırhlamanın uygulanması gerektiği düşünülmektedir. Bu yüzden radyasyonun çeşidine göre uygun zırhlama malzemesinin seçilmesi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında odaklanılan radyasyon zırhlama türü ise nötronlar içindir. Kurşun ve türevleri çeşitli polimerler, parafin ve ağır beton ile oluşturulmuş kompozit malzemelerin yanı sıra hafniyum, bor, demir, gadolinyum, kadmiyum gibi elementler de nötron zırhlamasında nötronları soğurduğu, saçtığı veya yavaşlattığı için tercih edilmektedir. Bu elementler arasında bor elementi nötronları iyi soğurmasıyla birlikte nötronları tutar, hidrojen ise elastik saçılmalar yaparak nötronları yavaşlatır. Dolayısıyla bor ve içerisinde hidrojen bakımından zengin materyaller nötronların zırhlamasında kullanılabilir. Genellikle hızlı nötronları zırhlamak için kullanılan temel malzemeler hidrojen içeren su, lityum ve polimer olarak polietilen zırh olarak kullanılır ve bu malzemelerin çoğu ikincil gama ışını yaymaktadır. Fakat bor, hızlı nötron kadar enerji potansiyeli olmayan diğer enerjilerde absorbe etme kabiliyeti açısından benzeri bulunmamakta ve yalnızca hafif bir gama ışını salınımı yaparak alfa parçacıklarını kolayca absorbe etmektedir (Tümer vd., 2009).

Literatüre bakıldığında, Khanna, 1996 yılında ağır metal oksit karışımli borlu camlarda 662 keV’de lineer zayıflatma katsayısı ve kütle zayıflatma katsayılarını belirlediği görülmektedir (Khanna vd., 1996). Ayrıca başka bir çalışmada, Bangladeşin Chittatong ve Coss Bazar bölgelerinden alınan kum, toprak, inşaat malzemesi ve ağır sahil yerlerinden alınan numunelerin gama ve nötron zırhlama kabiliyetleri çeşitli nokta radyasyon kaynakları kullanılarak incelenmiştir (Alam vd., 2001). Benzer şekilde, Abdo vd. yoğunluğu oldukça yüksek olan kurşun oksit ve polietilen içeren kompozit malzemelerin hızlı nötron ve γ -ışını üzerine zırhlama kabiliyetlerini çalışmıştır (Abdo vd., 2003). Nötron zırhlamada önemli bir malzeme olduğu bilinen parafin içinse başka bir çalışmada, belirli yüzdeliklerle oluşturulmuş parafin mumlarda 4,5 MeV enerjideki nötronların makroskopik soğrulma tesir kesitlerinin belirlenmesi, zırhlama üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve değişen yağ oranlarına göre parafin mumlarda nötron tutuculuğu araştırılmıştır (Aygün, 2010). Korkut vd. sırasıyla saf halde, %5, %10 ve %15 kolemanit konsantrasyona sahip dört barit ve dört beton örneği için nötron doz aktarım ölçümlerinin efektif enerjisi 4,5 MeV’de ve tek enerjide olan ^{241}Am - ^9Be nötron kaynağını kullanarak yapmışlardır (Korkut vd., 2010). Numunenin kolemanit yüzdesi arttıkça nötron doz aktarım değerinin artacağını elde etmiş ve farklı oranlarda kolemanit yüzdesi dâhil ederek barit ve normal betonun nötron zırhlama özelliğini artırmanın mümkün olacağını ifade etmiştir (Korkut vd., 2010).

Tungstenin (n, γ) ışıma tesir kesitleri dikkate alarak kurşun, bizmut ve tungsten gibi yüksek atomik ağırlıklı elementler koruyucu malzemeler nötron zırhlamasında seçilebilir, birincil nötron kalkanından kaçan nötronların yakalanmasından üretilen önemli ikincil gama radyasyon dozu nedeniyle nötronik zırhlamada tercih edilir (McAlister, 2016). Ayrıca tungstenin etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti de diğer sebeplerdendir. 3D yazıcılardaki filamentlerle ilgili çalışmalara baktığımızda 2018 yılında Woosley vd. tarafından yapılan bir çalışmada, 3D yazıcılarda Bornitrür bileşimini ABS filamenti içerisine katkılanmış ve nötron zırhlamada bir termoplastik polimer katkılayarak zırhlama kabiliyetinin %50 den %72 arttırıldığını raporlamışlardır (Woosley vd., 2018). 2020 yılında yayınlanan bir çalışmada polimer grubundan olan polyester maddesine kurşun iyodun (PbI_2) kütlece belirli farklı yüzdeliklerde eklemesiyle oluşan yeni kompozit malzemenin gama zırhlama kabiliyeti 22 farklı enerji aralığında raporlanmıştır (Akman vd., 2020). 2021 yılında Dilsiz vd. polyester tabanlı CdS katkılı kompozit malzemeler üretmişlerdir (Dilsiz vd., 2021). Gama ve nötron zırhlama değerlerine ek olarak SEM ve

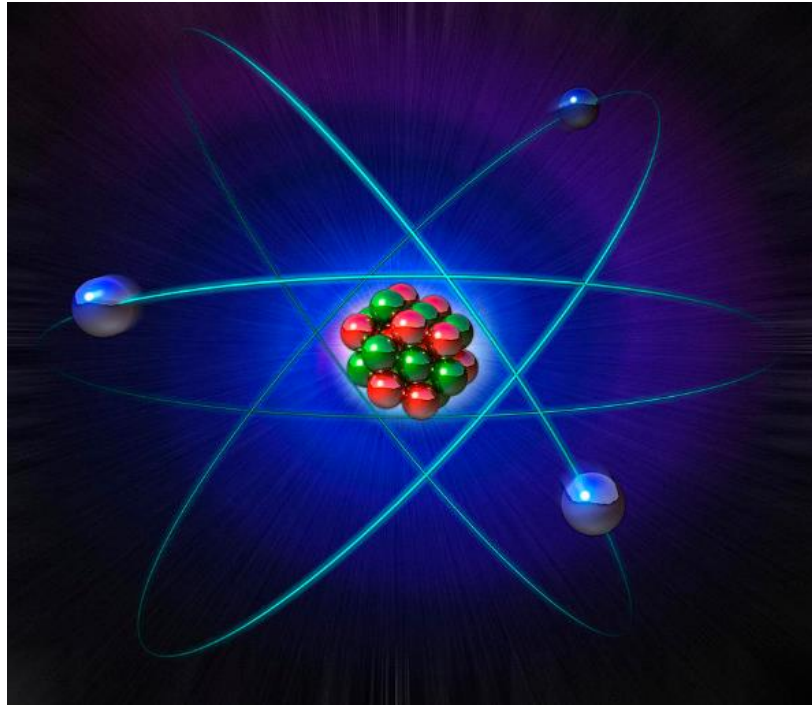
XRD analizlerini kullanarak üretilen numuneleri değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, malzemedeki CdS miktarının artmasının nötron zırhlama kabiliyetini geliştirdiğini ifade etmişlerdir (Dilsiz vd., 2021). Viskadourakis vd. 3D yazıcı kullanılarak ürettikleri grafit katkılı numunelerin elektromanyetik radyasyon zırhlaması üzerinde çalışma yapmış ve katkılanan polimer kompozitlerin radyasyon zırhlama açısından etkinliğinin arttığını ifade etmişlerdir (Viskadourakis vd., 2017). Literatürden özetlenen bütün çalışmalarda, katkılanmanın pozitif etkileri olduğunun ve polimer malzemelerin radyasyon zırhlama için önemli avantajlar sunacağına altını çizdiği söylenebilir. Ayrıca, 3 boyutlu yazıcıların radyasyon zırhlamada kullanılabilirliğine öncü olabilecek çalışmalar burada raporlanmıştır. Bu alanda literatürde çok az çalışma bulunduğu da altı çizilmelidir.

Bütün bunlara ek olarak, 3D yazıcıların sunacağı istenilen geometride ürün çıkarabilme kabiliyeti önemlidir. Bu çalışmada, ABS ve PLA malzemeleri polimer matris seçilmiş ve katkı malzemesi olarak ise nötron ile çeşitli etkileşimler yapan hafniyum elementi seçilmiştir. Ek olarak, radyasyon zırhlamada yaygın olarak kendisini (n, γ) vs gibi çeşitli etkileşimler ve etkin uzaklaştırma tesir kesiti nedeniyle nötronik zırhlama çalışmalarında yer edinen tungsten elementi de ikinci bir katkı maddesi olarak belirlenmiştir ve elde edilen polimer kompozitlerin nötron enerjisine ve malzeme kalınlığına göre nötron zırhlama kabiliyetleri GEANT4 ve FLUKA simülasyon programları kullanılarak belirlenmiştir. Ek olarak, hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesiti teorik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen polimer kompozitlerin nötron zırhlama için literatüre katkıda bulunması beklenmektedir.

2. TEORİK BİLGİ

2.1. Atom Tarihçesi ve Yapısı

M.Ö. 5. yüzyılda Demokritos Yunancada "atomus" 'dan yani bölünemez anlamına gelen atom fikrini öne sürmüştür. Daha sonraları 19. yüzyılın başlarında modern atom kavramını John Dalton ortaya atmıştır. John Dalton'un teorisinde madde tam sayılarla orantısal olarak etkileşime girdiği ve maddelerin atom olarak söylenilir ancak bölünemez parçalardan oluştuğunu belirtti. 19. yüzyılın üçüncü çeyreğinde Rus kimyacı Dmitri Mendeleyev o zamanlarda bilinen elementleri içeren bir periyodik tablo geliştirdi. Thomson 1897 yılında elektronu keşfetti ve 20. yüzyılın başlarında Ernest Rutherford günümüz atom modelinin temelini oluşturan yapıyı ileri sürdü. Rutherford'un atom modelinde; atomun kütesinin büyük bir kısmını oluşturan çekirdek ve bu çekirdek etrafında dönen elektronlar bulunmaktadır. Rutherford çekirdeği oluşturan bu pozitif yüklü parçacığa proton adını verdi. 1932 yılında James Chadwick elektrik yükü olmayan nötronu buldu ve aradan birkaç yıl sonra Nobel Fizik ödülünü aldı. Daha sonra kuantum teorisinin ışığında Niels Bohr, Bohr atom teorisini öne sürdü ve Bohr atom teorisinde elektronların belli yörüngelerde bulunabileceğini ve bunun Planck sabiti ile ilgili olduğunu belirtti (URL-1). Şekil 1'de atomun yapısı temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Atomun Yapısı (URL-2).

2.2. Atomun Nükleonları

2.2.1. Protonlar

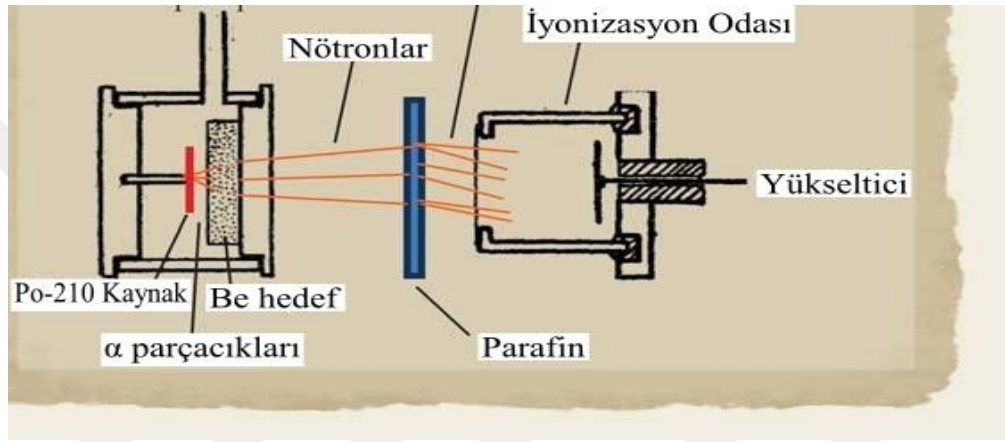
Atom çekirdeğini oluşturan en önemli öğelerden biri protondur. Pozitif elektrik yüklü taneciklerdir. Kütlesi elektronun kütlesinden yaklaşık 1840 katı kadardır ancak taşıdığı elektrik yükünün oranı elektronunki ile neredeyse aynıdır. Elementin çeşidine göre çekirdekdeki proton sayısı değişmektedir. Proton sayısı aynı zamanda elementin atom numarası demektir. Protonlar atomda oldukça küçük bir bölgede birbirlerine yakın bir noktada birbirlerini iterek bulurlar bu yüzden protonları birlikte tutan çekim kuvvetleri vardır ve bu kuvvete çekirdek kuvveti denir.

2.2.2. Nötronlar ve Keşfi

19. yüzyılın sonlarında Henry Becquerel'in Uranyum tozu tarafından saçılan ışınımın keşfiyle radyoaktivite hakkında bilimsel çalışma başlamış ve ardından Curie çiftlerinin Radium ve Polonyum elementinin radyasyon yaymasıyla birçok radyoaktif element ortaya çıkmıştır. Zamanla radyasyon kaynakları çeşitli amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. Ernest Rutherford, Hans Geiger ve Ernest Marsden'in altın folyo deneyine dayanan atomun saf bir modelini geliştirmişlerdir. Bu modelde atomların pozitif elektrik yükleri ve kütleleri çok küçük bir miktar çekirdekte yoğunlaştığı ifade edilmiştir. 1920 yılına gelindiğinde kimyasal izotoplar keşfedilmiş, atom kütlelerinin hidrojen atomunun kütlesinin (yaklaşık olarak) tamsayı katları olduğu belirlenmiş ve atom numarası çekirdek üzerindeki yük olarak tanımlanmıştır. O zamanlar çekirdek için iki temel parçacık olan proton ve elektron kombinasyonlarından oluşmuş olduğu ifade ediliyordu ancak bu model birkaç deneysel ve teorik çelişkiyi de ortaya sunmaktaydı (Pais, 1986).

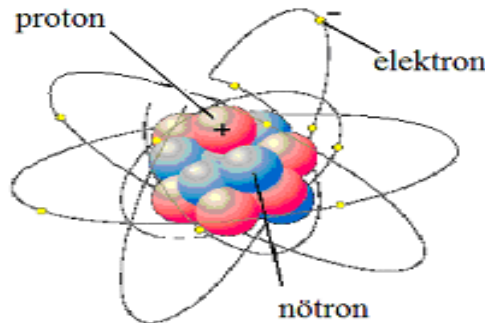
W. Bothe ve H. Becker 1930 yılında, radyoaktif element olan polonyumdan hızla çıkan alfa parçacıklarına berilyumu bombardıman bir şekilde göndererek delici fakat doğrudan iyonlaştırmayan bir ışınım elde ettiler. Bu ışınlara ilk olarak X ışını ya da gama ışınları gibi elektromanyetik ışın olduklarını düşündüler. Ancak deneylerinden bir yıl sonra Curie ve Juliot, Polonyum kaynağından çıkan α parçacıklarını bir Berilyum (Be) parçası üzerine düşürüp arkasına da parafin wax levhası yerleştirdiler. Bu ışınların parafine nüfuz ederken iyonizasyon akımını artırdığını fakat parafin levhası yerine farklı metal levhalar yerleştirdiklerinde akımın değişmediğini fark ettiler ve bunun sonucunda parafinde yüksek enerjili protonlar oluştuğunu ve bundan dolayı da iyonizasyon akımının artmasına neden olduğu şeklinde yorumladılar. Compton saçılmasında elde edilen denklemlerden

faydalanan bu derece yüksek enerjili bir proton çekirdekten koparabilmek için en az 52 MeV'lik bir gama ışını olacağını hesapladılar. Bothe ve Becker çalışmasından iki yıl sonra, Chadwick berilyum ışınlarını parafin hariç diğer maddelere yöneltmek araştırmaya başladı ve bu ışınlarla maruz kaldıklarında çalışmada kullanıldığı maddelerin çekirdeklerinde de geri teptiklerini gözlemledi. Geri tepen çekirdeğin atom ağırlığı arttıkça geri tepme hızının ters orantı olduğunu elde etti ve böylece berilyum ışınlarının elektromanyetik ışıma yapmadığı şeklinde yorumlanmasına neden oldu. Chadwick yaptığı çalışmalar sonunda, bu berilyum ışınına kütlesi protonunkine neredeyse aynı ancak yüksüz bir parçacık olan nötron ismini verdi.



Şekil 2. Chadwick Alfa Parçacıklarını Soğurma Düzeneği (URL-3).

Nötronun keşfi 20. yüzyılın başlarında atom fiziğinin zirvelerinde yer almıştır. Ernest Rutherford, Hans Geiger ve Ernest Marsden'ın altın folyo deneyine dayanan atomun saf bir modelini geliştirmişlerdir. Bu modelde atomların pozitif elektrik yükleri ve kütleleri çok küçük bir miktar çekirdekte yoğunlaştığı belirtilmektedir. Şekil 3'te atomun temsili resmi ve Tablo 1'de nötronun temel özellikleri belirtilmektedir.



Şekil 3. Atomdaki Nötron, Proton ve Elektronlar (Aygün, 2010).

Tablo 1. Nötronun Özellikleri

Keşfi	James Chadwick (1932)
Kütle (akb)	1,008982
Kütle(kg)	$1,674.10^{-27}$ kg
Yük	0
Spin	1/2
Yaşam süresi	887 saniye
Asal Bozunma denklemi	p^+, e^+
Çap	$1,45.10^{-13}$ cm
Manyetik dipol Moment	$\mu_N = -1,935 \text{ J.T}^{-1}$
Anti Parçacığı	Anti-nötrino
Yarılma ömrü	$t_{1/2} = 615$ saniye

Kaynak: Korkut, (2010).

Tek protondan oluşan Hidrojen atomu hariç tüm atomlarda nötron bulunur. Atomların çekirdeklerinde bağlı durumda olan nötronlar karardır. Çekirdekdeki nötronlar çekirdek içinde güçlü çekim kuvvetlerinin oluşmasına katkıda bulunur. Nötronlar atomda yapıştırıcı muhakemesi gibidir. Çoğu çekirdek reaksiyonları ürün olarak serbest nötron yayımlar ve fisyon olayı (çekirdek bölünmesi), parçacık hızlandırıcılar gibi bir birçok alanda kullanılmaktadır. Tablo 2’de nötronun kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 2. Nötronların Kullanım Alanları

Fizik ve Kimya araştırmalarında	Yüksek enerjili plastik üretiminde
Tıbbi tanı malzemelerinde	Hızlandırıcı Sürümlü Sistemler (ADS)
Süper iletken üretiminde	Uzay araştırmalarında
Kanser tedavisinde	Nötron aktivasyon analizinde
Hidrojen atomlarının moleküllerdeki yerinin belirlenmesinde	Medikal izotop üretimi

Nötronlar yüksüz olduklarından proton gibi yüklü parçacıklar gibi hızlandırılmaz ancak

enerjileri maddedeki atomlar ile çarpışmalar sonucunda azaltılabilir. Nötronlar enerji, dalga boyu ve uygulama alanlarına göre Tablo 3'te gösterilebilir.

Tablo 3. Son Nesil Kaynakların Özelliklerini Kapsayan Genel Kabul Görmüş Nötron Enerji Aralıkları

Nötron Çeşidi	Nötronun enerji aralığı (eV)	Nötronun Dalga boyu (Å)	Moderatör Sıcaklığı (K)	Uygulama Alanları
Ultra soğuk nötron	$<3 \times 10^{-7}$	≥ 500	≈ 5	Nötronların temel özellikleri Ultra düşük açılı saçılma
Çok soğuk nötron	$3 \times 10^{-7} - 10^{-4}$	30–500	5–20	Spektroskopi ve süper moleküler yapılar
Soğuk nötronlar	$10^{-4} - 0,005$	4-30	20-100	Yüksek çözünürlüklü spektroskopi
Termal Nötronlar	0,005-0,1	1-4	120-300	Spektroskopi kırınımı
Epitermal Nötronlar	0,1-1	0.3-1	300	Yüksek enerjili spektroskopi
Resonans nötronlar	1-100	0.03-0.3	300	Yoğun inelastik saçılma
Orta düzey nötronlar	$100 - 10^5$	$9 \times 10^{-4} - 0.3$		Atomik fizik, Cihaz ışınlanması
Hızlı nötronlar	$10^5 - 10^7$	$9 \times 10^{-5} - 9 \times 10^{-4}$		Nükleer Fizik
Ultra Hızlı nötronlar (rölativistik)	$10^7 -$	$9 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$		Hadron fiziği

Kaynak: Alonso & Price, (2013).

Nötron ışınları yüksüz olduklarından dolayı maddenin derin noktalara kolayca nüfuz edebilir. Nötronlar hafif çekirdeklerle çarpışırlarsa yavaşlayabilirler. Nötronlar geçtikleri maddeden nükleer reaksiyonlarla yavaşlar ve enerjisi zamanla yok olarak soğurulur. Hızlı nötronlar proton, alfa veya 2 nötron şeklinde reaksiyonlar meydana getirebilirler ve daha

sonrasında da yavaşlar. Benzer şekilde termal veya yavaş nötronlar, maddede elastik ve elastik olmayan etkileşmelerle yakalanıp soğurulabilirler.

$$dI(x) = -\Sigma_t I(x) dx \quad (2.1)$$

Burada I alan başına geçen nötron sayısını ifade eder. Birimi (nötron/cm²s) Σ_t makroskobik toplam tesir kesitidir ve malzemenin toplam tesir kesiti ile tanecik sayısının çarpımıdır. Toplam tesir kesiti soğurma, saçılma, uzaklaştırma gibi tüm etkileşimlerinin toplamıdır ve her malzeme için değişir. Soğurma tesir kesiti fisyon, (n, γ) , (n,2n) , (n,p), (n, α) gibi etkileşimler iken saçılma tesir kesiti elastik ve elastik olmayan etkileşimlerdir. Birimi cm⁻¹'dir.

Gelen radyasyon şiddetini yarıya indiren soğurucu maddenin kalınlığına yarı kalınlık değeri (YKD), onda birine indiren kalınlığa onda-bir kalınlık değeri (OKD) denir. YKD ve OKD sırasıyla $\ln 2/\Sigma_t$ ve $\ln 10/\Sigma_t$ olarak tanımlanır. Denklem (2.1) her iki tarafını alan başına geçen nötron sayısına ("I") bölersek;

$$\frac{dI}{I} = -\Sigma_t dx \quad (2.2)$$

Denklem (2.2) her iki tarafın kendi bileşenlerine göre integrali alınırsa;

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^x \Sigma_t dx \quad (2.3)$$

Denklem (2.3) integral sınırları yazılıp çözümlenirse;

$$\ln(I/I_0) = -\Sigma_t x \quad (2.4)$$

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t x} \quad (2.5)$$

elde edilir. Burada I_0 kaynaktan gelen yani soğurucu malzeme olmadan gelen ilk radyasyon şiddetidir. I engel tarafından zayıflatılmış radyasyon şiddeti ve birimi etkileşim/cm²s, x de malzemenin kalınlığıdır. Bu soğurma esnasında düşük enerjilerde ya da değişik tesir kesitine sahip nötronlar oluşabilir.

Nötronlar madde ile etkileştiklerinde iki parametre söz konusudur. Bunlar mikroskobik ve makroskobik tesir kesiti parametreleridir. Nötronların parçacık veya çekirdeklerle etkileşimi ihtimali nötron mikroskobik tesir kesiti olarak isimlendirilir. Soğurma ve saçılma olmak üzere iki gruba ayrılır. Makroskobik tesir kesiti ise mikroskobik tesir kesiti ile elementin veya bileşiğin hacim başına atom ya da molekül sayısına çarpımıdır. Nötron parçacıklarının madde içerisinde yaptığı iki çarpışma arasındaki mesafe olan ortalama serbest yola bağlıdır ki bu da zırhlamada önemli parametredir. Radyoaktif kaynaktan salınan hızlı nötronların yavaşlatılması elastik ve elastik olmayan saçılma ile sağlanır. Demir-56 ve daha yüksek atom numarasına sahip olan elementler elastik olmayan

saçılmalarda oldukça etkilidir ve nötronik zırhlamalarda demir ve baryum taşıyan harç agrega kullanılır. Hafif elementler ise bilardo etkileşimi gibi elastik saçılmalarda etkindirler. Bu nedenle nötronlar en düşük atom numarasına sahip olan hidrojen saçılmaları nötronik zırhlama açısından açık ara en iyisidir.

2.3. Nötron Kaynakları

2.3.1. Alfa-Nötron Kaynakları

Birçok kompakt laboratuvarında alfa-nötron kaynağı kullanır. Enerjik alfa parçacıkları çeşitli radyoizotopla uygun şekilde (α, n) reaksiyonlarını indüklemek için yayıcılar ve dönüştürücüler geliştirilmiştir. Yeterli enerjiye sahip alfa parçacıklarına hedef çekirdekler bombardıman edilir ve eğer potansiyel engelleri aşabilirse sadece daha hafif çekirdekler nüklid sayısı nötron yayar. Özellikle durulması gereken çekirdekler lityum, berilyum, bor, karbon, flor ve sodyum hafif izotoplardır. Tablo 4'te bağlı şiddet yoğunluğuna bağlı (α, n) kaynaklarının çeşitleri verilmiştir.

Tablo 4. Hafif Çekirdeklerden (α, n) Tepkimesi Q Değeri ve Nötron Verimi

Hedef	Reaksiyon	Q değeri (MeV)	10^6 α parçacığı başına nötron verimi
Doğal Berilyum	$^{10}\text{Be} (\alpha, n)$	+ 1,07	$^{241}\text{Am}-\alpha$ parçacığı için 13
Berilyum	$^{11}\text{Be} (\alpha, n)$	+ 0,158	$^{241}\text{Am}-\alpha$ parçacığı için 13
Flor	$^{10}\text{F} (\alpha, n)$	- 1,93	$^{241}\text{Am}-\alpha$ parçacığı için 4,1
Karbon-13	$^{13}\text{C} (\alpha, n)$	+ 2,2	$^{241}\text{Am}-\alpha$ parçacığı için 11
Berilyum	$^9\text{Be} (\alpha, n)$	+ 5,71	$^{241}\text{Am}-\alpha$ parçacığı için 13

Kaynak: Topal, (2019).

2.3.2. Fotonötron Kaynakları

Yeterince büyük enerjiye sahip (yaklaşık 7 MeV) bir gama fotonu nötron bağlanma enerjisinin üstesinden gelmek için (γ, n) reaksiyonuna neden olabilir. Yoğun ve enerjik bir foton hedef malzemede bremsstrahlung (frenleme) olayı yaparak nötron üretimi bir elektronda da gerçekleştirilebilir. Fotonun (γ, n) reaksiyonu neden olma olasılığı enerjisiyle artar.

2.3.3. Aktivasyon Nötronlar

Oldukça kararsız birkaç nüklid, bir nötron emisyonu ile bozunur. Aktivasyon nötronlar fisyon bağlantılı olan gecikmiş nötronlardan kaynaklanır. Bununla birlikte, fisyon ürünü bozunma zincirindekiler dışında nötron emisyonu ile bozunan nüklidler de vardır.

2.3.4. Kendiliğinden Fisyon

Kaliforniyum-252 izotopu 2,65 yılda kendiliğinden fisyonla uğrayarak yaygın şekilde nötron kaynağı olarak kullanılır. Nükleer reaktörlerdeki nötronlar ise doğrudan fisyon reaksiyonu sonucu elde edilir. Bozunumlarının sadece %3 nötron kalanı ise α bozunumudur.

2.3.5. Nükleer Reaksiyonlar

Nötronlar çeşitli reaksiyon şekillerinde elde edilebilir. Nötron üreten parçacık hızlandırıcılarla da üretilebilir ancak reaksiyonun başlatılması için yüklü parçacıkların hızlandırılması gerekmektedir. Ancak bu radyoaktif bozunma kaynaklarına nazaran kullanışlı değildir. Genelde aşağıdaki nükleer reaksiyonlar kullanılır:



2.3.6. Reaktörler

Nükleer reaktörde fisyon sonucu saniyede yaklaşık 10^{14} nötron, enerjileri de 5-7 MeV enerji aralıklarında nötron açığa çıkmaktadır. Bu nötronları su gibi malzemelerde yavaşlatılarak çeşitli enerjilerde elde edilebilir. Enerjisi azalan nötron termal nötrona dönüşürse Uranyum veya Toryum fisil (bölünebilen) izotoplarında tesir kesitlerinden dolayı fisyon yaparak enerji elde edilir. Ayrıca bu elementlerin fertil (doğurgan) izotopları da hızlı nötron enerji seviyesinde nükleer reaksiyon yaparak enerji üretilmektedir. Şekil 4'te elektrik üreten nükleer santral gösterilmiştir.



Şekil 4. Nükleer Santral (URL-4).

2.4. Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye sınıflandırılabilir.

Tablo 5. Radyasyon Çeşitleri

RADYASYON ÇEŞİTLERİ		
İYONLAŞTIRICI RADYASYON		İYONLAŞTIRICI OLMAYAN RADYASYON
Hızlı elektronlar Beta parçacıkları Alfa parçacıkları	X-ışınları Gama ışınları	Radyo dalgaları Mikro dalgalar Görülebilir ışık
Dolaylı iyonlaştırıcı nötron parçacıkları		

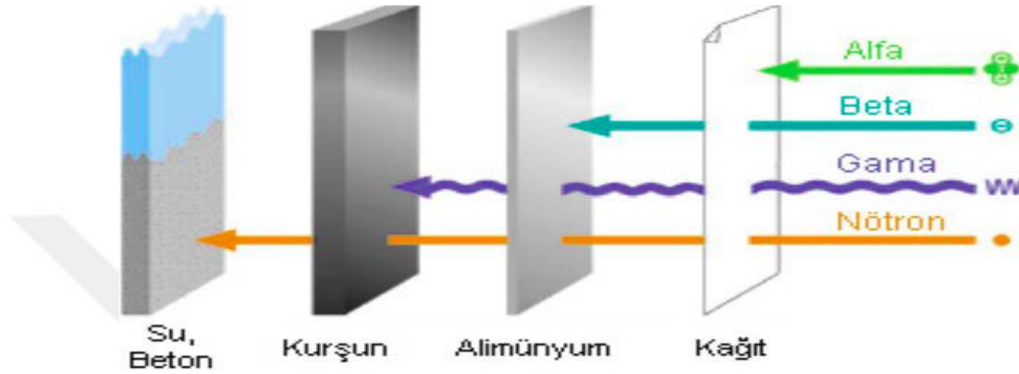
Kaynak: Podgorsak, (2008).

2.4.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Büyük dalga boylarına ve dolayısıyla düşük enerjilere sahip olduklarından etki ettiği maddedeki atomdan veya molekülden herhangi bir elektron koparacak kadar enerjiye sahip olamayan bu yüzden iyonlaşma etkisi oluşturmeyen ve sadece dalga biçiminde bulunan elektromanyetik dağılımda belirli enerjide yer alan radyasyonlardır.

2.4.2. İyonlaştırıcı Radyasyon

Madde ile etkileştiğinde etki ettiği atomdan elektron koparmak için yeterince enerji sahip iyonizasyon meydana getiren elektrik yüklü parçacıklar veya iyonlardır. Alfa, beta, nötron parçacıkları ve gama ışını iyonlaştırıcı radyasyonun bir çeşididir. İyonlaştırıcı radyasyon giriciliklerine göre de farklılık teşkil etmektedir. Bu parçacıklar ve ışının giriciliği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Giriciliklerine Göre İyonlaştırıcı Radyasyonlar (Ertuş, 2014).

2.5. Radyasyondan Korunma Yolları

Günlük yaşantımızda gerek teknolojik gerekse doğal etkileşimler sonucu radyasyona maruz kalmaktayız. Radyasyonun tıpta teşhis ve tedavi, reaktörlerde elektrik, tarım, sanayi gibi alanlarda lokal bölgede kısmi faydaları bilinmekte olup radyasyondan korunma önemli bir görevi teşkil etmektedir. Bu yüzden radyasyondan korunma oldukça önemlidir. Radyasyondan korunma radyasyonun çeşidine enerjisine göre de farklılık arz etmektedir. Gama ve X-ışınlarını kurşun ve kurşun kompozitli malzemeler daha iyi absorbe ederken nötron zırhlama için hidrojen miktarı fazla olan su ve parafin gibi malzemeler kullanılır. Bu yüzden radyasyon için önlemler radyasyonun nüfuz etme süresine, radyasyon kaynağına olan mesafeye ve kaynağın şiddeti ve türü gibi değişkenler belirleyici bileşenlerdir. Radyasyon ile maruz kalma süresi doğru orantılıdır yani ne kadar az radyasyona maruz kalınırsa o ölçüde az doz alınmış olur. Radyasyon mesafeye de ters orantılıdır. Radyasyon kaynaklarından korunmak için üç temel unsur vardır.

2.5.1. Zaman Kuralı

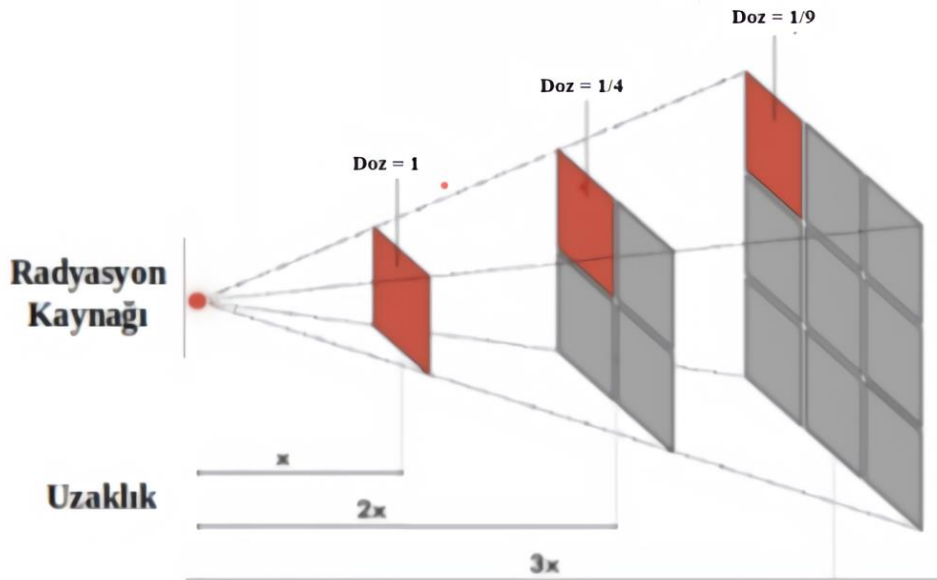
ALARA (As Low As Reasonably Achievable) adı verilen mümkün olduğunca az radyasyon almayı güden mesafe, zaman ve zırlama konularını içeren en basit kuraldır. Maruz kalınan süreyi minimum düzeye indirerek alınan doz miktarını azaltmayı amaçlar (EPA, 2018).

$$\Delta X = \Gamma \frac{A}{r^2} \Delta t \quad (2.10)$$

Burada, A kaynağın aktivitesi, r mesafe ve Γ gama ışını sabitidir.

2.5.2. Mesafe Kuralı

Radyasyon yayan bir kaynağın şiddeti mesafe ile ilişkilidir. R yarıçaplı kürenin merkezinde belirli sayıda ışın yapan bir kaynak kürenin yüzeyinde alan başına saniyede geçen parçacık sayısı (akı) kaynaktan olan uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Bu durum ters kare kanunu olarak bilinen aşağıdaki denklem ile verilir. Yüklü olan α ve β parçacıkları havada nüfuz ederken ortalama serbest yol menzili çok kısadır. Yüksüz olan nötron parçacığı ve γ fotonu ise çok daha uzun mesafe yol alabilirler ancak şiddetlerinde azalma görülür. Radyasyon mesafe ile ters orantılıdır.



Şekil 6. Mesafe ve Radyasyon Dozu Arasındaki İlişki (URL-5).

$$D = A / R^2 \quad (2.11)$$

Burada D doz eşdeğeridir. A kaynağın aktivitesi ve R mesafedir.

2.5.3. Zırhlama Kuralı

Radyasyondan korunmak için radyasyona maruz kalan canlı ile kaynağın, bir blok yardımıyla radyasyonu önlemek veya minimum doz mertebelerine düşürme işlemine zırhlama denir. Zırhlamanın yapıldığı radyasyon miktarını azaltan malzemeye zırhlama malzemesi denir. Zırhlamada yığılma faktörleri (build-up factors) ayrıca ele alınması gereken parametrelerdendir. Bu yığılma faktörleri parçacığın akısına, enerjisine ve belirli enerji aralığındaki kütle azaltma katsayısına bağlıdır. Buradan kütle azaltma katsayısı (μ/ρ) ve birimi (cm^2/g) dir. Kütle azaltma katsayısında ρ yoğunluk iken μ lineer zayıflatma katsayısıdır. Lineer zayıflatma katsayısı gama zırhlamada kullanılır. Bu işlevi nötron zırhlama içinde geçerli kılabiliriz. Ancak nötronik zırhlamada lineer azaltma tesir kesiti yerine makroskobik uzaklaştırma tesir kesiti olarak ele alabiliriz. Nötronik zırhlamada durulması gereken bir başka nokta ise ortalama serbest yol parametresidir. Bu parametre nötronun etkileşmeden ilerlediği mesafedir ve tesir kesiti ile ilişkilidir. Zırhlamada kullanılacak malzeme radyasyonun çeşidine göre de değişiklik gösterebilir. Örneğin gama zırhlamada genelde ağır metaller kullanılırken nötron zırhlamada geçiş metalleri ve içerisinde hidrojen bol olan malzeme kullanılır. Hidrojen elementinin nötronik zırhlamada açısından önemli olmasının nedeni nötronunun olmaması ve tek protonunun bulunması etkileşecek olan nötron ile yaklaşık eşdeğer kütle sahip olması sebebiyle esnek saçılmayı oluşturması ve buda daha etkin olmasına sebep olmaktadır. Radyasyondan korunmada en büyük pay zırhlamaya düşmektedir. Çünkü mesafe ve zaman daha çok kaynaktan yayılan nötron sayısını değiştirmezken zırhlama uygun materyal oluşturarak radyasyonu minimum seviyeye indirilebilir. Bu yüzden zırhlama yapılacak materyalin içerisindeki elementlerin gönderilen radyasyon ile yaptığı çarpışmalar önem teşkil etmektedir.

2.6. 3D Yazıcılar ve Filamentler

2.6.1. 3D Yazıcılar

Üç boyutlu (3D) baskı, bilgisayar destekli tasarım programlarında (Autocad, Solid Work, vb.) ya da 3D tarayıcılar yardımıyla nesnenin 3D tasarım modeli oluşturulmuş parçanın katı formda basılması işlemidir. 3D maddesel çıktı, nesneyi oluşturan iki boyutlu katmanların üst üste tamamlanmasıyla meydana gelir. Bu işlemi gerçekleştiren makinelere 3D yazıcılar adı verilmektedir. Günümüzde 3D baskılar, birçok türde hammaddenin kullanımı ile yapılabilmektedir. 3D baskı teknolojilerini birbirinden ayıran temel şey bir nesneyi oluşturan katmanların işleme yöntemleri ve kullanılan hammaddedir. Bazı 3D baskı yöntemlerinde nesne katmanları oluşturmada hammaddeyi eriterek veya yumuşatarak kullanırken, diğerleri lazer veya UV (Ultraviyole) ışık kaynağı kullanarak foto-reaktif bir reçineyi tabaka-tabaka sertleştirerek oluşturur. ASTM (Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu) grubu tarafından, eklemeli üretim işlemlerini standart terminolojiye göre kategorilere ayırmıştır. ASTM'ye göre 3D baskı teknolojileri malzeme ekstrüzyonu, toz yatak füzyonu, bağlayıcı jeli ve kazan fotopolimerizasyonu gibi çeşitli 3D baskı teknikleriyle biyolojik olmayan inert dokular, sentetik ve doğal polimerler, doğal ve inorganik seramik malzemeler ya da yeni geliştirilmiş biyolojik olarak parçalanabilen biouyumlu ve bioemici malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Son yıllarda en çok tercih edilen 3D yazıcılar FDM (Eklemeli üretim), SLS (Seçici Lazer Sinterleme), SLA (Stereolitografi), DLP (dijital ışık sistemi), SLM (Seçici Lazer Eritme) ve EBM (elektronik ışın eritme) baskı yöntemlerini kullanan yazıcılardır (Chua vd, 2010; Ngo vd, 2018; Aguilar-Duque vd, 2018; Camargo vd, 2019).

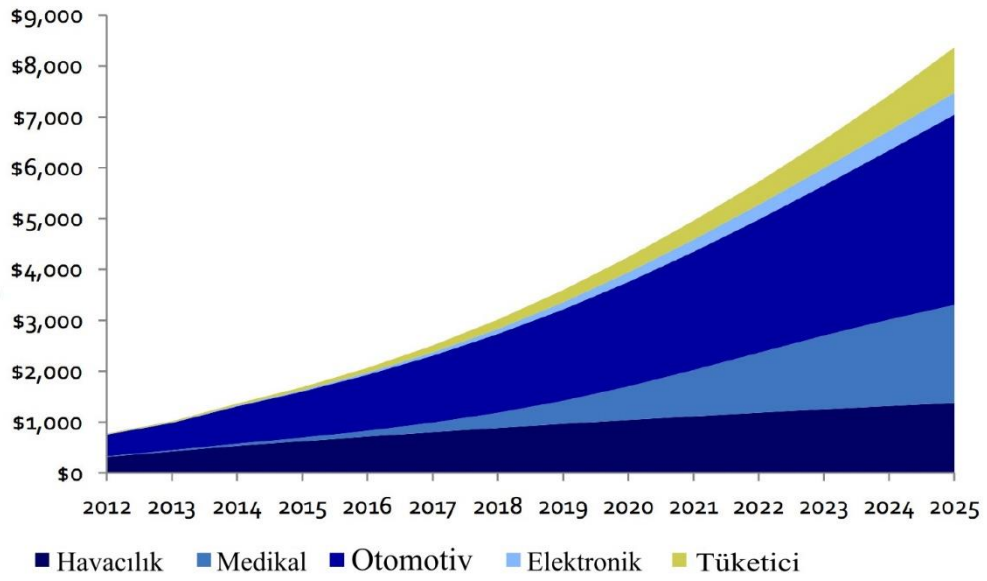
En popüler katkı üretim tekniklerinden biri olan FDM, tıbbi protezler, otomotiv ve havacılık gibi çeşitli endüstrilerde kapsamlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak, FDM yöntemi ile imal edilmiş parçaların iç boşlukları ve gözenekli yapılar oluşturmada mekanik özelliklerin potansiyel düşüşüne neden olabilmektedir. Buna rağmen, 2018 yılında yapılan 3D pazar araştırmasına göre 3D yazıcılar içerisinde en fazla paya sahip FDM baskı teknolojisi olmuştur.

FDM baskı teknolojisi birçok iş kolunda aktif olarak kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi 3D yazıcı fiyatları ve 3D baskı maliyetleridir. Eklemeli imalat metodunu kullanan 3D yazıcılar, geleneksel yöntemlerdeki kesme ve düzenleme gibi son işlem çalışmalarını ortadan kaldırırken, bu yöntemle çok çeşitli geometrik şekiller üretilmektedir. Prototip

üretimi ya da hızlı prototipleme için farklı malzeme ve geometrik özellikler dikkate alındığında, kullanılan 3D yazıcı teknolojileri de değişmektedir. 3D yazıcı teknolojisinde en çok eriyik yığılma modelleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu metotta filament hammaddesi olarak termoplastikler kullanır ve katman-katman eriyik termoplastığının biriktirme prensibine dayanarak çalışır. Günümüzde uygun fiyat ve kolay üretilebilirlik avantajlarından polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadiyen stiren (ABS) ve poliamid (PA) en çok kullanılan polimerlerdir. Katkı maddesi üretimi (genellikle 3D baskı olarak bilinir), çıkartıcı üretim metodolojilerinin aksine bir 3D nesne oluşturmak için malzemeleri biriktiren ve birleştiren bir teknoloji ailesi olarak tanımlanır (Wang vd, 2019).

Eklemeli üretim olarak da bilinen 3D baskı; ürün geliştirme döngüsünü kısaltmak, küçük parti boyutlarda üretme esnekliğini yakalamak ve fiziksel modellerin karmaşık geometrik yapıların yüksek doğruluk ve düşük maliyetli üretimini sağlayan gelişmiş bir üretim teknolojisidir. Üç boyutlu baskı, mikro ölçeklerde tekrarlanabilirliği ve yüksek doğruluğu nedeniyle mühendislik doku yapıları oluştururken tercih edilir. ABD’de 3D baskı ve katkılı üretim alanında ilk üretim enstitüsünün (Ulusal Katkı Üretim İnovasyon Enstitüsü) kurulmasıyla, biyolojik araştırmalarda 3D baskının kullanımı artmıştır. Son dört yılda, bioyazıcı teknolojisi ve araştırmaları olumlu yönde etkileyen çok büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. O zamandan bu yana, dünya çapında çığır açan teknolojilerin ticarileştirilmesi için çeşitli şirketler kurulmuştur. Yeni nesil bioyazıcılar ile hibrid vaskülarize doku baskısında yeni yaklaşımlar ölçeği büyüten dokular, klinik olarak ilgili boyutlardaki dokular ve sonuç olarak bütün organ baskısı oluşturmak için teknolojiyi daha da ileriye taşıyacaktır (Ozbolat vd, 2014).

3D yazıcı piyasası inanılmaz derecede ilerlemektedir. 2018 yılı rakamlarına göre 3D yazıcı pazarı 8,5 milyar dolarlık bir pazara sahip olmuşken, 2026 yılına kadar bu pazarın yaklaşık 51,7 milyar dolara ulaşması tahmin edilmektedir. Benzer şekilde üç boyutlu yazıcılarda kullanılan polimer filament kullanımı ise 2018 yılında 1,3 milyar dolara ulaşmış ve bu kullanımın ise 2023 yılına kadar 4,4 milyar dolar olması tahmin edilmektedir. Ancak bu kullanımın sadece bireysel kullanım olarak değerlendirilmemesi gerekir. Şekil 7’de görüldüğü üzere bu rakamların içinde medikal, otomotiv, askeri, tüketim malları gibi birçok sektör dâhil edilmiş durumdadır.



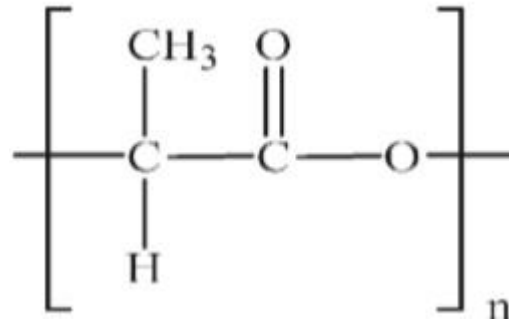
Şekil 7. 2012-2025 Aralığında 3D Baskı Pazarı (Olam, 2021).

Baskı yöntemini kullanan 3D yazıcılar hammadde olarak polimer esaslı filament (PLA, ABS, PETG, vb.) kullanmaktadır. Kullanılan bu filamentlerin kullanım alanlarına göre kendine özgü avantaj/dezavantajları mevcuttur. FDM 3D yazıcılarda kullanılan malzemelerin basılabilirliğinin ve özelliklerinin iyileştirilmesi, bu yazıcıların inkjet yazıcılar gibi ortak bir ürüne dönüştürülmesinde önemli ölçüde yardımcı olacaktır. Ancak günümüzde birçok alanda kullanılan filamentler yalnız başlarına sergiledikleri özellikler, çoğu uygulamaların taleplerini karşılamamaktadır. Bu uygulama alanlarında istenilen özellikleri karşılayan FDM tabanlı üretilmesi için birden fazla malzemenin kendine göre üstün tarafları göz önüne alınarak bir arada tek filament olarak üretilebilmektedir. Bu tip kompozit filamentler FDM teknolojisi kullanılan 3D yazıcıların kullanımını daha da artırmaktadır. Nötronik zırhlamada bu tip kompozit filamentler göz önüne alınarak uygun alaşımlarla simüle hedeflenmektedir.

2.6.2. PLA (Polilaktik Asit)

PLA'nın evrimi, 1893'te Bischoff ve Walden tarafından laktik asit formülasyonu ile başlamış ve daha sonra 1932'de Carothers ve işbirlikçileri tarafından düşük moleküler ağırlıklı PLA üretmişlerdir. İlk olarak, tıbbi uygulamalarda PLA pazarlaması başladığı bilinmektedir. PLA, alifatik polyester ailesinin bir üyesidir. Biobozunur termoplastik, yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü bir polimerdir. PLA'nın kurucu birimi laktik asittir. PLA'nın stereoizomerleri olduğu için -L ve -D laktik asit olmak üzere iki

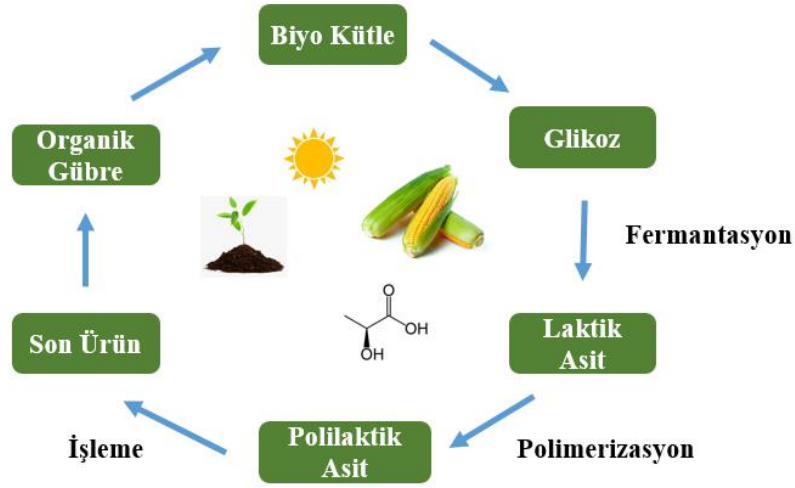
enantiyomeri vardır; poli(L-laktit) (PLLA), poli(D-laktit) (PDLA) ve ayrıca poli (DL-laktit) (PDLA).



Şekil 8. PLA'nın Yapısı (Boyacıoğlu, 2017).

PLA'nın temel yapı taşı olan laktik asit ($\text{CH}_3\text{-CHOHCOOH}$), fermantasyon veya kimyasal sentez yoluyla üretilebilir (Lim vd, 2008).

Laktik asidin büyük bir çoğunluğu (neredeyse %90) kimyasal yol yerine fermantasyon mikrobiyal tarafından üretilir. Kimyasal işlem, bir ürün olarak laktik asidin rasemik karışımı gibi dezavantajlar sunarken, fermentatif üretim, saf L- veya D-laktik asit sağlar. Ayrıca, fermantasyon yöntemi destekler yenilenebilir hammaddelerin bir glikoz kaynağı olarak kullanılması sağlar (Adsul vd, 2007). Laktik asit, şeker kamışı, patates, mısır vb. gibi yenilenebilir hammaddelerden glikozun fermantasyonundan üretilebilir. Bu nedenle PLA, geleneksel petrol bazlı plastikler yerine çevre dostu plastik malzemedir (Farah vd, 2016). Laktik asit, mısır, patates gibi doğal olarak birçok gıdada veya süt, yoğurt vb. gibi mikrobiyal fermantasyonun bir çıktısı olarak bulunur. Ek olarak, laktik asit çoğu canlı organizmanın metabolizmasının doğal bir ürünüdür (Datta & Henry, 2006). Bir alifatik polyester olan PLA, sahip olduğu avantajlar sayesinde günlük hayatımızda kullanılan polyolefin gibi petrol türevli polimerlerin oluşturduğu problemlere karşı bir çözüm sunabilmektedir. PLA'nın biyolojik sıvılar ile teması 1970'li yıllarda Amerikan Gıda ve İlaç Kurumu (FDA) tarafından onaylanmıştır. PLA'nın diğer polimerlere göre avantajlarından en önemlileri; biobozunurluğu, yenilenebilirliği, biouyumluluğu ve kolay işlenebilirliği olarak sıralanabilir (Rasal, 2010).

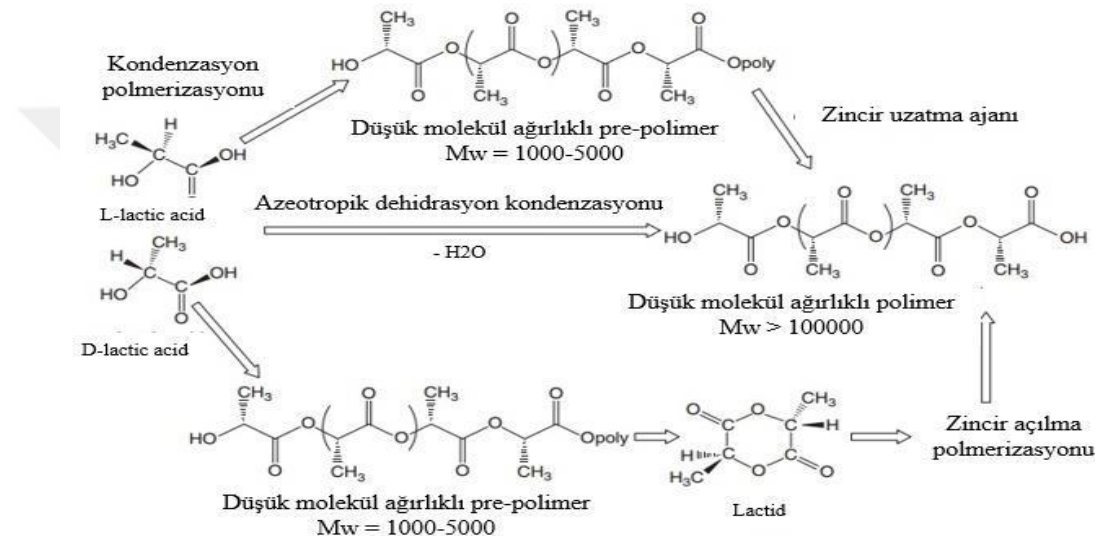


Şekil 9. PLA'nın Üretiminden Geri Kazanılmasına Kadar Olan Yaşam Döngüsü (Auras vd., 2004).

Özellikle, PLA'nın organik maddelerden (mısır ve pirinç gibi) yenilenebilir kaynaklardan üretilabilir olması petrol bazlı ürünlere talebi düşürerek mevcut enerji krizlerine çözümüne eşdeğer olarak görülmektedir. Bu polimerin doğada biobozunması sonucunda karbondioksit ve su açığa çıkararak insan sağlığına olumsuz veya toksik zehirler gibi bir etkisi bulunmamaktadır. PLA'nın diğer polimerlerden önemli bir farkı da adındanda anlaşılacağı üzere çok yönlü işlenebilirliğinin olmasıdır. Dökme film, ekstrüzyon, şişirme ve lif çekme gibi yöntemler ile işlenebilmesi onu PEG, PHAs ve PCL gibi diğer biopolimerlerden ayırmaktadır (Rhim vd., 2006).

PLA, diğer polimerlere göre bazı avantajları olan bir polimerdir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen çevre dostu bir polimerdir. Sonuç olarak, PLA üretimi sırasında CO₂ tüketilir. Bunun yanında çok daha az petrol bazlı polimerlere kıyasla PLA üretmek için enerji gereklidir. Aynı zamanda biyolojik olarak parçalanabilirlik, geri dönüştürülebilirlik ve biouyumluluk özelliklerini de taşır. Diğer bazı biopolimerlere göre daha iyi ısı işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Mekanik özellikleri bazı uygulama alanları için yeterince uygundur. Yüksek modül ve yüksek mukavemete sahiptir. Fakat bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. PLA, kırılgan özelliği nedeniyle düşük tokluğa sahiptir ve bu da bazı alanlarda sınırlı kullanım sağlar. Darbe dayanımı zayıf olmasının yanı sıra 60 °C de düşük ısı sapma sıcaklığı ve kolay alev alma özelliğine sahiptir (Lin vd, 2014). Ayrıca PLA düşük erime mukavemeti ve yavaş kristalleşme hızı gösterir ve böylece yavaş bozunma özelliği olan PLA, biyomedikal uygulamalarda kullanımını sınırlar (Tüccar Kılıç, 2019).

PLA'nın sentezi, laktik asidin üretimi ile başlayıp polimerizasyonuna kadar süren prosestir. PLA sentezinin 3 farklı metodu vardır. Birinci yöntem, molekül ağırlığı düşük, kırılğan ve kullanıma elverişsiz bir polimerin laktik asit ile kondenzasyon polimerizasyonu oluşturarak sentezlenmesidir. Fakat bu yöntemde dışarıdan dâhil edilen bir bağlayıcı yardımıyla molekül ağırlığı yüksek ve uzun zincirli bir polimer elde edilir. İkinci yöntem ise laktik asidin azitropik dehidratif kondenzasyonudur. Bu yöntem ile herhangi bir zincir uzatıcıya gerek kalmadan yüksek molekül ağırlıklı PLA sentezlenebilir. Üçüncü yöntem ise laktidin halka açılma reaksiyonu ile PLA oluşumudur (Auras vd., 2004).



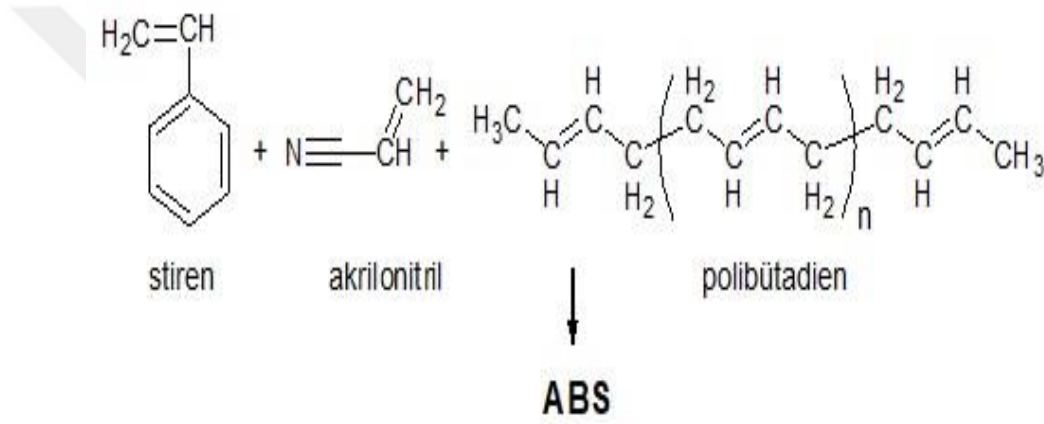
Şekil 10. PLA'nın Sentez Metotları (Averous & Kalia, 2011).

Sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için fosil bazlı plastiklerin neden olduğu atıkların yönetimi ve yeşil çevreyi desteklemek için en temel konudur. Biobazlı polimerlerin (yenilenebilir kaynaklardan elde edilen) kullanılması bu sorunun üstesinden gelmenin en iyi yoludur. Biobazlı plastikler daha önce piyasada kullanılabılırken polilaktik asit petrokimya bazlı polimerler yeni bir alternatif sağlamıştır. Bunun nedeni PLA'nın maliyet verimliliği ve ayırt edici özelliklerindendir (Misra, 2016).

Her yıl PLA polimerine dayalı çok sayıda biyolojik olarak parçalanabilen ürün üretildiğinden ve işleme koşulları ve nihai özellikler, amorf ve erime davranışının kristalleşmesiyle büyük ölçüde ilişkili olduğundan, PLA polimerinin kristalleşme ve erime davranışı üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Refaa vd., 2017).

2.6.3. ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)

ABS kopolimeri, akrilonitril ve stiren monomerlerinin polimerizasyonu ile üretilir. ABS'nin üretilmesi için, yığın polimerizasyon, emülsiyon polimerizasyonu, süspansiyon polimerizasyonu veya toplu ve emülsiyon polimerizasyonlarının hibrit işlemi dâhil olmak üzere çeşitli polimerizasyon yöntemleri tercih edilir. ABS, üstün mekanik özellikleri ve kolay işlenmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir mühendislik plastiğidir. Oyuncaklar, müzik aletleri, otomotiv bileşenleri, koruyucu kasklar, telefon santral panelleri, spor malzemeleri ve tıbbi ürünler dâhil olmak üzere çeşitli ürünlerde ABS kopolimerinin çoğu uygulaması cihazlar içerir. ABS polimerinin en önemli özelliği herhangi bir darbeye karşı dayanıklı ve serttir.



Şekil 11. Akrilonitril Bütadien Stiren Açılımı (URL-6).

ABS filamentleri fiziksel olarak yüksek dayanıklılık ve sıcaklık özelliklerine sahiptir. Ayrıca ABS filamentleri sert esnek potansiyel de mevcuttur. Baskı sıcaklığı 210 ile 250 santigrat dereceleri arasında mukavemet gücü bulunmaktadır. Aseton gibi maddelerde yüzey işlem olarak çözünebilir. ABS polimerinin Newton olmayan viskozite özelliği ve kesme kalınlığı olması sebebiyle istenilen ürünün çeşitliliğini arttırma da ABS filamentleri için olanaklar sağlamıştır (Bucknall, 1977).

3. MATERYAL VE METOD

Bu tez kapsamında 3D yazıcılarda kullanılan ABS ve PLA filamentlerinin hidrojen bakımından zengin olması sebebiyle nötron zırhlamadaki yerinin Hafniyum (Hf) ve Tungsten (W) katkılanması ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Geleneksel döküm tipine göre 3D yazıcıların üretimde geometri özgürlüğünü sağlayacağı düşünülen bu ABS ve PLA numuneleri GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarında modellenmiş ve belirli enerji ve numune kalınlıklarında simülasyon tekniği ile nötron zırhlama kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Bu sayede, elde edilen özgün polimer kompozitlerin 3D yazıcılarda kullanılarak nötron zırhlamada ilerleyen serüvenlerde prototiplere öncülük etmesi bu çalışmanın hedefleri arasında bulunmaktadır. Simülasyon çalışmasına ek olarak teorik hesaplamalarla numunelerin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri hesaplanacak ve tartışılacaktır. Son olarak, literatürdeki sonuçlar ve geleneksel zırhlama malzemeleri ile elde edilen bulgular kıyaslanarak bütünlüyci ve karşılaştırmacı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

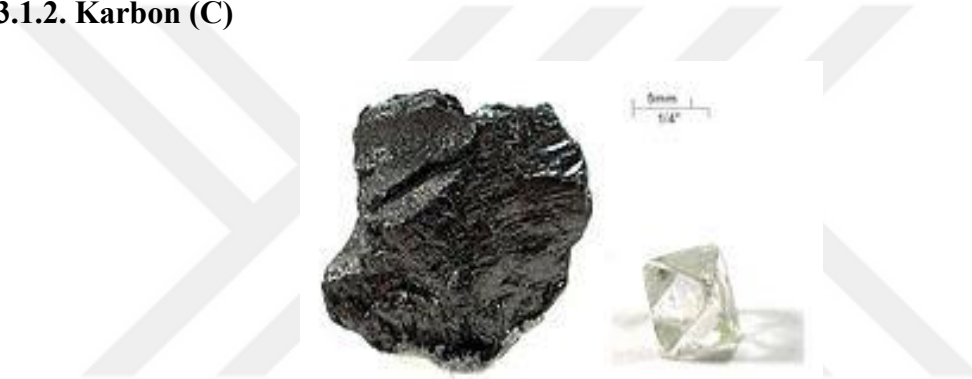
3.1. Kullanılan Elementler

Zırhlamada veya daha spesifik olarak nötron zırhlamada amaç uygun malzeme ve kalınlıkta istenilen enerjiye münhasır gönderilen nötronların malzemede soğurulmasıdır. Bu kapsamda ABS ve PLA polimerlerini güçlendirmek için seçilen elementler Hafniyum (Hf) ve Tungsten (W) olarak belirlenmiştir. Hafniyum ve Tungstenin nötron zırhlamasında kullanılabilirliğine dair çeşitli çalışmalar literatürde yerini almasına rağmen 3 boyutlu yazıcılar için henüz böyle bir çalışmaya literatürde bulunmadığı görülmektedir (Higgins vd., 2019; Chang vd., 2015; Kobayashi vd., 1997; AbuAlRoos vd., 2020). Bütün bu çalışmalarda hem Hafniyumun hem de Tungstenin nötron zırhlamada etkin elementler olduğu raporlanmıştır. Ek olarak, Tungstenle çok yakın yoğunluğa sahip olan Altın (Au) elementinin nötronik zırhlamada element ve alaşım olarak filamentlere doğruluğu simülasyon ortamında değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak parafin materyalinin bolca hidrojen atomu içermesinden dolayı nötron zırhlamada kullanıldığı bilinmektedir. Parafinin iyi bir nötron soğurucu olduğu bilindiği için bu çalışmada da referans materyal olarak ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilcek numuneler içerisindeki elementlere dair kısa bilgiler aşağıda bulunmaktadır.

3.1.1. Hidrojen (H)

15. yüzyılda keşfedilmiş ve evrende en basit, hafif ve kullanışlı olan renksiz, kokusuz 1,00794 aub (atomik kütle birimi) ağırlığında gazdır. 1 protondan oluşan hidrojen atomu, ışık Emilimi ve yayma spektrumu sayesinde atomik yapının geliştirilmesinde başrol oynamıştır. Hidrojenin doğadaki 3 izotopu ^1H , ^2H (döteryum) ve ^3H (trityum) 'dur. Ancak ^4H - ^7H izotopları oldukça kararsız ve laboratuvar ortamında sentezlenmiştir. ^2H Döteryum, hidrojenin kararlı izotopudur. Hidrojenin nötronik zırhlama açısından önemlidir. Nötronu olmayan Hidrojen elastik saçılma yaparak zırhlamada iyi kalkan görevini üstlenmektedir. Ayrıca zırhlamada diğer önemli parametrelerden biri olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti diğer elementlere göre yüksektir.

3.1.2. Karbon (C)



Şekil 12. Karbon Elementi (URL-7).

Doğada yaygın olarak bulunan ametal kimyasal elementtir. Evrende bol halde bulunan Karbon dünyada hem doğal hem de başka elementlerle birleşik halinde bulunur. En arı biçimleri elmas ve granittir. Daha düşük aralıkları maden kömürü taş kömürü ve odun kömürünün bileşeni olarak bulunur. Karbonun atom numarası 6 olup ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C ve ^{14}C yapay veya doğal izotoplarıdır. Doğal bolluk oranı en fazla bulunan ^{12}C , yarı ömrü 5730 yıl ve eser miktarda bulunan ise ^{14}C beta bozunumu yaparak ^{14}N 'e dönüşür (URL-7). Yoğunluğu $2,267 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Yüksek seviyelerde mukavemetli kompozitleri sertleştirme ve dayanım artırıcı etkisinden dolayı çeliğin fazı olarak da tercih edilir (Arkun, 2006).

3.1.3. Oksijen (O)

Oksijen reaktif ve başta oksitler olmak üzere hemen hemen bütün elementlerle kolayca bileşik oluşturabilen kalkojen grubuna mensup bir ametaldir. Sıvı yoğunluğu $1,141 \text{ g/cm}^3$ dür. Kütlece doğal bolluk oranı hidrojen ve helyumdan sonra gelir (Emsley, 2001).

Oksijenin doğada 3 ana izotopu vardır ve kararlıdır. Bunlardan ^{16}O (%99,76) doğada bulunma miktarı en fazla olup diğerleri ^{17}O ve ^{18}O 'dır izotoplarıdır.

3.1.4. Nitrojen (N)

Azot olarak da bilinmektedir. Belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona renksiz, kokusuz ve tatsız gazdır. Azot dünya atmosferinin %78'ini oluşturmaktadır. Nitrojen tüm canlı dokularında bulunmanın yanı sıra aminoasit, amonyak, nitrik asit ve siyanür gibi bileşiklerde de bulunur. Saf azot üretimi sodyum asidin (NaN_3) ve amonyum dikromatin bozunmasıyla elde edilir. Denklem 3.1'de reaksiyon verilmiştir ve Azotun özellikleri Tablo 6' da özetlenmiştir.



Tablo 6. Azot Özellikleri

Yoğunluğu	0,808 g/cm ³
Termal iletimi	0,02583 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Ses Hızı	353 m/s (gaz, 27°C'de)
Kristal Yapı	Hekzagonal
Ana izotopları	^{13}N yapay ve yarı ömrü 9,96 dakikada olup elektron yakalamasıyla ^{13}C dönüşür. ^{14}N doğal bolluğu %99,6 kararlı izotopdur. ^{15}N %0,04 kararlıdır.

Kaynak: Lide, (2004).

3.1.5. Kükürt (S)

Kükürt, antikçağdan bu yana bilinmekte olup 18.yüzyılda Lavoisier kimyasal element olarak ortaya çıkardı. Kükürt veya Sülfür olarak da bilinip atom numarası 16, limon sarısı renginde katı bir ametaldir. Çoğunlukla metallerle birleşmiş olarak bulunur. Demir, bakır, kurşun ve çinko sülfürler, bu metallerin en önemli cevheridir. Kükürtün bilinen 4'ü kararlı 23 izotopu vardır. ^{32}S %95 doğada bolluk oranına sahip kararlı izotopudur. Yarılanma ömrü en kısa olan 200 nanosaniye ile ^{49}S 'dur. Kükürt doğada bileşik olarak hafif laksatif etki, merhem ve keratin olarak da kullanılır. Kükürt kimyasal olarak oksijene benzerdir ve halojenlere karşı elektropozitifdir (URL-8). Tablo 7'de kükürtün özellikleri listelenirken Şekil 13'te limon sarısı rengindeki kükürt resmi verilmiştir.

Tablo 7. Kükürtün Özellikleri

Yoğunluğu	1,81 g/cm ³ (sıvı)
Kristal yapısı	Ortorombik
Elektrik direnci	$2 \times 10^{15} \Omega \cdot m$ (20°C'de) (amorf)
Isı iletkenliği	0,205 W/(m.K) (amorf)
Hacim modülü	7,7 GPa

Kaynak: (URL-8).



Şekil 13. Limon Sarısı Rengindeki Kükürt (URL-8).

3.1.6. Potasyum (K)

Potasyum elektroliz yöntemiyle elde edilen ilk metal olup 19. yüzyılda S. H. Davy tarafından kostik potastan (KOH) elde edilmiştir. Periyodik tabloda alkali metaller serisinde 19 atom numaralı gümüş-beyaz renkli elementidir. Doğada birçok minarel ve tuzlu sularda bulunur. Hava ile etkileşince oksitlenir ve suya karşı çok aktiftir. Potasyum özellikle gübre sanayisinde kullanımı yaygındır. Şekil 14'te potasyumun görseli verilmiştir.



Şekil 14. Potasyum Elementi (URL-9).

Periyodik tabloda atom numarası 19, atom ağırlığı 39,09 g/mol ve yoğunluğu 0,89 g/cm³'dür. K sembolü ile gösterilir. 63 °C erime noktası ve 759 °C kaynama noktasına sahiptir. Potasyumun 20 izotopu bulunur ve en çok olanı ³⁹K'dur.

3.1.7. Hafniyum (Hf)

Hafniyum elementi 20. yüzyılın ilk çeyreğinde Danimarka'da D. Coster ve Hevest tarafından keşfedilmiştir. Taze, saf hafniyum, parlak, gümüşü bir parıltıya sahip bir metaldir. Ancak hafniyum, gökkuşağı renginde güzel bir yüzey efekti oluşturmak için oksitlenir. Atom numarası 72, atom ağırlığı 178,6 g/mol olan az rastlanır bir elementtir. Tablo 8'te Hafniyumun temel özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 8. Hafniyumun Özellikleri

Yoğunluk(katı)	13,31 g/cm ³
Kristal yapısı	Heksanogal
Isı Kapasitesi	25,73 J/(mol·K)
İyonlaşma enerjisi	658,5 kJ/mol
Atom yarıçapı	159 pm(10 ⁻¹² m)
Elektrik direnci	331 nΩ·m (20°C'de)
Ses hızı	3010 m/s (20 C'de)

Kaynak: (Hevesy, 1925).

Hafniyumun 34 izotopu olup bunların 6 tanesi doğal izotoptur. Radyonüklitleri arasında en kararlı olanı ¹⁸²Hf ve yarılanma ömrü 8,9x10⁶ yıldır. İzotoplarından çoğunun yarı ömrü 1 dakikadan daha azdır. 26 nükleer izomeri vardır (URL-10). Şekil 15'te hafniyum elementinin görseli sunulmuştur.



Şekil 15. Hafniyum Elementi (Heinemann, 1997).

3.1.8. Tungsten (W)

Volfram olarak da bilinir. Periyodik tabloda 74 atom numaralı geçiş metalidir. Normal şartlarda su ile reaksiyona girmez. Tungstenin yoğunluğu ve erime noktası sebebiyle fiziksel olarak birçok elementten daha üstün özelliklere sahiptir. Tungsten elektronik cihazlar, otomotiv endüstrisi ve radyasyon zırhlaması gibi kullanım alanlarına sahiptir. Şekil 16’da tungstenin örnek bir resmi verilirken Tablo 9’da temel özellikleri listelenmiştir.



Şekil 16. Tungsten Elementi (URL-11).

Tablo 9. Tungstenin Özellikleri

Yoğunluğu	19,25 g/cm ³ (Katı)
Atom ağırlığı	183,84 g/mol
Erime Noktası	3422 °C
Atom yarıçapı	135 pm(10 ⁻¹² m)
Kovalent yarıçapı	146 pm(10 ⁻¹² m)
Kristal yapısı	Kübik
Isıl iletkenliği	173 W/(m·K)
Elektrik Direnci	52,8 nΩ·m (20°C'de)
Hava ile Kimyasal Reaksiyonları	Normal şartlarda hava ile reaksiyona girmez. Ancak yüksek sıcaklıklarda aşığıdaki reaksiyon olur. $2W(s) + 3O_2(g) \rightarrow 2WO_3(s)$

Kaynak: (Aygün, 2015).

3.1.9. Altın (Au)



Şekil 17. Altın Elementi (URL-12).

Altın elementi herhangi bir işlem gerektirmeyen kolaylıkla şekil alabilen, hafif, parlak sarı renkte bir soy metalidir. Altının buluşu M.Ö. kadar dayanmaktadır ve yüzyıllardır insanlığın ilgisini çekmektedir. Sarı metalik altın, ağır bir metaldir. 1B grubu soy metallerinden arasında, korozyon ve oksitlenmeye karşı dirençli, iyonlaşma serbestisi, diğer metallerle kolay alaşım yapabilme, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Altının bilinen 36 izotopu vardır ve izotopları arasında ^{195}Au 186 gün yarılanma ömrü ile en kararlı olanıdır (Habashi, 1997). Şekil 17’de Altın elementinin görseli verilirken Tablo 10’da fiziksel özellikleri ifade edilmiştir.

Tablo 10. Altın Elementinin Fiziksel Özellikleri

Atom Numarası	79
Atomik Ağırlık	196,9665 g/mol
Ergime Sıcaklığı	1064,43 °C
Kaynama Sıcaklığı	2808 °C
Atomik Yarıçap	0,1422 nm
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik kristal yapı
Latis Sabiti 273 °K	0,407 nm
Atomlar Arası Mesafe	0,2878 nm
Yoğunluk, 273 °K	19,32 g/cm ³

Tablo 10. 'un devamı...

Sertlik, Brinell (10/500/90)	25 [kgf/mm ²]
Elastisite Modülü	7,747 x 10 ⁴
Poisson Oranı	0,42
Uzama	%39-45
Sıkıştırılabilirlik	6,01 x 10 ⁻¹² Pa ⁻¹
Füzyon Isısı	1,268 x 10 ⁴ J/mol
Buharlaştırma Isısı, 289 °K	3,653 x 10 ⁵ J/mol
Buhar Basıncı	1000 °K 1500 °K 2500 °K 3000 °K
	5,5 x 10 ⁻⁸ Pa 8,5 x 10 ⁻² Pa 4,9 x 10 ³ Pa 7,1 x 10 ⁵ Pa
298 °K'de Spesifik Isı	0,1288 [J/(g. °K)]
Termal İletkenlik, 273 °K	311,4 [W/(m. °K)]
273-373 °K'de Termal Genleşme	1,416 x 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Elektriksel Direnç, 273 °K	2,05 x 10 ⁻⁶ [Ω.cm]
Termal Direnç Sabiti 273-373 °K	4,06 x 10 ⁻³ K
298 °K'de Entropi	47,33 J/K

Kaynak: Habashi, (1997).

3.2. Parafin

Parafin genellikle düz zincirli n-alkanlardan, CH₃-(CH₂)_n-CH₃'ten oluşur. Bu malzemeler, sıvı-katı faz değişimleri sırasında büyük miktarda ısı depolayabilir ve serbest bırakabilir. 200–250 kJ/kg civarında son derece büyük bir ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Parafin, ayrıca geniş bir erime noktası aralığına sahiptir ve yaklaşık 2501°C'de termal stabiliteye sahiptir. Sık faz değişiklikleri sırasında çok az veya hiç faz ayrımı

göstermezler. Kimyasal olarak inert, uzun ömürlü, aşındırıcı olmayan, kokusuz, ucuz, kolay erişilebilmektedir. Ekolojik olarak zararsız ve toksik değildirler. Parafinin bolca hidrojen atomu içermesinden dolayı, nötron zırhlamada yaygın olarak kullanıldığı da bilinmektedir (Rashidi vd., 2020).

3.3. GEANT4 Simülasyon Programı ve Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi

GEANT4 (Geometry and Tracking), parçacıkların madde ile etkileşimlerini modelleyen bir Monte Carlo simülasyon programıdır. 20. yüzyılın sonlarında CERN'de (Cenevre, İsviçre) RD44 projesi olarak doğmuştur. Hedefi, modern parçacık ve nükleer fizik tarafından dayatılan, büyük ölçekli yüksek enerjinin parçacık detektör irrasyonelliği tarafından öne sürülen gereksinimleri karşılayabilen, nesne yönelimli teknolojiye dayalı, sağlam ve çok yönlü bir simülasyon yazılım aracı geliştirmektir. Ar-Ge aşamasında, ilk üretim sürümünün teslim edilmesiyle Aralık 1998'de program tamamlanmıştır ve halen günümüzde güncellemeler yapılmaktadır.

GEANT4 programı Monte Carlo metodu aracılığıyla temel parçacıkların madde içerisinden geçişinin simülasyonunu yapmaktadır. Günümüzde GEANT4 nükleer fizik, hızlandırıcı fiziği, medikal ve uzay bilimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. GEANT4, yüksek enerji fiziğinden eV ölçeğine kadar radyasyon fiziği araştırmaları için açık kaynaklı, ücretsiz ve genel Monte Carlo kodudur. GEANT4, kapsamlı detektör ve fizik modelleme yetenekleri sağlamaktadır. Deney düzeneği, geometri ve malzeme eklemecikarma mümkündür. Kullanıcı, elektromanyetik alanların varlığında da maddedeki parçacıkları izleyebilir ve detektörün tepkisini tanımlayabilmektedir. GEANT4, kullanıcılarının simülasyon uygulamalarıyla etkileşime girmesini ve sonuçlarını analiz nesnelerinde saklamasını sağlayan ara yüzler sağlamaktadır (Agostinelli vd., 2003; Allison vd., 2006; Guatelli vd., 2011).

Bu çalışmada GEANT4 simülasyon programı Linux işletim sistemine kurulumu gerçekleştirildikten sonra kullanacağımız numunelerdeki elementler ve bunlara eklenecek elementlerin yüzdelikleri GEANT4 programına tanımlanmıştır. Nötronik çarpışmalar ve radyasyonun maddeden geçiş miktarını (transportation) gösteren GEANT4 simülasyon programından “hadronic/Hadr03” paketinde çalışılmıştır. Materyal tanımlamaları “hadronic/Hadr03/src” dosyasında yer alan “DetectorConstruction.cc” belgesi içerisinde tanımlanmıştır. Bu işlem için izlenen yol *geant4.10.07.p02-install/share/Geant4-10.7.2/examples/extended/hadronic/Hadr03/src*

“DetectorConstruction.cc” belgesine girildikten sonra bu araştırmada kullanılan

malzemelerin içerisinde bulunan tüm elementler ve yeni oluşturulan kompozitler tanımlanmıştır.

GEANT4 programına tanımlanan elementler

```
G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", 1., 1.01*g/mole);
G4Element* C = new G4Element("Carbon", "C", 6., 12.00*g/mole);
G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", 7., 14.006*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen", "O", 8., 15.99*g/mole);
G4Element* S = new G4Element("Sulfur", "S", 16., 32.059*g/mole);
G4Element* K = new G4Element("Potassium", "K", 19., 39.0983*g/mole);
G4Element* Hf = new G4Element("Hafnium", "Hf", 72., 178.486*g/mole);
G4Element* W = new G4Element("Tungsten", "W", 74., 183.84*g/mole);
G4Element* Au = new G4Element("Gold", "Au", 79., 196.966*g/mole);
```

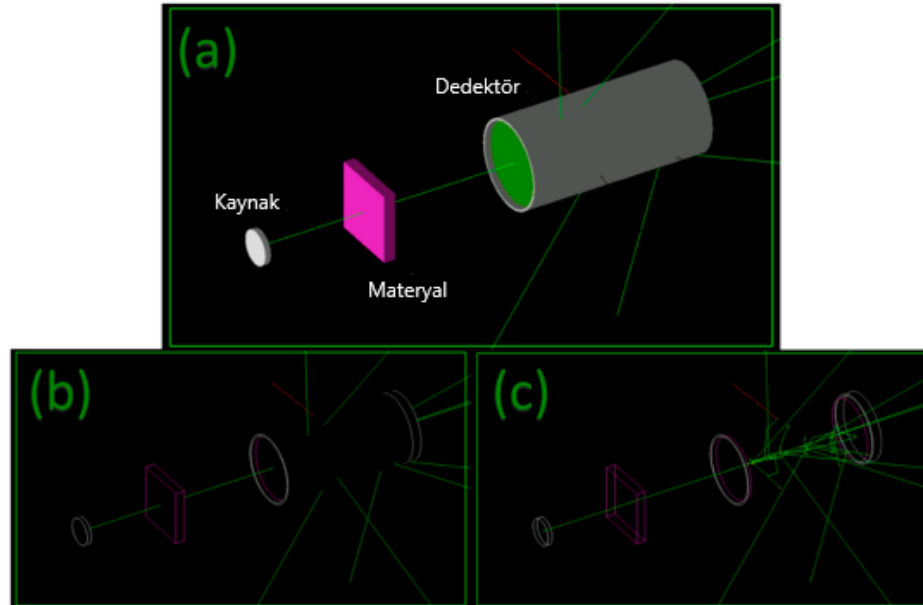
Tablo 11. PLA, ABS Polimerlerinin Kimyasal Bileşenleri ve Kütlece Yüzdelikleri.

	Kimyasal Formülü	H	C	O	S	K	N	Toplam
PLA	(C ₃ H ₄ O ₂) _n	5,29	51,86	42,61	0,12	0,11	-	%100
ABS	(C ₆ H ₁₁ NO) _n	7,5	85,51	1,65	0,08	-	5,26	%100

Kaynak: Alssabbagh vd., (2017).

Bu verilerden yola çıkarak “DetectorConstruction.cc” belgesinde C++ yazılım dilinde uygun tanımlamalar yapılır. Tablo 11’de PLA ve ABS polimerlerinin kimyasal bileşenleri ve kütlece yüzde oranları verilmiştir.

GEANT4 programının kaynak, detektör ve modellenen numunenin GEANT4 gösterimi Şekil 18’de a, b ve c çerçevelerinde sırasıyla katı yüzey görünümüm, tel çerçeve görünümü ve gizlenmiş kenar görünümüdür. Şekil 19, 20 ve 21’de terminaldeki ara yüzden tanımlanan malzemelere ilişkin görseller sunulmuştur.



Şekil 18. GEANT4 Simülasyon Gösterimi (Akhdar, 2022).

```

G4Material* PLA =
new G4Material("PLA", 1.24*g/cm3, 5);
PLA->AddElement(H, 5.29*perCent);
PLA->AddElement(C, 51.86*perCent);
PLA->AddElement(O, 42.61*perCent);
PLA->AddElement(S, 0.12*perCent);
PLA->AddElement(K, 0.11*perCent);

G4Material* ABS =
new G4Material("ABS", 1.05*g/cm3, 5);
ABS->AddElement(H, 7.5*perCent);
ABS->AddElement(C, 85.51*perCent);
ABS->AddElement(N, 5.26*perCent);
ABS->AddElement(O, 1.65*perCent);
ABS->AddElement(S, 0.08*perCent);

G4Material* PLAWHf =
new G4Material("PLAWHf", 7.256*g/cm3, 3);
PLAWHf->AddMaterial(PLA, 60*perCent);
PLAWHf->AddElement(W, 20*perCent);
PLAWHf->AddElement(Hf, 20*perCent);

G4Material* ABSWHf =
new G4Material("ABSWHf", 7.142*g/cm3, 3);
ABSWHf->AddMaterial(ABS, 60*perCent);
ABSWHf->AddElement(W, 20*perCent);
ABSWHf->AddElement(Hf, 20*perCent);

G4Material* Parafin =
new G4Material("Parafin", 0.93*g/cm3, 2);
Parafin->AddElement(H, 14.4*perCent);
Parafin->AddElement(C, 85.6*perCent);

```

Şekil 19. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan Polimerler.

```

G4Material* PLAAu10 =
new G4Material("PLAAu10", 3.041*g/cm3, 2);
PLAAu10->AddMaterial(PLA, 90*perCent);
PLAAu10->AddElement(Au, 10*perCent);

G4Material* PLAAu15 =
new G4Material("PLAAu15", 3.9415*g/cm3, 2);
PLAAu15->AddMaterial(PLA, 85*perCent);
PLAAu15->AddElement(Au, 15*perCent);

G4Material* PLAAu20 =
new G4Material("PLAAu20", 4.86*g/cm3, 2);
PLAAu20->AddMaterial(PLA, 80*perCent);
PLAAu20->AddElement(Au, 20*perCent);

G4Material* PLAW5 =
new G4Material("PLAW5", 2.1405*g/cm3, 2);
PLAW5->AddMaterial(PLA, 95*perCent);
PLAW5->AddElement(W, 5*perCent);

G4Material* PLAW10 =
new G4Material("PLAW10", 3.041*g/cm3, 2);
PLAW10->AddMaterial(PLA, 90*perCent);
PLAW10->AddElement(W, 10*perCent);

G4Material* PLAW15 =
new G4Material("PLAW15", 3.9415*g/cm3, 2);
PLAW15->AddMaterial(PLA, 85*perCent);
PLAW15->AddElement(W, 15*perCent);

G4Material* PLAW20 =
new G4Material("PLAW20", 4.86*g/cm3, 2);
PLAW20->AddMaterial(PLA, 85*perCent);
PLAW20->AddElement(W, 15*perCent);

```

Şekil 20. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan PLA Polimeri ile Oluşturulan Bazı Kompozitlerin Yoğunlukları ve Kütlece Yüzdelikleri.

```

G4Material* ABSAu10 =
new G4Material("ABSAu10", 2.87*g/cm3, 2);
ABSAu10->AddMaterial(ABS, 90*perCent);
ABSAu10->AddElement(Au, 10*perCent);

G4Material* ABSAu15 =
new G4Material("ABSAu15", 3.78*g/cm3, 2);
ABSAu15->AddMaterial(ABS, 85*perCent);
ABSAu15->AddElement(Au, 15*perCent);

G4Material* ABSAu20 =
new G4Material("ABSAu20", 4.7*g/cm3, 2);
ABSAu20->AddMaterial(ABS, 80*perCent);
ABSAu20->AddElement(Au, 20*perCent);

G4Material* ABSW5 =
new G4Material("ABSW5", 1.96*g/cm3, 2);
ABSW5->AddMaterial(ABS, 95*perCent);
ABSW5->AddElement(W, 5*perCent);

G4Material* ABSW10 =
new G4Material("ABSW10", 2.87*g/cm3, 2);
ABSW10->AddMaterial(ABS, 90*perCent);
ABSW10->AddElement(W, 10*perCent);

G4Material* ABSW15 =
new G4Material("ABSW15", 3.78*g/cm3, 2);
ABSW15->AddMaterial(ABS, 85*perCent);
ABSW15->AddElement(W, 15*perCent);

G4Material* ABSW20 =
new G4Material("ABSW20", 4.7*g/cm3, 2);
ABSW20->AddMaterial(ABS, 80*perCent);
ABSW20->AddElement(W, 20*perCent);

G4Material* ABSHf5 =
new G4Material("ABSHf5", 1.663*g/cm3, 2);
ABSHf5->AddMaterial(ABS, 95*perCent);
ABSHf5->AddElement(Hf, 5*perCent);

```

Şekil 21. GEANT4 Simülasyon Programında Tanımlanan ABS Polimeri ile Oluşturulan Bazı Kompozitlerin Yoğunlukları ve Kütlece Yüzdelikleri.

GEANT4 simülasyon programında kullanılacak materyaller Hadr03 paketine tanımlandıktan sonra Hadr03 paketinin uygun komutlar yazılarak çalıştırıldı ve ardından yaptığımız çalışmaya uygun parametreler “malzeme adı, malzeme kalınlığı, gönderilen parçacığın cinsi, gönderilen parçacığın enerjisi ve gönderilen parçacık sayısı” şeklindedir.

```

---> Element: Tungsten (W)  Z = 74.0  N = 184  A = 183.840 g/mole
---> Isotope: W180  Z = 74  N = 180  A = 179.95 g/mole  abundance: 0.120 %
---> Isotope: W182  Z = 74  N = 182  A = 181.95 g/mole  abundance: 26.500 %
---> Isotope: W183  Z = 74  N = 183  A = 182.95 g/mole  abundance: 14.310 %
---> Isotope: W184  Z = 74  N = 184  A = 183.95 g/mole  abundance: 30.640 %
---> Isotope: W186  Z = 74  N = 186  A = 185.95 g/mole  abundance: 28.430 %
    ElmMassFraction: 20.00 % ElmAbundance 1.44 %

---> Element: Hafnium (Hf)  Z = 72.0  N = 178  A = 178.486 g/mole
---> Isotope: Hf174  Z = 72  N = 174  A = 173.94 g/mole  abundance: 0.160 %
---> Isotope: Hf176  Z = 72  N = 176  A = 175.94 g/mole  abundance: 5.260 %
---> Isotope: Hf177  Z = 72  N = 177  A = 176.94 g/mole  abundance: 18.600 %
---> Isotope: Hf178  Z = 72  N = 178  A = 177.94 g/mole  abundance: 27.280 %
---> Isotope: Hf179  Z = 72  N = 179  A = 178.95 g/mole  abundance: 13.620 %
---> Isotope: Hf180  Z = 72  N = 180  A = 179.95 g/mole  abundance: 35.080 %
    ElmMassFraction: 20.00 % ElmAbundance 1.48 %

idle> /run/initialize
idle> /testhadr/det/setSize 5 cm
idle> /testhadr/det/setMat PLAWHf
idle> /gun/particle neutron
idle> /gun/energy 1 MeV
idle> /run/beamOn 10000000

```

Şekil 22. GEANT4 Simülasyon Programı Başlatma Komut ve Parametreleri.

Şekil 22’de gerekli parametreler girilerek simülasyon işlemi başlatılmıştır. Simülasyon işlemi bittikten sonra sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma için gerekli olan sonuç, malzemeden geçen nötron sayılarıdır (Transportation). Simülasyon işlemi bittikten sonra çıkan sonuçlar ve bu çalışma için gerekli olan malzemeden geçen nötron sayısı (Transportation) Şekil 23’te gösterilmektedir.

```

----- Ranecu engine status -----
Initial seed (index) = 0
Current couple of seeds = 9876, 54321
-----

The run is 10000000 neutron of 1 MeV through 5 cm of PLAWHf (density: 7.256 g/cm3 )

Process table frequency:
Transportation= 4906  hadElastic= 9846781  nCapture= 5202  neutronInelastic= 143111

Nb of incident particles surviving after 5 cm of PLAWHf : 4906

MeanFreePath: 6.5476 mm +- 6.4759 mm  massic: 4.7509 g/cm2
CrossSection: 1.5273 cm^-1  massic: 21.049 mm2/g

Verification: crossSections from G4HadronicProcessStore:
Transportation= 0 um2/mg
hadElastic= 20.658 mm2/g
nCapture= 11.194 um2/mg
neutronInelastic= 300.19 um2/mg
total= 20.969 mm2/g

```

Şekil 23. GEANT4 Simülasyon Sonucunun Alındığı Data Ekranı.

Çalışmada ele alınan malzemeler 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerdedir. Malzemenin kalınlığı da 1 cm'den başlayıp 5 cm kadar ardışık santimetredir. Simülasyonda 10 000 000 tane nötron parçacığı gönderilip simülasyon işlemine başlanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar malzemenin nötron zayıflatma özelliklerinin açığa çıkması için bazı parametrelerin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır.

3.4. FLUKA Simülasyon Programı ve Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi

FLUKA, parçacıkların maddeyle etkileşimlerini hesaplamak için geliştirilen Monte Carlo prensibiyle çalışan simülasyon programıdır. Fortran programlama dilinde yazılmış ve Linux işletim sisteminde kullanılır. FLUKA 1962 yılında, J. Rant ve H. Geibel tarafından hadron demetleri için yazılmış bir kod olup ilk nesli 1962 – 1978 yılları arasında hızlandırıcılardaki zırhlamayı tasarlamak için geliştirilmiştir. A. Ferrari ve A. Fassó FLUKA programında parçacıkların enerji aralığını genişletmek için çalışmaktadır. FLUKA programı, hızlandırıcılarda zırhlama tasarımında, hızlandırıcı güdümlü sistemlerde, aktivasyon, kozmik ışınlar ve benzeri birçok uygulama alanına sahiptir. FLUKA simülasyonunun kullandığı etkileşimler hadron-hadron, hadron-çekirdek, çekirdek-çekirdek, elektromanyetik-müon ve nötrino etkileşimleridir. Ayrıca FLUKA Manyetik alanda transport, Boolean ve Voxel geometrileri ve kademeli nötron transportu ve etkileşimleri hesaplamaktadır (Böhlen vd, 2014). FLUKA simülasyonları yapabilmek için ara yüzler kullanılmaktadır. FLUKA ile yaptığımız çalışmada kullandığımız FLUKA simülasyonları için Flair ara yüzü kullanılmıştır. Tablo 12'de FLUKA'nın Monte Carlo simülasyon paketinin birim sistemi gösterilmektedir.

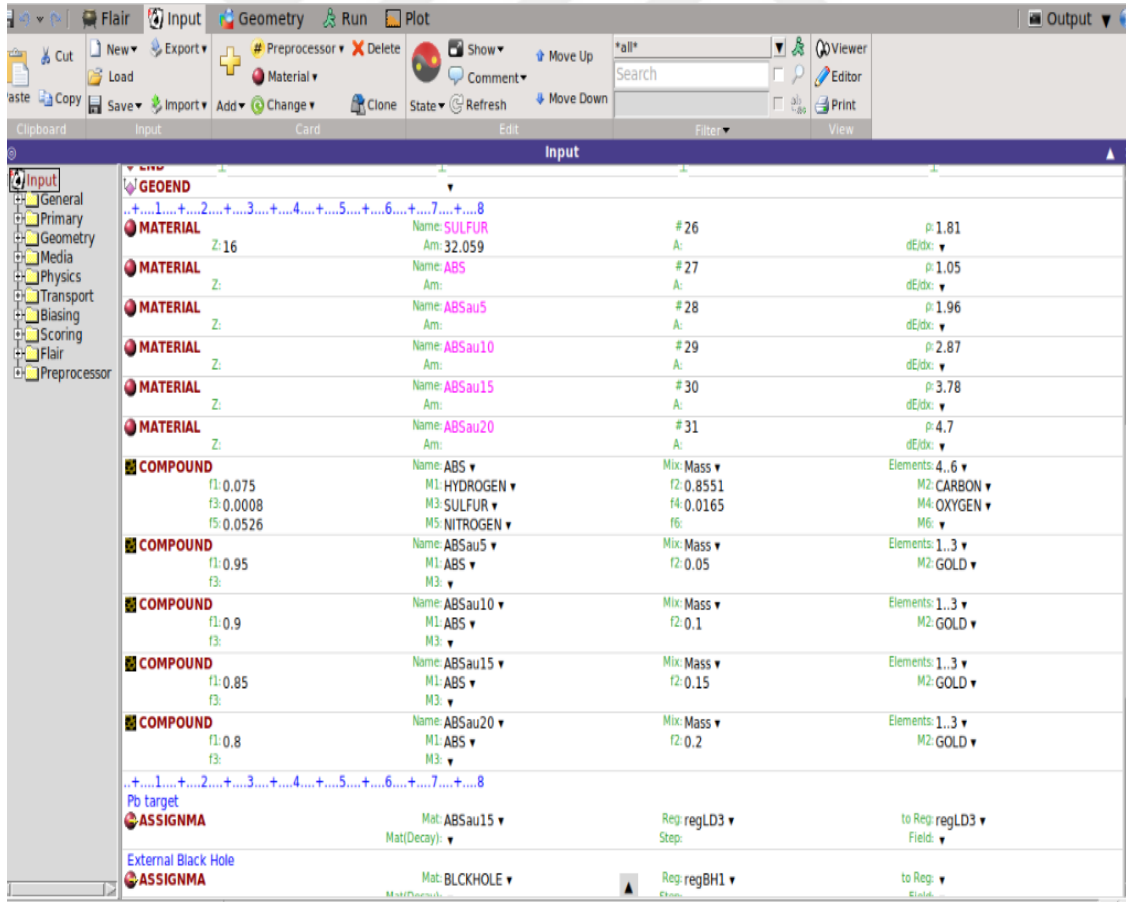
Tablo 12. FLUKA Birim Sistemi

Uzaklık	cm (alan cm^2 , hacim cm^3)
Enerji	GeV
Momentum	GeV / c
Sıcaklık	K
Katı Açısı	sr
Manyetik Alan	T

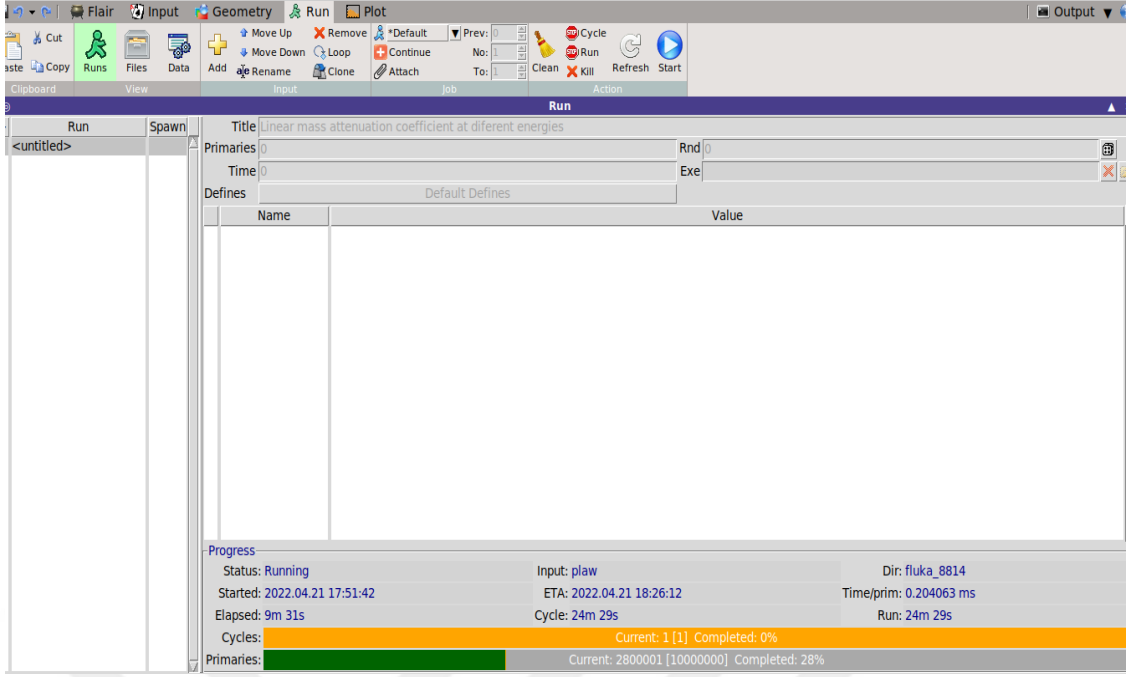
Tablo 12.'nin devamı...

Elektrik Alan	kV / cm
Zaman	s
Aktivite	Bq
LET (Linear Energy Transfer)	keV / ($\mu\text{mg} / \text{cm}^3$)
Doz Eşdeğeri	pSv

FLUKA simülasyon çalışmasında tanımlanacak element ve kompozitler FLUKA programında kullanılan Flair arayüzü sayesinde input dosyası oluşturuldu. Flairde kullanacağımız parçacık cinsi nötron, nötronun enerjisi GeV cinsinden yaptığımız çalışmaya uygun şekilde tanımlandı. Tanımlanan kompozitteki materyal belirli kalınlıkta seçilerek 10 000 000 nötron gönderilerek input dosyası kaydedilip simülasyonu başlatmak için “run” yapıldı.



Şekil 24. FLUKA Programının Flair Arayüzü ile Oluşturulan Input Dosyası.



Şekil 25. Flair Arayüzünde Tanımlanan Element ve Kompozitlerin Çalıştırılması

Daha öncesinde ifade edildiği üzere çalışmada ele alınan malzemeler 1, 2, 3, 4 ve 5 santimetre kalınlıklarda ve 100 keV ile 5 MeV belirli enerji aralığında seçilmiştir. Simülasyonda 10 000 000 tane nötron parçacığı gönderilip simülasyon işlemine başlandı. Elde edilen sonuçlar malzemenin nötron zayıflatma özelliklerinin açığa çıkması için bazı parametrelerin karşılaştırılması gerekmektedir.

Ele alınan malzemelerin radyasyonu zayıflatma özellikleri lineer azaltma katsayısı (μ) YKD ve OSY (ortalama serbest yol) gibi farklı parametreler hesaplanarak karşılaştırma yapılabilmektedir. Lineer azaltma katsayısı (μ) daha çok gama zırlamada yer alıp rağmen nötron zırlamada etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) gibi kullanılabilir. Bir nötronun malzeme ile etkileşime girmesinin birim yol uzunluğu başına olasılığı olarak tanımlanan lineer azaltma katsayısı (μ) bir malzemedeki nötron radyasyonunun karakterizasyonunda önemli bir parametredir. Bu parametre, gelen nötronun enerjisine, malzemenin yoğunluğuna ve malzeme kalınlığına göre farklılık gösterebilir. Lineer azaltma katsayısı (μ), Denklem (3.2) kullanılarak belirlenebilir.

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

Burada I_0 , malzemeye gönderilen nötron sayısı; I , malzemedan geçen nötron sayısını, μ lineer azaltma katsayısı ve x , malzeme kalınlığını ifade eder. Bu çalışmada malzeme kalınlığı, gönderilen nötron sayısı ve simülasyon sonucunda malzemedan geçen nötron sayısı bilinmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak her bir malzemenin, lineer azaltma

katsayısı veya etkin nötron tesir uzaklaştırma tesir kesiti hesaplanmıştır. Makroskobik soğurma katsayısı kullanılarak YKD ve OSY gibi radyasyon zayıflama parametreleri belirlenebilir. Malzemeden geçtikten sonra ilk radyasyon yoğunluğunu %50'ye indiren gerekli malzeme kalınlığına yarı kalınlık değeri denir ve Denklem (3.3) kullanılarak elde edilebilir.

$$YKD = \frac{0.693}{\mu} \quad (3.3)$$

Ortalama serbest yol, tipik olarak diğer parçacıklarla bir veya daha fazla ardışık çarpışmanın bir sonucu olarak, hareket eden bir parçacığın yönünü veya enerjisini önemli ölçüde değiştirdiği ortalama bir mesafedir ve Denklem (3.4) kullanılarak elde edilebilir.

$$OSY = 1/\mu \quad (3.4)$$

Bir malzemenin YKD ve OSY değerlerinin düşük olması, o malzemenin iyi bir koruyucu malzeme olduğunu göstermektedir (Dilsiz vd., 2021).

3.5. Teorik Hesaplama ile Nötron Zırhlama Değerlendirilmesi

3.5.1. Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti

Nötron zırhlama sorununun çözümüne yönelik önemli bir adım, farklı elementlerin, bileşiklerin ve maddelerin etkin hızlı nötron uzaklaştırma tesir kesitleri (Σ_R) için doğru veri tabanının geliştirilmesidir. Ayrıca etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) malzemenin toplam makroskobik tesir kesitinden (Σ_t) farklı değildir (El-Khayatt, 2010). Kütle azaltma katsayısı (Σ_R/ρ) (cm^2/g), hızlı veya fisyon enerjili bir nötronun, onu nüfuz eden, çarpışmamış nötronlar grubundan çıkaran bir ilk çarpışmaya maruz kalma olasılığıdır. 2 ve 12 MeV arasındaki nötron enerjileri için yaklaşık olarak sabit olduğu kabul edilir. Σ_R/ρ kavramını kullanmak için, incelenen koruyucu malzeme, bazı saçılma atomları içermelidir (Elabd, 2014).

Homojen karışımlar, betonlar, kompozitler ve bileşikler için kütle azaltma katsayısı Σ_R/ρ , bileşiklerdeki çeşitli elementler için Σ_R veya Σ_R/ρ değerinden hesaplanabilmektedir (El-Khayatt & El-Sayed Abdo, 2009; Akkurt & El-Khayatt, 2012).

$$\Sigma_R/\rho = \sum_i w_i (\Sigma_R/\rho)_i \quad (3.5)$$

$$\Sigma_R = \sum_i \rho_i (\Sigma_R/\rho)_i \quad (3.6)$$

Özellikle bu çalışmada olduğu gibi hızlı nötron zayıflamasının söz konusu olması durumunda, hızlı nötron etkin uzaklaştırma tesir kesiti önemli rol oynamaktadır. Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerinin büyük olması, nötron zırhlamasında iyi sonuçlar elde etmek demektir.

Bu çalışmada PLA ve ABS organik polimerlerine çeşitli geçiş metalleri eklenerek nötron zırhlamada etkisine bakılmıştır. Kullanılan geçiş metalleri Hafniyum (Hf), Tungsten (W) ve Altın (Au) dır. Tungsten ve hafniyumdan alaşım input dosyasında oluşturulup simülasyonik deneyi yapılmıştır. Ayrıca ABS ve PLA numunelerinin her birine Hafniyum, Tungsten ve Altından %5, %10, %15 ve %20 eklenmiş kompozit materyal deneyi sonuçlanmıştır. Deney çalışmasında GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarının her birinde 30 farklı kompozit materyal ve farklı enerji ve kalınlıkta simülasyonu yapılmıştır. Hesaplamalarda için gerekli olan kütle azaltma katsayısı (Σ_R/ρ) hesaplanmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan bazı elementlerin yoğunluk ve kütle azaltma katsayısı Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Bu Çalışmada Kullanılan Bazı Elementlerin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı Değerleri

Elementler	Yoğunluk(g/cm ³)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm ² /g)
¹ H	8.98x10 ⁻⁵	0.598
⁶ C	0.0001785	0.1135
⁷ N	0,0012506	0,0448
⁸ O	0,001429	0,0405
¹⁶ S	2,067	0,0277
¹⁹ K	0,862	0,0247
⁷² Hf	13,31	0,0112
⁷⁴ W	19,25	0,011
⁷⁹ Au	19,30	0,0106

Tablo 13'de üzerinde çalışılan kompozitlerin içerdiği elementler, elementlerin yoğunluk ve kütle azaltma katsayısı görülmektedir. Kütle azaltma katsayısı değerinin yüksek olması nötron zırhlama açısından iyi sonuçlar elde etmek anlamına gelebilmektedir. Tablo 13'de bakıldığında, en yüksek kütle azaltma katsayısı 0,598 cm²/g değerine sahip hidrojen ve

0,1135 cm²/g değerine sahip karbon gelmektedir. Elde edilen sonuçlarla birlikte çalışmada kullandığımız içerisinde bol miktarda hidrojen ve karbon bulunan ABS ve PLA organik polimerlerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca çalışmadaki diğer elementlerin kütle azaltma katsayısı nötronik zırhlama için uygun sonuçlar elde edileceği görülmüştür.

Tablo 14. Bu Çalışmada Ele Alınan Ana Malzemeler ve Parafinin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı Değerleri

Malzemeler	Yoğunluk(g/cm ³)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm ² /g)
PLA	1,24	0,0937
ABS	1,05	0,0954
Parafin	0,93	0,1200

Tablo 14'te belirtildiği üzere kütle azaltma katsayısı 0,12 cm²/g sahip olan ve daha önceden nötronik zırhlama için teorik ve deneysel olarak kendini kanıtlanmış olan Parafin, saf PLA ve ABS organik polimerleri ile kıyaslandığında kütle azaltma katsayısı birbirine çok yakın olduğu gösterilmektedir. Daha önceden bahsedildiği üzere çalışmada kullanılan saf organik polimerlere nötronik zırhlamada teorik ve deneysel olarak kabul görülmüş Hafniyum, Tungsten ve Altın elementlerinin belirli oranlarda dâhil edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin yoğunlukları ve kütle azaltma katsayıları Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15. PLA polimerine Hafniyum, Tungsten ve Altın Elementlerinin Kütlece Belirli Yüzdelik Eklemeyle Oluşan Kompozitler

Malzemeler	Yoğunluk(g/cm ³)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm ² /g)
PLAHf5	1,8300	0,1639
PLAHf10	2,4560	0,2099
PLAHf15	3,0590	0,2488
PLAHf20	3,6620	0,2828
PLAW5	2,1523	0,1928

Tablo 15.'in devamı...

PLAW10	3,0550	0,2610
PLAW15	3,9750	0,3232
PLAW20	4,8600	0,3751
PLAAu5	2,1523	0,1927
PLAAu10	3,0550	0,2609
PLAAu15	3,9750	0,3230
PLAAu20	4,8600	0,3747

Tablo 15'te PLA malzemesine eklenen element ve yüzdece ilaveleri belirtilmiştir. Örneğin PLAHf10 malzemesinde PLA kütlece %90 oranında ve Hafniyum elementi %10'dur. Saf elementlerin yoğunluğu yüksek olduğu için çalışmada kullandığımız organik polimerinde hem yoğunluğu hem de kütle azaltma katsayısı da artmaktadır.

Tablo 16. ABS polimerine Hafniyum, Tungsten ve Altın Elementlerinin Kütlece Belirli Yüzdelik Eklemesiyle Oluşan Kompozitler

Malzemeler	Yoğunluk(g/cm ³)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm ² /g)
ABSHf5	1,6630	0,1516
ABSHf10	2,2550	0,1960
ABSHf15	2,8890	0,2390
ABSHf20	3,5020	0,2750
ABSW5	1,9250	0,1754
ABSW10	2,8750	0,2499
ABSW15	3,7875	0,3133

Tablo 16'nın devamı...

ABSW20	4,7000	0,3689
ABSAu5	1,9250	0,1754
ABSAu10	2,8750	0,2498
ABSAu15	3,7875	0,3130
ABSAu20	4,7000	0,3685

Teorik olarak doğrulanmış olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) yüksek olan kompozit malzeme nötronik zırlama için tercih edilebilir. Çünkü kütle azaltma katsayısı (Σ_R/ρ) ile bağlantılıdır. PLA ve ABS organik polimerlerine yoğunlukları aynı olan Tungsten ve Altın elementlerinin yoğunlukları ve kütle azaltma katsayıları daha önceki tablolarda verilmiştir ve kompozit materyallerden Tungsten seçilmiştir. Tablo 17'de oluşturan kompozitlerin kütlece miktarları ve Tablo 18'de yoğunlukları ve etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitiyle bağlantılı olan kütle azaltma katsayısı verilmiştir.

Tablo 17. Kompozitlerin Kütlece Yüzdece Dağılımı

Oluşturulan Kompozitler	ABS(%)	PLA(%)	W (%)	Hf (%)
ABSWHF	60	-	20	20
PLAWHF	-	60	20	20

Tablo 18. Organik Kompozitlerin Yoğunluk ve Kütle Azaltma Katsayısı

Malzemeler	Yoğunluk(g/cm ³)	Kütle Azaltma Katsayısı (cm ² /g)
PLAWHf	7,2700	0,4411
ABSWHf	7,1520	0,4410

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında 3D yazıcılarda kullanılan PLA, ABS filamentlerinde kullanılan organik polimerlerin nötron zırhlamasına karşı muhakemesi incelenmiş ve bu organik polimerlere nötron zırhlamada yaygın şekilde kullanılan geçiş metalleri olan Hafniyum, Tungsten (Volfram) ve Altın elementlerinin belirli yüzdelikler eklenmesi ile oluşan kompozit materyallerin nötron zırhlama kabiliyetleri incelenmiştir. Ayrıca bu geçiş metaller seçilirken teorik olarak etkin nötron uzaklaştırma (Σ_R) tesir kesiti hesaplanarak değerlendirilmiştir. Bu zırhlama çalışmasında nötron zırhlamada daha önceden literatürde verilmiş olan parafinle mukayese edilmiştir. Zırhlama çalışması daha önceki bölümde bahsedilmiş olan GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarında çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasının teorik ve simülasyon teknikleriyle gerçekleştirilmesinin en büyük sebeplerinden bir tanesi ekonomik olarak katkılanması düşünülen metal tozların maliyetinin yüksek olmasıdır. Burada önemli hususlardan bir tanesi kullanılan GEANT4 ve FLUKA simülasyonlarının güvenilirliğinin araştırılmasıdır. Bunun ilk aşaması tez çalışmasına simülasyonlardan bağımsız olarak teorik hesaplamaların eklenmesi ve simülasyon sonuçlarıyla ilişkili olduğu doğrulanmıştır. Diğer bir sebep ise deney düzeneğinin kurumumuzda bulunmamasıdır. Bu kapsamda, bu tez çalışması, Monte Carlo simülasyon programlarının maliyeti yüksek deneylerin olduğu ve deney düzeneğinin bulunmadığı durumlarda kullanıldığında ne denli literatüre katkı sunabildiklerinin bir örneğidir.

GEANT4 ve FLUKA simülasyon çalışmalarında ABS ve PLA polimerlerine belirli oranlarda eklenen Hf, W ve Au elementleri ile belirlenen kompozitlerin, numune kalınlığı 5 cm ve nötron enerjisi 1 MeV'de incelemeler yapılmıştır. Bunun yanında farklı numune kalınlığı ve enerjilerde de kompozitlerin nötron zırhlama kapasiteleri incelenmiştir. Kompozit malzeme üzerine 10 000 000 nötron gönderilerek simülasyon başlatılmıştır ve malzemedan geçen nötron sayısı (transportation) sonuçları elde edilmiştir.

4.1. 1 MeV Nötron Enerjisinde ve 5 cm Numune Kalınlığında Elde Edilen Sonuçlar

4.1.1. Saf Haldeki PLA, ABS ve Parafin

Simülasyon çalışmasında organik polimer malzeme olan PLA ve ABS'nin ve nötron zırhlamada etkinliği kanıtlanmış parafinin 1 MeV nötron enerjisinde ve 5 cm numune kalınlığındaki GEANT4 ve FLUKA sonuçları Tablo 19'da sunulmaktadır.

Tablo 19. 1 MeV Nötron Enerjisinde 5 cm Numune Kalınlığındaki Saf Organik Polimerler ve Parafinden Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
PLA	1237760	1319791
ABS	1914682	1964132
Parafin	1064964	1086703

1 MeV nötron enerjisinde ve 5 cm numune kalınlığında gönderilen 10 000 000 nötron için Tablo 19'da verilen sonuçlarda deneysel ve teorik olarak zırhlamada kendini ispat etmiş olan parafin nötron geçirgenliği en düşüktür. Elde edilen sonuçlara göre PLA malzemesinin ABS malzemesine göre daha iyi bir nötron zırhlama kabiliyeti gösterdiği ifade edilebilmektedir. ABS ve PLA örneklerinin nötron zırhlama kabiliyetlerini geliştirebilmek amacıyla, daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere çalışmadaki saf PLA ve ABS organik polimerlerine geçiş metallerinden olan Hafniyum, Tungsten ve Altının sırasıyla her birinden %5, %10, %15 ve %20 eklemesiyle modellenen yeni kompozit malzemeler oluşturulmuştur.

4.1.2. ABS Tabanlı Kompozitler İçin Sonuçlar

ABS organik polimerinde geçiş metallerinden olan Hafniyum elementi %5, %10, %15 ve %20 eklenerek modellenen kompozit malzemelerden GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayıları (transportation) Tablo 20'de listelenmiştir.

Tablo 20. ABS Tabanlı Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
ABSHf5	823761	830501
ABSHf10	398942	417501
ABSHf15	197707	209100
ABSHf20	111574	122405

Tablo 20’de verilen sonuçlarda ABS organik polimerine hafniyum eklenmesiyle oluşturulan malzemeler 1 MeV enerjili 10 000 000 nötron için nötron geçirgenliği en düşük malzeme, ABSHf20 kompozitidir. Parafin için bu değer 1 000 000 nötron geçişi seviyesindedir. Tablo 20’de en düşük seviye olan %5 katkıda bile ABS polimerinin parafine göre daha iyi nötron zırhlama kabiliyetine sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

ABS organik polimerine Altın(Au) ve Tungsten(W) metal elementinin %5, %10, %15 ve %20 eklenerek elde edilen kompozit malzemenin GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısı (transportation) Tablo 21’de verilmiştir. Tablo 20’deki sonuçlardan da çıkarılabilir ki eklenilecek elementin yoğunluğu arttıkça oluşturulan kompozitten geçecek nötron sayısı (transportation) azalmaktadır.

Tablo 21. ABS Tabanlı Altın ve Tungsten Elementi Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
ABSAu5	525367	541001
ABSW5	523798	549501
ABSAu10	165136	179500
ABSW10	164057	179700
ABSAu15	60141	64500
ABSW15	59489	63000
ABSAu20	24794	28100
ABSW20	24370	27700

Tablo 21’de verilen sonuçlarda ABS organik polimerine Tungsten veya Altının eklenmesi ile oluşturulan 5 cm kalınlığındaki malzemelere 1 MeV enerjili 10 000 000 nötron gönderilmiştir. Burada açıkça görüleceği üzere nötron geçirgenliği en düşük malzeme ABSW20 ve ABSAu20 kompozit çiftleridir. Bu kompozitlerin nötron geçirgenliklerinin en düşük malzeme olmasının nedeni Tablo 13’de gösterildiği gibi Altın ve Tungstenin yoğunluklarının sırasıyla 19,25 g/cm³ ve 19,30 g/cm³ olması ayrıca bireysel olarak etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri ile bağlantılı olan kütle azaltma katsayısı literatürde 0,0106 cm²/g ve 0,0110 cm²/g olarak bilinmesidir. Dolayısıyla her iki elementin nötron zırhlamaya katkısının nerdeyse aynı olması beklenmektedir ki bu da simülasyon ile gözlemlenmiştir.

4.1.3. PLA Tabanlı Kompozitler İçin Sonuçlar

Tablo 22’de PLA organik polimerine geçiş metallere olan Hafniyum elementi %5, %10, %15 ve %20 eklenerek modellenen kompozit malzemelerden GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısını (transportation) vermektedir.

Tablo 22. PLA tabanlı Hafniyumun Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
PLAHf5	521269	527999
PLAHf10	241262	251999
PLAHf15	122177	100000
PLAHf20	68405	78600

Tablo 22’de verilen sonuçlarda PLA organik polimerine Hafniyum eklenmesiyle oluşturulan malzemeler 1 MeV enerjili 10 000 000 nötron için nötron geçirgenliği en düşük malzeme, PLAHf20 kompozitidir. Tablo 19 ile mukayese edildiğinde PLA polimerine %5 katkılı Hafniyum bile parafinden daha iyi bir nötron zırhlama kabiliyeti sergilenmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi hafniyum elementinin PLA polimerine katkılanması saf PLA’nın nötron zırhlama kabiliyetini güçlendirdiği saptanmıştır. Hafniyum katkılı PLA numuneler içerisinde en iyi nötron zırhlama kabiliyeti %20 katkı

ile elde edilirken sırasıyla %15, %10 ve %5 katkılı numuneler takip etmiştir. Ayrıca FLUKA ve GEANT4 arasındaki uyuma çok iyidir.

PLA organik polimerine yoğunlukları neredeyse aynı olan Tungsten ve Altın belirli yüzdeliklerle %5, %10, %15 ve %20 katkılanarak oluşturulan kompozit malzemelerden GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde 5 cm numune kalınlığında ve 1 MeV nötron enerjisindeki 10 000 000 nötron gönderilmiş ve geçen nötron sayısı (transportation) Tablo 23'te gösterilmektedir.

Tablo 23. PLA Tabanlı Polimere Altın ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
PLAAu5	323927	330000
PLAW5	323563	353400
PLAAu10	97927	113800
PLAW10	97904	104500
PLAAu15	33124	40800
PLAW15	33161	40400
PLAAu20	13618	16510
PLAW20	13405	17000

Tablo 23'de verilen sonuçlarda PLA organik polimerine Tungsten veya Altının eklenmesiyle oluşturulan 5 cm kalınlığındaki malzemeler 1 MeV enerjili 10 000 000 nötron gönderilmiştir ve nötron geçirgenliği en düşük malzeme PLAW20 ve PLAAu20 kompozit çiftleridir. ABS bölümünde de bahsettiğimiz gibi PLA organik polimerlerine Altın veya Tungsten ile oluşturulan kompozitlerinin nötron geçirgenliklerinin düşük olması nedeni etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ile bağlantılı olan kütle azaltma katsayısıdır.

4.1.4. PLA veya ABS Tabanlı Üçlü Kompozitler İçin Elde Edilen Sonuçlar

Polimer ana matrislerine tekli katkıdan sonra ikili katkılarda ele alınmıştır. Bu kapsamda saf olan PLA ve ABS polimerlerine kullandığımız geçiş elementlerine ikili element katkılanması simülasyon programlarında modellenmiş ve nötron zırhlama kabiliyetleri tartışılmıştır. Tablo 17’de belirtilen kompozitte PLA veya ABS polimerinin yüzde 60 katkılanarak alaşımdaki iki metalden yüzde 20’şer dâhil edilmiştir. Tablo 18 ise bu kompozitlerin yoğunluğu ve etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ile bağlantılı olan kütle soğurma katsayıları sunulmuştur. Ayrıca Tungsten ve Hafniyum (WHf) alaşımında GEANT4 ve FLUKA simülasyonu için malzeme oluşturulmuştur.

Tablo 24. 1 MeV Nötron Enerjisinde ve 5 cm Numune Kalınlığındaki Polimer Tabanlı Kompozit ve Alaşımdan Geçen Nötron Sayısı

Malzemeler	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
WHf	1598383	1560000
ABSWHf	8440	10400
PLAWHf	4821	5300

Tablo 24’de verilen sonuçlara göre bu çalışmada 5 cm numune kalınlığında ve 1 MeV enerjili 10 000 000 nötron için oluşturulan Tungsten ve Hafniyum alaşım çiftinden ve PLA, ABS polimerlerine dâhil edilmesi ile oluşturulan malzemelerin nötron tutuculuğu arttığı gözlemlenmiştir. Nötron tutuculuğunun iyi sonuçlar vermesindeki nedenler arasında Tablo 18’de verilen yoğunluk ve etkin nötron ayırma tesir kesitlerinin yüksek değerde olmasıdır. Ayrıca Tablo 24’de simülasyonlarda geçen nötron sayıları Tablo 19’daki parafinle kıyaslandığında açık ara daha az nötron geçirdiği elde edilmiştir.

4.2. 1 MeV Nötron Enerjisinde Farklı Numune Kalınlıklarında Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

Saf PLA ve ABS organik polimerleri, parafin ve Hafniyum Tungsten alaşımının organik polimerde dahil edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlığında 1 MeV enerjide 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayıları (transportation) bu kısımda sunulmaktadır.

4.2.1. PLA

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA polimeri 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlıklarda GEANT4 ve FLUKA’da modellenmiş ve 1 MeV nötron enerjisinde nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Simülasyonda 10 000 000 nötron gönderilmiş ve sonuçlar Tablo 25’de sunulmuştur. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir.

Tablo 25. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin PLA Organik Polimerinden Geçen Nötron Sayısı

Kalınlık	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
1 cm	6580947	6669254
2 cm	4333611	4448396
3 cm	2854371	2969192
4 cm	1877094	1977492
5 cm	1237760	1319791

4.2.2. ABS

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan ABS polimeri 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlıklarda GEANT4 ve FLUKA’da modellenmiş ve 1 MeV nötron enerjisinde nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Simülasyonda 10 000 000 nötron gönderilmiş ve sonuçlar Tablo 26’da sunulmuştur. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir.

Tablo 26. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin ABS Organik Polimerinden Geçen Nötron Sayısı

Kalınlık	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
1 cm	7184286	722331
2 cm	5158156	521714

Tablo 26. 'nın devamı...

3 cm	3704495	3767326
4 cm	2664299	2722740
5 cm	1914682	1964132

4.2.3. Parafin

Nötron zırhlamasında yaygın olarak kullanılan parafin malzemesi farklı kalınlıklarda simüle edilmiş ve 1 MeV nötron enerjisinde nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 27’de elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 1 MeV enerjide ABS veya PLA polimerlerini Parafinle kalınlık bakımından mukayese ettiğimizde 1 cm parafin malzemesinin yerine yaklaşık 2 cm kalınlığındaki ABS veya PLA polimer malzemesinin zırh kullanılabileceği ifade edilebilmektedir.

Tablo 27. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Parafin Malzemesinden Geçen Nötron Sayısı

Kalınlık	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
1 cm	6390201	6438917
2 cm	4081472	4120110
3 cm	2609039	2646607
4 cm	1664902	1727304
5 cm	1064964	1086703

4.2.4. PLAWHf

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA malzemesi WHf (Tungsten-Hafniyum) alaşımı ile katkılanmış ve 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlıklarda modellenmiştir. 1 MeV nötron enerjisinde nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 28’de elde edilen GEANT4 ve FLUKA simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. 10 000 000 nötron gönderilmiş ve sonuçlarında bekleneceği üzere kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir.

Tablo 28. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin PLA Polimerine Tungsten Hafniyum Alaşımının Eklemesiyle Oluşan Kompozitten Geçen Nötron Sayısı

Kalınlık	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
1 cm	2178276	2265506
2 cm	474964	511301
3 cm	103316	111400
4 cm	22530	25600
5 cm	4875	5300

4.2.5. ABSWHf

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan ABS malzemesi WHf (Tungsten-Hafniyum) alaşımı ile katkılanmış ve 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlıklarda modellenmiştir. 1 MeV nötron enerjisinde nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 29’da elde edilen GEANT4 ve FLUKA simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. 10 000 000 nötron gönderilmiş ve sonuçlarında bekleneceği üzere kalınlık artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi azaldığı görülmektedir.

Tablo 29. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin ABS Polimerine Tungsten Hafniyum Alaşımının Eklemesiyle Oluşan Kompozitten Geçen Nötron Sayısı

Kalınlık	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
1 cm	2426130	2481466
2 cm	589598	619701
3 cm	141930	156000
4 cm	34914	38400
5 cm	8513	10400

Saf ve kompozit polimerlerle ve ayrıca parafinle oluşturulan malzemelerin 1 MeV enerjide ve farklı kalınlıklarda geçen nötron sayılarının sonuçları Tablo 25, 26, 27, 28 ve Tablo 29’da verilmiştir. 5 cm kalınlığındaki kullanılan bütün malzemelerde nötron tutuculuğu beklenildiği üzere en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

4.3. 5 cm Kalınlığındaki Numuneler ve Farklı Enerjilerdeki Nötronlar İçin Simülasyon Sonuçları

Saf PLA ve ABS organik polimerleri, parafin ve bu organik polimere dahil edilen Hafniyum-Tungsten (WHf) alaşım çifti ile oluşturulan kompozit malzemelerin 5 cm kalınlığında 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayıları bu bölümde sunulmuştur.

4.3.1. PLA

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA malzemesi 5 cm olarak modellenmiş ve 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısını (transportation) nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 30’da elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Enerji artışı ile geçen nötron sayısının beklenildiği gibi arttığı görülmektedir.

Tablo 30. PLA Polimerinin 5 cm Kalınlığındaki Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı

Enerji	GEANT4	FLUKA
	Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
100 keV	268760	272899
500 keV	1056526	1128300
1 MeV	1237207	1300103
1,5 MeV	2950064	2994200
2 MeV	3652504	3687998
2,5 MeV	4179369	4219194
4,5 MeV	4701362	4644881
5 MeV	5361914	5093992

4.3.2. ABS

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan ABS malzemesi 5 cm olarak modellenmiş ve 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısını (transportation) nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 31’de elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Enerji artışı ile geçen nötron sayısının beklenildiği gibi arttığı görülmektedir.

Tablo 31. ABS Polimerinin 5 cm Kalınlığındaki Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı

Enerji	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
100 keV	171708	170199
500 keV	1020029	1050300
1 MeV	1796383	1959805
1,5 MeV	2734022	2766900
2 MeV	3370155	3378098
2,5 MeV	3707269	3758995
4,5 MeV	4431274	4415795
5 MeV	5100013	5117892

4.3.3. Parafin

Nötron zırhlamada yaygın olarak kullanılan Parafin malzemesi 5 cm olarak modellenmiş ve 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısını (transportation) nötron zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Tablo 32’de elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Enerji artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

Tablo 32. 5 cm Kalınlığındaki Parafinden Farklı Enerjilerde Geçen Nötron Sayısı

Enerji	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
100 keV	25379	21599
500 keV	419042	440800
1 MeV	1064549	1086703
1,5 MeV	1687154	1699300
2 MeV	2236198	2241498
2,5 MeV	2574074	2637796
4,5 MeV	3553729	3543396
5 MeV	4075107	4125193

4.3.3. PLAWHf

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA polimeri WHf (Tungsten-Hafniyum) kompoziti ile güçlendirilmiştir. Daha sonra malzeme 5 cm kalınlığında modellenmiş ve 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısının (transportation) zırlama kabiliyeti araştırılmıştır. Tablo 33’de elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Enerji artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

Tablo 33. 5 cm Kalınlığında, Farklı Enerjilerde PLA Polimerine Tungsten-Hafniyum Alaşımının Eklenmesiyle Geçen Nötron Sayısı

Enerji	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
100 keV	21	0
500 keV	2809	3300
1 MeV	4846	5300
1,5 MeV	100628	107600

Tablo 33. 'ün devamı...

2 MeV	212877	215699
2,5 MeV	342298	330499
4,5 MeV	537295	508899
5 MeV	857683	719798

4.3.4. ABSWHf

3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan ABS polimeri WHf (Tungsten-Hafniyum) kompoziti ile güçlendirilmiştir. Daha sonra malzeme 5 cm kalınlığında modellenmiş ve 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde 10 000 000 nötron gönderilerek GEANT4 ve FLUKA simülasyon işleminde geçen nötron sayısının (transportation) zırlama kabiliyeti araştırılmıştır. Tablo 34'de elde edilen simülasyon sonuçlarını sunmaktadır. Enerji artışı ile geçen nötron sayısının beklendiği gibi arttığı görülmektedir.

Tablo 34. 5 cm Kalınlığında, Farklı Enerjilerde ABS Polimerine Tungsten-Hafniyum Alaşımının Eklenmesiyle Geçen Nötron Sayısı

Enerji	GEANT4 Geçen Nötron Sayısı (Transportation)	FLUKA Geçen Nötron Sayısı (Transportation)
100 keV	0	0
500 keV	607	400
1 MeV	8440	10400
1,5 MeV	35563	38800
2 MeV	84791	80399
2,5 MeV	125454	126799
4,5 MeV	270207	262199
5 MeV	483472	488299

Saf ve polimer tabanlı kompozitlerle ve Parafinle oluşturulan malzemeler 5 cm kalınlığında 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV gibi farklı enerjilerde GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarında geçen nötron sayısı Tablo 30, 31, 32, 33 ve Tablo 34’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan bütün malzemeler için enerji arttıkça malzemenin nötron tutuculuğu azalmaktadır.

4.4. Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Kalınlık Değeri ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları

Bu tez çalışmasında daha önce bahsedildiği üzere etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (gama zırlamadaki karşılığı lineer zayıflatma katsayısı), YKD ve OSY gibi parametreler ele alınan malzemelerin nötron zırlama özellikleri arasında karşılaştırma yapılabilmesine olanak sağlar. Bu kapsamda, ele alınan malzemeler arasında nötron zırlama açısından karşılaştırma yapabilmek için, simülasyon işlemi sonrası elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir malzeme etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R), YKD ve OSY parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde organik PLA, ABS polimerleri ve parafinin 5 cm numune kalınlığında ve 1 MeV enerjideki etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri, Yarı kalınlık değerleri ve Ortalama serbest yol parametreleri Tablo 35, 36, 37 ve Tablo 38’de verilmiştir.

Tablo 35. GEANT4 Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları

Malzemeler	Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) (cm ⁻¹)	YKD (cm)	OSY (cm)
ABS	0,3433	2,0187	2,9123
PLA	0,4179	1,6584	2,3926
Parafin	0,4480	1,5471	2,3221
ABSWHf	1,4154	0,4889	0,7064
PLAWHf	1,5264	0,4540	0,6551

Tablo 36. FLUKA Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları

Malzemeler	Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) (cm ⁻¹)	YKD (cm)	OSY (cm)
ABS	0,3259	2,1265	3,0679
PLA	0,4080	1,6987	2,4508
Parafin	0,4438	1,5615	2,2528
ABSWHf	1,3737	0,5045	0,7279
PLAWHf	1,5085	0,4594	0,6628

1 MeV enerjili 5 cm kalınlığındaki malzemeye 10 000 000 nötron için Tablo 35 ve 36 'daki GEANT4 ve FLUKA sonuçlar göz önüne alındığında, en yüksek etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve en düşük YKD ile OSY değerine sahip malzeme, PLAWHf ve ABSWHf kompozitleridir. Hesaplamalar sonucu, her bir malzemenin 1 MeV enerjili nötronlara göre etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti, YKD ve OSY değerleri ise Tablo 37 ve Tablo 38'de verilmektedir.

Tablo 37. GEANT4 Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları

Malzemeler	Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) (cm ⁻¹)	YKD (cm)	OSY (cm)
ABSHf5	0,4992	1,3882	2,002
ABSHf10	0,6443	1,0758	1,5520
ABSHf15	0,7847	0,8833	1,2743
ABSHf20	0,8991	0,7709	1,1121
PLAHf5	0,5908	1,1732	1,6925
PLAHf10	0,7448	0,9305	1,3424
PLAHf15	0,8809	0,7867	1,1351
PLAHf20	0,9969	0,6952	1,003
ABSAu5	0,5892	1,1763	1,6970

Tablo 37.'nin devamı...

ABSAu10	0,8207	0,8445	1,2184
ABSAu15	1,0227	0,6777	0,9777
ABSAu20	1,1999	0,5776	0,8333
PLAAu5	0,6859	1,0104	1,4578
PLAAu10	0,9252	0,7491	1,0808
PLAAu15	1,1420	0,6069	0,8756
PLAAu20	1,3197	0,5251	0,7576
ABSW5	0,5898	1,1751	1,6953
ABSW10	0,8220	0,8432	1,2165
ABSW15	1,0249	0,6763	0,9756
ABSW20	1,2033	0,5759	0,8309
PLAW5	0,6861	1,0101	1,4573
PLAW10	0,9252	0,7491	1,0807
PLAW15	1,1417	0,6070	0,8758
PLAW20	1,3229	0,5239	0,7558

Tablo 38. FLUKA Kodu Yardımıyla Belirlenen Etkin Nötron Uzaklaştırma Tesir Kesiti, Yarı Değer Kalınlığı ve Ortalama Serbest Yol Sonuçları

Malzemeler	Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti (Σ_R) (cm ⁻¹)	YKD (cm)	OSY (cm)
ABSHf5	0,4997	1,3892	2,009
ABSHf10	0,6352	1,0912	1,5742
ABSHf15	0,7735	0,8961	1,2928
ABSHf20	0,8806	0,7871	1,3557
PLAHf5	0,5882	1,1783	1,6999

Tablo 38. 'in devamı...

PLAHf10	0,7361	0,9415	1,3583
PLAHf15	0,9210	0,7525	1,0857
PLAHf20	0,9691	0,7151	1,031
ABSAu5	0,5833	1,1881	1,7141
ABSAu10	0,8040	0,8620	1,2437
ABSAu15	1,0087	0,6871	0,9913
ABSAu20	1,1749	0,5899	0,8511
PLAAu5	0,6822	1,0159	1,4657
PLAAu10	0,8951	0,7743	1,1170
PLAAu15	1,1003	0,6299	0,9088
PLAAu20	1,2812	0,5409	0,7804
ABSW5	0,580	1,1945	1,7233
ABSW10	0,8038	0,8623	1,2440
ABSW15	1,0134	0,6839	0,9867
ABSW20	1,1777	0,5885	0,8490
PLAW5	0,6685	1,0367	1,4957
PLAW10	0,9122	0,7598	1,0962
PLAW15	1,1023	0,6288	0,9071
PLAW20	1,2754	0,5434	0,7840

1 MeV enerjili 10 000 000 nötron gönderilerek elde edilen sonuçlar neticesinde, 5 cm kalınlığındaki kompozit malzemeler için, en yüksek etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ve en düşük YKD ve OSY değerlerine sahip malzemeler PLA veya ABS polimerine kütsel olarak %20 dâhil edilen Hafniyum, Altın ve Tungsten kompozitlerdir. Bunun nedeni organik polimere dâhil edilen elementlerin arttırılmasıyla oluşan kompozitlerin yoğunluğunun artmasıdır.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Gelişen teknoloji ve dünya, insanoğlunun yaşamında vazgeçilmezliğini almıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle canlılar zamandan tasarruf ediyor ayrıca gündelik ihtiyaçlarını kolayca üstesinden gelmektedir. Ancak gündelik hayatta kullandığımız cihazların neredeyse hepsinde radyasyon veya uzaydan gelen kozmik ışınlar ya da yeryüzünde bulunan radyoizotoplardan yayımlanan radyasyon türevleri bulunmaktadır. Bu bazı zararlı parçacıklar canlı sağlığı için kalıtsal, kronik veya akut gibi tehlikeler arz etmektedir. Teknolojinin de ilerlemesiyle bu zararlı parçacık veya ışınlardan radyoaktivite keşfedildiğinden bu yana nükleer santrallerden tutun da tıp, sanayi sektörlerine kadar çeşitli alanlarda açığa çıkan alfa, beta, nötron parçacıkları ve gama ışınlarından korunma materyalleri geliştirilmiştir. Bu materyaller radyasyonun cinsine uygun malzeme ve kalınlıkta seçilmesi zırhlama için büyük önem teşkil etmektedir.

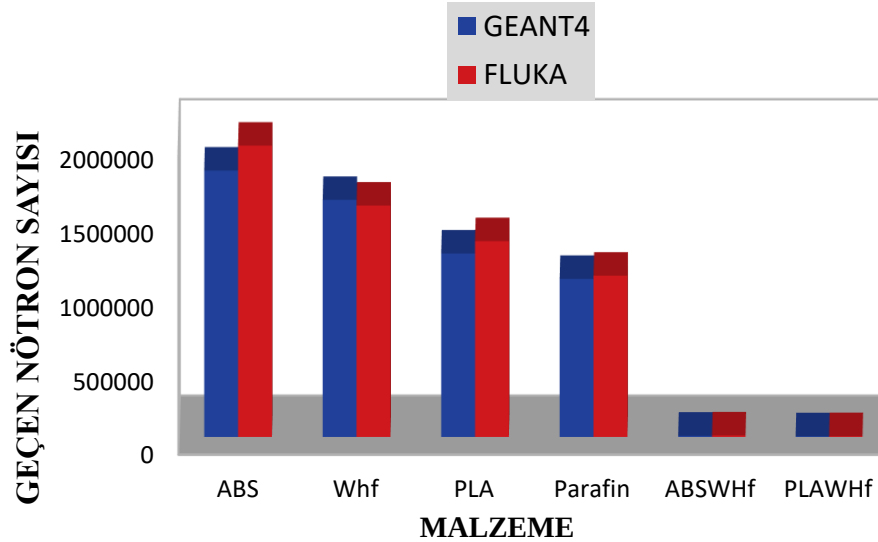
Uygun ortamın olmaması, analitik çözüm yapmaya imkân vermeyen karışık problemler ve maliyet gibi sorunlar yapısal malzemelerin zırhlaması için yapılan araştırmalarda büyük engel teşkil eder fakat bu engelleri bertaraf etmek için GEANT4, FLUKA, CEM95, GNASH, TALYS, PCROSS, ALICE/ASH, MCNP ve EMPIRE gibi birçok simülasyon programları geliştirilmiştir. Bu çalışmada GEANT4 ve FLUKA programları ve teorik hesaplamalardan yararlanılmıştır.

Radyasyon zırhlama teknolojilerinde kullanılacak malzemelerin öncelikle zırhlama performanslarının iyi olmasının yanı sıra ekonomik de olması tercih sebebidir. Günümüzde gama radyasyonunu zırhlamak için demir, beton veya kurşun blok gibi malzemeler seçilirken, nötron parçacığını yavaşlatmak için ise hidrojen zengin, hidratlı materyaller veya parafin seçilir.

Bu tez çalışmasında, 3D yazıcılarda kullanılan hidrojen zengin olan PLA ve ABS organik polimerlerinin nötron radyasyonuna karşı zırhlamada kullanılabilirliğini göstermek amaçlanmıştır. Bunu yaparken her iki polimere de nötron zırhlamada etkin olabileceği düşünülen Hafniyum, Tungsten ve Altın elementleri %5, %10, %15 ve %20 kütlece katkılanarak kompozit güçlendirilmesi planlanmıştır. Bu elementlerin tercih edilmesi hem yoğunluklarının büyük olması hem de etkin nötron ayırma tesir kesitlerinin yüksek olmasıdır. Etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti değerleri ve simülasyon sonuçları, iyi bir nötron zırhlama malzemesi olarak bilinen parafin ile karşılaştırılmıştır.

Her bir malzeme için etkin kütle azaltma katsayısı değerlerinin hesaplamaları 3.Bölümde yapılmıştır. Daha önceki bölümlerde söylendiği gibi, bir malzeme için etkin nötron

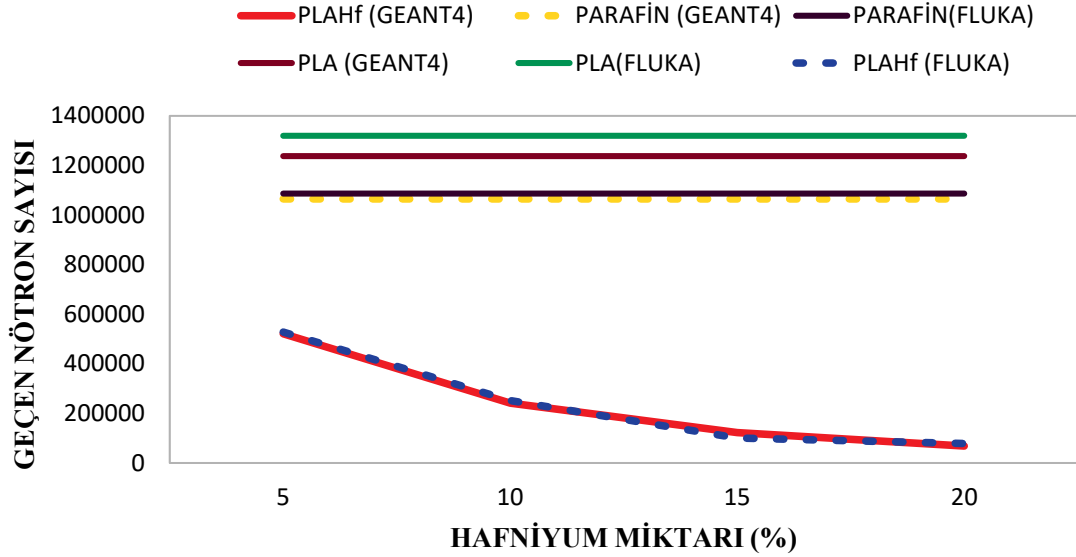
ayırma tesir kesiti değerinin ne kadar büyük ise malzemenin nötron tutuculuğu o kadar iyi olduğunu gösterir. Bu bilgilerden yola çıkarak saf PLA, ABS polimerleri ve parafinin sırasıyla etkin kütle azaltma katsayıları 0,0937 ve 0,0953 (cm^2/g) ve parafinin 0,12 (cm^2/g) dir. Bölüm 4.1.1’de yine saf halde bulunan PLA, ABS polimerleri ve Parafinin GEANT4 ve FLUKA simülasyonunda 10 000 000 nötron göndererek elde edilen sonuçlarda parafinin etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ile de paralel olarak nötron tutuculuğu yüksektir. Bu çalışmada simülasyon değerlendirilmesi için ise daha önce de belirtildiği gibi GEANT4 ve FLUKA simülasyon programı kullanılmıştır ve sonuçlar daha önceki bölümlerde verilmiştir. Burada altı çizilmesi gereken nokta nötron zırhlama kabiliyeti için elde edilen sonuçlara bakıldığında teorik ve simülasyon sonuçlarının uyuşmasıdır. Bu sonuçlar kullanılarak grafikler oluşturulmuş olup malzemeler arasında karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 26. GEANT4 ve FLUKA İçin 5 cm Kalınlığında 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Geçen Nötron Sayısı

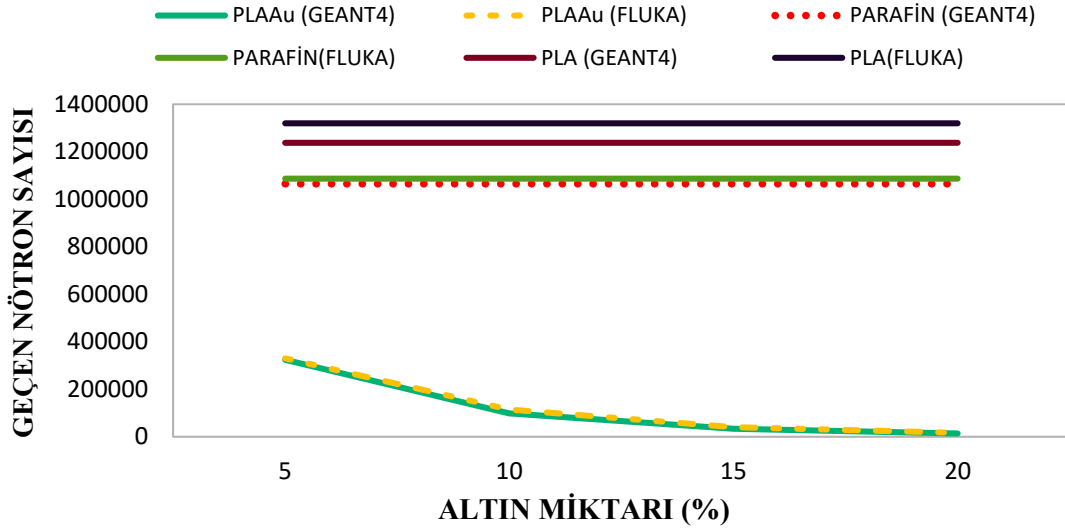
Şekil 26’da görüldüğü üzere saf PLA polimerinin parafin malzemesiyle neredeyse aynı geçen nötron sayısına sahiptir. Daha sonra bu ABS ve PLA polimerlerine WHf alaşımı eklemesiyle oluşan kompozit materyaller Bölüm 4.1.4 simülasyonda çıkan sonuçlar ve Tablo 18’deki kütle azaltma katsayısı ile bağlantılı olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti nötron zırhlaması açısından Parafinden daha uygun malzemeler olduğu görülmüştür.

Şekil 27’de 1 MeV nötron enerjisinde ve 5 cm numune kalınlığındaki PLA polimerine %5, %10, %15 ve %20 Hafniyum katkı ile oluşturulan kompozit malzeme çalışmasından geçen nötron sayısını grafiksel şeklini vermektedir.



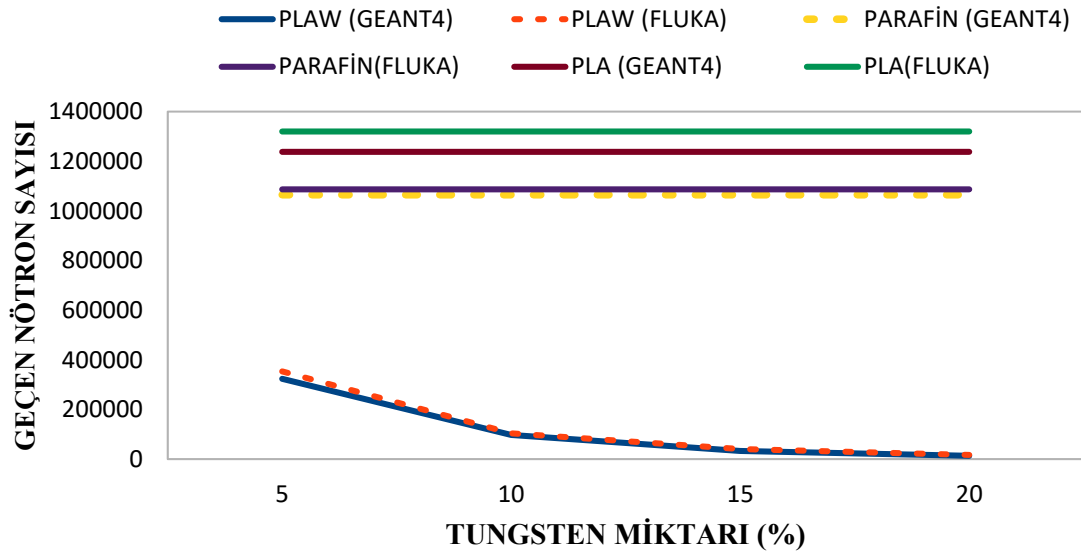
Şekil 27. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Şekil 27; Tablo 22’den faydalanılarak oluşturulmuş ve 1 MeV nötron enerjisindeki saf PLA polimeri, Parafin ve PLA polimerine kütlece belirli miktarlarda Hafniyum katkı kompozitin GEANT4 ve FLUKA için malzemeden geçen nötron sayısı gösterilmektedir. Nötron zırhlaması için kompozit materyalde hafniyum miktarı arttıkça malzemenin nötron tutuculuğu da artmaktadır ve en yüksek olan PLA-Hf20’dir. Bunun nedeni Tablo 15’te hesaplanan kütle azaltma katsayısı veya onunla bağlantılı olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti ile ilişkili olmasıdır.



Şekil 28. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Altın Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Şekil 28’de 1 MeV nötron enerjisinde saf PLA polimeri, Parafin ve PLA tabanlı polimere kütlece belirli miktarlarda Altın elementi katkıli kompozit numunelerin GEANT4 ve FLUKA için malzemedan geçen nötron sayısı gösterilmektedir. Nötron zırhlaması için kompozit materyalde Altın miktarı arttıkça malzemenin nötron tutuculuğuda artmaktadır ve nötron geçirgenliği en az olan PLAAu20’dır.

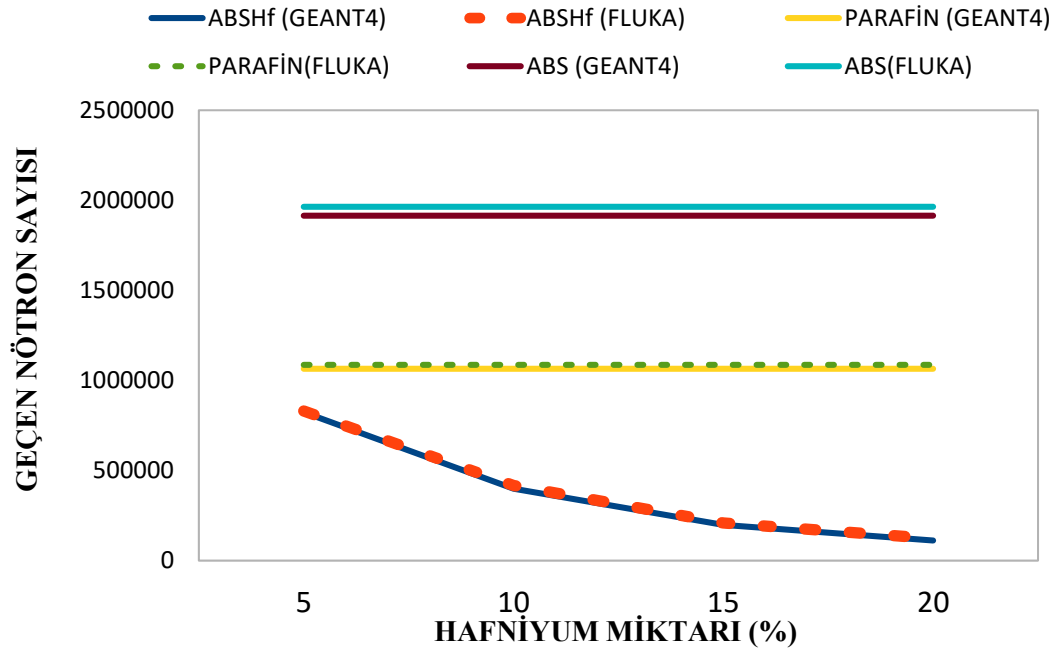


Şekil 29. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Şekil 28 ve Şekil 29 Tablo 23’ten faydalanılarak oluşturulmuştur. Şekil 28’te saf PLA polimeri, parafin ve PLA tabanlı kütlece katkılanan Tungsten kompoziti gösterilmiştir.

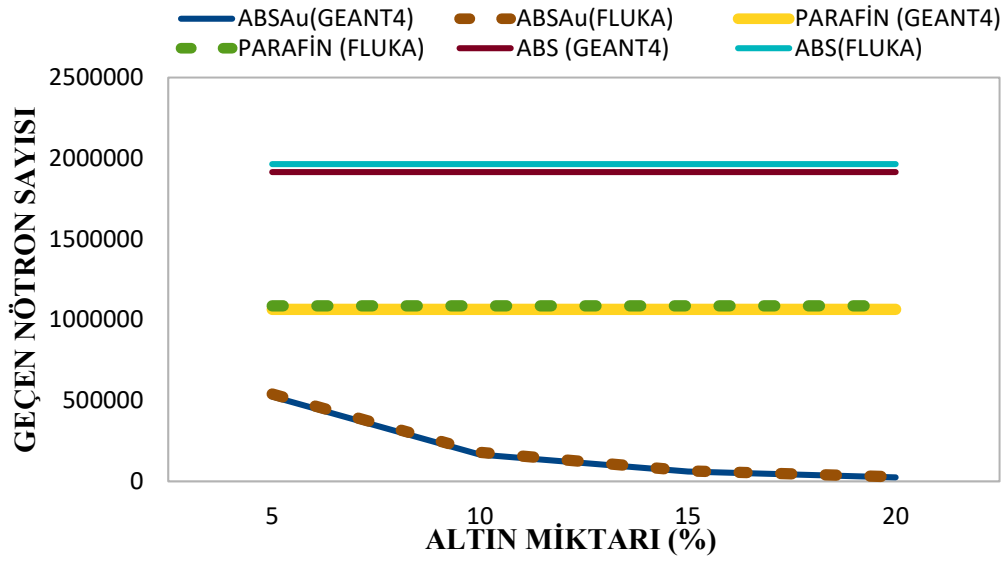
Nötron zırhlaması için kompozit materyalde Tungsten miktarı arttıkça malzemenin nötron tutuculuğu da artmaktadır ve nötron geçirgenliği en az olan PLAW20'dir. Bunun nedeni Tablo 15'te verilen kütle azaltma katsayısı ve onunla ilişkili olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitidir.

Şekil 30'da 1 MeV nötron enerjisinde 5 cm numune kalınlığındaki ABS polimerine %5, %10, %15 ve %20 Hafniyum katkı ile oluşturulan kompozit malzeme çalışmasından geçen nötron sayısını grafiksel şeklini vermektedir.



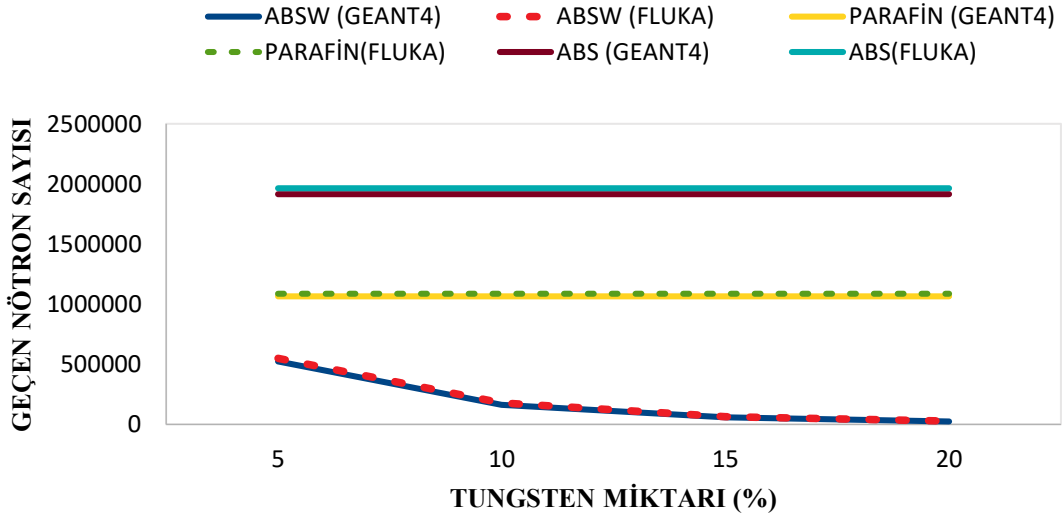
Şekil 30. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Hafniyum Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Şekil 30'daki grafik, Tablo 20'deki verilerden yola çıkılarak 1 MeV nötron enerjisinde ve 5 cm numune kalınlığındaki saf ABS polimeri, parafin ve ABS tabanlı belirli miktarlarda Hafniyum katkı kompozitin, GEANT4 ve FLUKA için malzemedan geçen nötron sayısı belirlenmiştir. Tablo 16'daki kütle azaltma katsayısı ile bağlantılı olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti, nötron zırhlama açısından parafinden daha uygun malzemeler olduğu görülmüştür. Nötron zırhlaması için kompozit materyalde Hafniyum miktarı arttıkça malzemenin nötron tutuculuğuda artmaktadır.



Şekil 31. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Altın Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

Şekil 31'deki karşılaştırmadan görüldüğü üzere 1 MeV nötron enerjili ve 5 cm numune kalınlığındaki saf ABS polimeri, Parafin ve ABS tabanlı kütlece belirli miktarlarda Altın elementi katkılı kompozitin GEANT4 ve FLUKA için malzemeden geçen nötron sayısı Tablo 21'den faydalanılarak oluşturulmuştur. Nötron zırhlaması için kompozit materyalde Altın miktarı arttıkça malzemenin nötron tutuculuğuda artmaktadır ve nötron geçirgenliği en az olan ABSAu20'dir.



Şekil 32. 5 cm Numune Kalınlığında ve 1 MeV Nötron Enerjisi İçin Parafin ve Tungsten Katkılı Kompozitlerden Geçen Nötron Sayısı

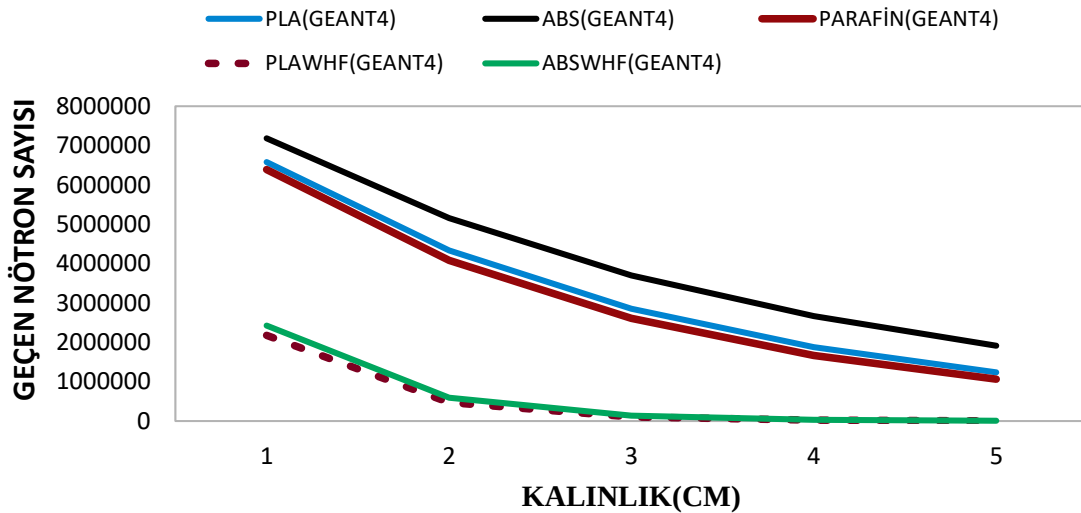
Şekil 32'deki karşılaştırmadan görüldüğü üzere 1 MeV nötron enerjili ve 5 cm numune kalınlığındaki saf ABS polimeri, Parafin ve ABS tabanlı kütlece Tungsten katkılı

kompozitten GEANT4 ve FLUKA için malzemeden geçen nötron sayısı gösterilmektedir. Tablo 16'daki Altın elementiyle neredeyse aynı yoğunluk, kütle azaltma katsayısı ve geçen nötron sayısına sahip Tungsten katkılı kompozitlerin nötron zırlaması için Altın yerine tercih edilmiş ve Hafniyum ile gerek alaşımı gerekse polimer tabanlı kompozitleri yapılmıştır.

Bölüm 4'deki GEANT4 ve FLUKA simülasyonları kütle azaltma katsayısı ile bağlantılı olan etkin nötron uzaklaştırma tesir kesiti, ortalama serbest yol ve yarı değer kalınlığı gibi parametrelere paralel olarak yapılan simülasyon sonuçları neticesinde PLA ve ABS polimerlerine hafniyum, tungsten veya altın elementinin kütlece dâhil edilmesiyle oluşturulan kompozit materyaller arasında sonucunda en iyi etkin nötron ayırma tesir kesiti ABSW20 ve PLAW20 sonucuna ulaşılmıştır.

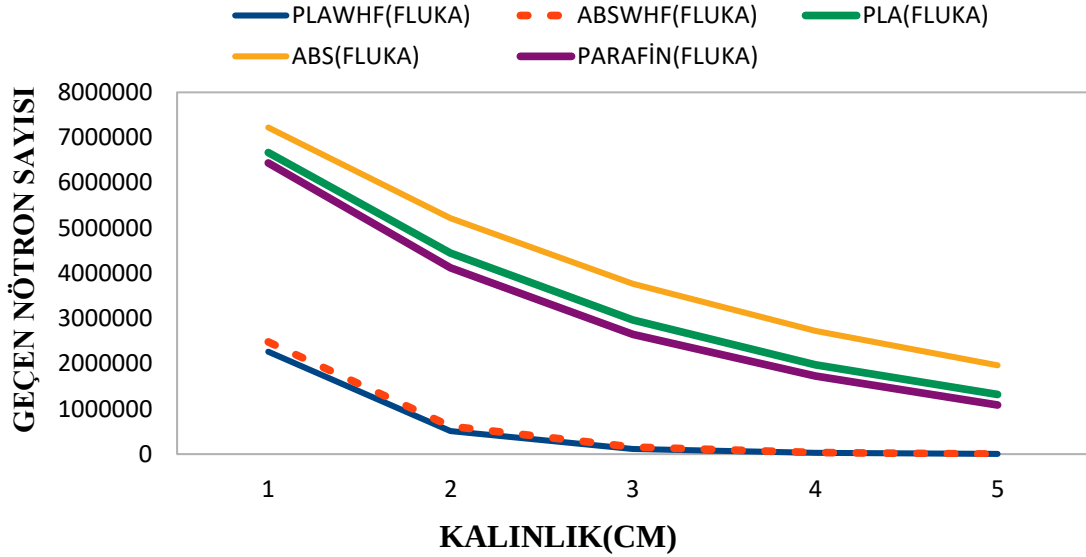
Hafniyum ve Tungsten alaşımıyla oluşturulan kompozit polimerin yoğunlukları ve kütle azaltma katsayılarının yanı sıra ayrıca etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitleri, OSY ve YDK gibi parametrelerin Tablo 35 ve Tablo 36'da gösterildiği üzere seçilen malzemeler arasında zırlama için ABSW20 ve PLAW20 kompozitlerinin en iyi sonuçlar olduğu gösterilmektedir.

1 MeV nötron enerjili ve 1, 2, 3, 4 ve 5 cm numune kalınlığındaki PLA ve ABS polimerlerine ve WHf katkılı kompozit malzemeden GEANT4 çalışmasından geçen nötron sayısını grafiksel şeklini vermektedir.



Şekil 33. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Farklı Kalınlıklardaki PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin GEANT4 Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı

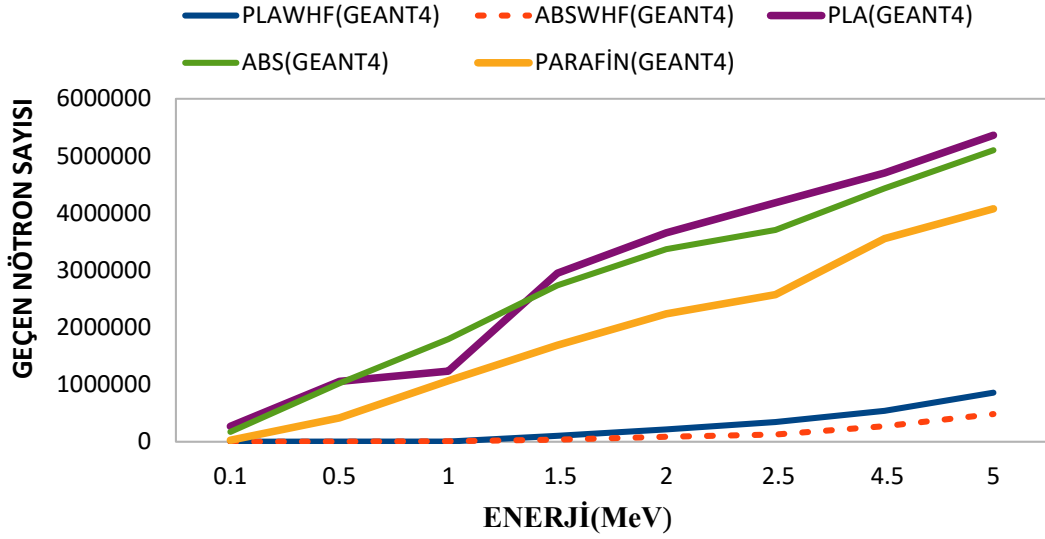
1 MeV enerjili 1, 2, 3, 4 ve 5 santimetre kalınlığındaki PLA ve ABS polimerlerine ve WHf katkılı kompozit malzemeden FLUKA çalışmasından geçen nötron sayısını grafiksel şeklini vermektedir.



Şekil 34. 1 MeV Enerjili Nötronlar İçin Farklı Kalınlıklardaki PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin FLUKA Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı

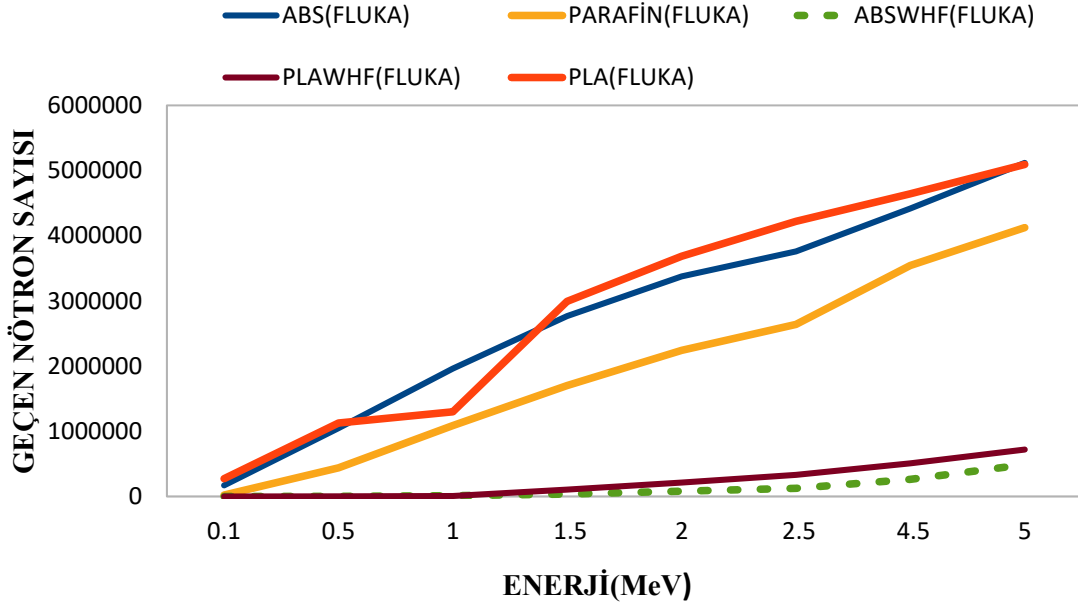
Tablo 25, 26, 27, 28 ve Tablo 29'dan faydalanılarak elde edilen Şekil 33 GEANT4 ve Şekil 34 FLUKA simülasyonunda 1 MeV nötron enerjisinde 1, 2, 3, 4 ve 5 cm numune kalınlığındaki PLA, ABS ve bu organik polimerlere %40 oranında dâhil edilen Tungsten-Hafniyum alaşımı ve Parafini referans alarak kalınlığa bağlı geçen nötron sayısı grafikleri oluşturuldu. Buradan da kalınlık arttıkça herhangi malzemenin aynı enerji aralığında geçen nötron sayısı azalmaktadır. Ayrıca simülasyon çalışmasında gösterildiği üzere PLAWHf ve ABSWHf 1 MeV nötron enerjisinde ve 5 cm numune kalınlığında gönderilen 10 000 000 nötronun PLAWHf %99,95, ABSWHf için % 99,91 tutmuştur. Zırhlama açısından herhangi bir beis görmemekle beraber ayrıca istenilen sonuçları GEANT4 ve FLUKA simülasyon çalışmalarında elde edilmiştir.

5 cm numune kalınlığında 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde PLA ve ABS organik polimeri, parafin ve organik polimere Tungsten-Hafniyum (WHF) katkılı kompozit malzemeden GEANT4 çalışmasında geçen nötron sayısı Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. 5 cm Kalınlığında Farklı Enerjilerde PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin GEANT4 Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı

5 cm kalınlığında 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerjilerde PLA ve ABS organik polimeri, Parafin ve organik polimere WHF katkıli kompozit malzemeden FLUKA çalışmasında geçen nötron sayısını Şekil 36'da verilmektedir.



Şekil 36. 5 cm Kalınlığında Farklı Enerjilerde PLA, ABS ve Kompozit Materyallerinin FLUKA Çalışmasında Geçen Nötron Sayısı

Tablo 30, 31, 32, 33 ve Tablo 34'den faydalanılarak elde edilen Şekil 35 GEANT4 ve Şekil 36'da FLUKA simülasyonunda 5 cm kalınlığında 100 keV, 500 keV, 1 MeV, 1,5 MeV, 2 MeV, 2,5 MeV, 4,5 MeV ve 5 MeV enerji aralıklarında PLA, ABS ve bu organik polimerlere %40 oranında dâhil edilen Tungsten-Hafniyum alaşımı ve Parafin malzemelerinin farklı enerji aralığındaki dağılımı gösterilmektedir. Burada tüm malzemeler için belirli bir kalınlıkta enerji arttıkça malzemenin nötron tutuculuğu azalmaktadır. Ayrıca çalışmada 100 keV enerji aralığında ve 5 cm kalınlığında gönderilen 10 000 000 nötronun ABSWHf için GEANT4 ve FLUKA simülasyon programlarında hiç nötron geçirmediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni etkin nötron ayırma tesir kesiti belirli enerji aralığında uygulanabilir olması ve kalınlık 100 keV nötron enerjisine göre fazla olmasıdır.

Bu çalışmada gerek enerji değişimi ile geçen nötron sayısına (transportation) gerekse kalınlık değiştirerek çıkan sonuçlara baktığımızda nötronik zırhlama açısından etkin nötron uzaklaştırma tesir kesitinin yanı sıra içerisinde geçiş metalleri ve Hidrojen bulunduran kompozitler tercih sebebidir. Bu sonuçlarla birlikte içerisinde Hidrojen içermesi ve nötron tutucu metaller bulundurması bakımından PLAWHf ve ABSWHf kompozitlerin parafinden daha makul sonuçlar çıkarmıştır. Simülasyonik sonuçlar FLUKA ve GEANT4 programlarında test edilmiş ve sonraki çalışmalara öncülük etmeyi hedeflemektedir.

KAYNAKÇA

- Abdo, A. E. S., Ali, M. A. M., & Ismail, M. R. (2003). Natural fibre high-density polyethylene and lead oxide composites for radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*, 66(3), 185-195. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(02\)00470-X](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00470-X)
- AbuAlRoos, N. J., Azman, M. N., Amin, N. A. B., & Zainon, R. (2020). Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*, 78, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>
- Adsul, M. G., Varma, A. J. and Gokhale, D. V. (2007) Lactic acid production from waste sugarcane bagasse derived cellulose, *Green Chemistry*, 9(1), pp. 58–62. <https://doi.org/10.1039/b605839f>.
- Aguilar-Duque, J. I., Hernández-Arellano, J. L., Avelar-Sosa, L., Amaya-Parra, G., Tamayo-Pérez, U. J. (2018). Additive manufacturing: Fused deposition modeling advances. In *Best Practices in Manufacturing Processes: Experiences from Latin America* (pp. 347–366). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99190-0_16
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... & 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)
- Akhdar, H. (2022). Theoretical Investigation of Gamma-and Neutron-Shielding Properties of Polysulfone (PSU) Polymer Material Using Geant4. *Polymers*, 14(16), 3374. <https://doi.org/10.3390/polym14163374>
- Akman, F., Ogul, H., Kaçal, M.R. vd. Impact of lead(II) iodide on radiation shielding properties of polyester composites. *Appl. Phys. A* 126, 301 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03494-6>
- Akkurt, I. & El-Khayatt, A.M. (2013). The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding. *Annals of Nuclear Energy* (Oxford), 5-9. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.08.026>
- Alam, M. N., Miah, M. M. H., Chowdhury, M. I., Ghose, S., & Rahman R. (2001). Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276–1332 keV. *Applied Radiation and Isotopes (Volume 54, Issue 6 ,Pages 973-976)*. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00354-7](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00354-7)
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. E. A., Araujo, H. A. A. H., Dubois, P. A., Asai, M. A. A. M., ... & Yoshida, H. A. Y. H. (2006). Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on nuclear science*, 53(1), 270-278. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826>
- Alonso, F. F., Price, D. L., Lucatorto T., Parr A. C., & Baldwin, K. (vd). (2013). *Experimental methods in the physical sciences*. Academic Press.
- Alssabbagh, M., Abdulmanap, M., & Zainon, R. (2017). Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality. *Radiation Physics and Chemistry*, 135, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.02.009>
- Arkun, E. (2006). Paslanmaz çelik saclarda şekillendirme karakteristikleri, (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul).

- Auras, R., Harte, B. and Selke, S. (2004a). An overview of polylactides as packaging materials, *Macromolecular Bioscience*, 4(9), pp.835-864. doi:10.1002/mabi.200400043.
- Avdal, B., M., Abdulmanap, M., & Zainon, R. (2013). Nitrogenous Special Environments. <https://doi.org/636344.5704>
- Averous, L., Kalia, S., “Biopolymers: biomedical and environmental applications”, First Edition, *John Wiley&Scrivener pub.*, 433-435, (2011).
- Aygün, B., 2010, Değişik yağ oranlarına sahip parafin waxlarda hızlı nötronların makroskopik soğrulma tesir kesitlerinin belirlenmesi ve değişen yağ oranının zırhlama üzerindeki etkisinin araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum).
- Aygün, B.(2015) *Nükleer uygulamalarda radyasyon güvenliği amacıyla yeni kalkan malzemelerin deneysel ve monte carlo simülasyon kodları(cern-fluka ve geant4) ile belirlenmesi ve fabrikasyonu* (Yayınlanmış doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum).
- Boyacıoğlu, S.(2017). *Termoplastik poliüretan karışımlarının mekanik, termal özellikleri ve şekil hafıza davranışının incelenmesi* (yayınlanmış yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., Fassò, A., Ferrari, A., Ortega, P. G., ... & Vlachoudis, V. (2014). The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear data sheets*, 120, 211-214. <https://doi.org/10.5170/CERN-2005-010>
- Bucknall, C. B. (1977). *Toughened plastics* (p. 188). London: Applied Science Publishers.
- Camargo, J. C., Machado, Á. R., Almeida, E. C., Silva, E. F. M. S. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5-8), 2423-2443. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>
- 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.
- Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S. (2010). Rapid prototyping: Principles and applications, third edition. In *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, Third Edition. <https://doi.org/10.1142/6665>
- Datta, R., & Henry, M. (2006). Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies—a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 81(7), 1119-1129. <https://doi.org/10.1002/jctb.1486>
- Dilsiz, K., Ogul, H., Akman, F., Agar, O., Kaçal, M. R., Polat, H., & Dursun, İ. (2021). Evaluation of CdS doped polyester composites regarding gamma and neutron shielding properties. *Progress in Nuclear Energy*, 139, 103865. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103865>

- El Abd, A. A., & Elkady, A. S. (2014). A method for simultaneous determination of effective removal cross-section for fast neutrons and mass absorption coefficient for gamma rays. *Mater Sci Eng*, 2(2), 1-6. <http://dx.doi.org/10.15226/sojmse.2014.00113>
- El-Khayatt, A. M. (2010). Calculation of fast neutron removal cross-sections for some compounds and materials. *Annals of Nuclear Energy*, 37(2), 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.10.022>
- El-Khayatt, A. M., & Abdo, A. E. S. (2009). MERCSEF-N: A program for the calculation of fast neutron removal cross sections in composite shields. *Annals of Nuclear Energy*, 36(6), 832-836. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.01.013>
- Ertaş, H. (2014). *Kurşun Madeni Atıklarının Radyasyon Zırhlama Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi*, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gümüşhane, 74.
- Emsley, J., 2001, *Molecules At An Exhibition: Portraits of Intriguing Materials in Everyday Life*, p.297, Oxford University Press .
- Farah, S., Anderson, D. G. and Langer, R. (2016) Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications -A comprehensive review, *Advanced Drug Delivery Reviews*. Elsevier B.V., 107, pp. 367–392. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- Guatelli, S., Cutajar, D., Oborn, B., & Rosenfeld, A. B. (2011, May). Introduction to the Geant4 Simulation toolkit. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1345, No. 1, pp. 303-322). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3576174>
- Habashi, F., 1997. *Handbook of Extractive Metallurgy*, Wiley-VCH, Germany.
- Hevesy, G., (1925) " Hafniyum'un Keşfi ve Özellikleri ." *Chemical Reviews*, cilt. 2, hayır. 1, *American Chemical Society (ACS)*, Nisan 1925, s. 1-41.
- Khanna, A., Bhatti, S. S., Singh K.J., & Thind, K. S. (1996). Gamma-ray attenuation coefficients in some heavy metal oxide borate glasses at 662 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Volume 114, Issues 3–4, Pages 217-220)*. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(96\)00196-6](https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00196-6)
- Kılınçarslan, Ş., BAŞYİĞİT, C., & AKKURT, İ. (2007). Barit agregalı ağır betonların radyasyon zırhlama amacıyla kullanımının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 393-399.
- Kobayashi, S., Hosoda, N., & Takashima, R. (1997). Tungsten alloys as radiation protection materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 390(3), 426-430.
- Korkut, T., Ün, A., Demir F., Karabulut, A., Budak, G., Şahin, R., & Oltulu, M. (2010). Neutron dose transmission measurements for several new concrete samples including colemanite. *Annals of Nuclear Energy (Volume 37, Issue 7, 996-998)*. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2010.04.005>
- Lide, D. R. (Ed.). (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (Vol. 85). CRC press.

- Lim, L. T., Auras, R. and Rubino, M. (2008) Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in Polymer Science* (Oxford), 33(8), pp. 820–852. doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.
- Lin, L., Deng, C., Lin, G., Wang, Y., (2014). Mechanical Properties, Heat Resistance and Flame Retardancy of Glass Fiber-Reinforced PLA-PC Alloys Based on Aluminum Hypophosphite. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 53, 613–625. doi:10.1080/03602559.2013.866244
- McAlister, D. R. (2016). Neutron shielding materials. *PG Research Foundation*.
- Molina Higgins, M. C., Radcliffe, N. A., Toro-González, M., & Rojas, J. V. (2019). Gamma ray attenuation of hafnium dioxide-and tungsten trioxide-epoxy resin composites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 322(2), 707-716. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06714-3>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Olam, M.(2021). *3D yazıcılar için polimer esaslı kompozit filament üretimi* (yayınlanmış doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü) .
- Ozbolat, I. T., Chen, H., Yu, Y. (2014). Development of “Multi-arm Bioprinter” for hybrid biofabrication of tissue engineering constructs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(3), 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.10.005>
- Misra, M.,Nagarajan, V. & Mohanty, A. K. (2016) Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(6), pp. 2899–2916. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00321>.
- Pais, Abraham (1986) *Inward Bound of matter and forces in the physical world* Oxford Oxford: Oxford University Press.
- Podgorsak, E. B. (2008). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*.
- Rasal, R. M., Janorkar, A. V. and Hirt, D. E. (2010) Poly(lactic acid) modifications, *Progress in Polymer Science* (Oxford). Elsevier Ltd, 35(3), pp. 338–356. doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003.
- Rashidi, M. S., Doranehgard, M. H., & Li, L. K. (2020). Organic Phase Change Materials. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.12114-9>
- Refaa, Z., Xin, S., & Siginer, D. A. (2017). Thermophysical analysis and modeling of the crystallization and melting behavior of PLA with talc. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128(2), 687-698. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5961-1>
- Topal, M.(2019). *Parafin ve metal tozu dolgulu epoksi reçinesi üretimi ve nötron zırhlama parametrelerinin belirlenmesi* (yayınlanmış yüksek lisans tezi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Tüccar Kılıç, N. (2019). Epoksi-Poss Nanoparçacıklarının Poli(Laktik Asit) Temelli Polimer Karışımlarında Uyumlaştırıcı Olarak Kullanılabilme Potansiyelinin Araştırılması (Doktora tezi). <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/1281>
- Tümer, A., Zararsız, S., Tanrikut, A., 2004. *Türkiye'nin Nadir Toprak Elementleri-Toryum Kompleks Cevheri İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar Ve İleriye Yönelik Öneriler*, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
- URL-1 ("Atom",2022) Atom. (2022,Şubat 20). İçinde Wikipedia <https://tr.wikipedia.org/wiki/Atom>
- URL-2,(2013). ATOM/atomic-structure. Erişim: 2 Mayıs 2013, <https://fineartamerica.com/featured/atomic-structure-roger-harris.html>
- URL-3,(2022). 1932 A watershed year in nuclear physics - Scientific Figure on ResearchGate. Erişim: 3 Mayıs 2022, https://www.researchgate.net/figure/James-Chadwicks-setup-for-his-1932-discovery-of-the-neutron-The-polonium-210-source_fig2_235763977
- URL-4,(2018). Akkuyu Nükleer Güç Santrali ve Enerji Bağımlılığımız Erişim: 30 Temmuz 2018, <https://thinktech.stm.com.tr/tr/akkuyu-nukleer-guc-santrali-ve-enerji-bagimlilikimiz>
- URL-5 ,(2022). Protection Against Radiation. Erişim: 06 Mayıs 2022 <https://sites.duke.edu/missiontomars/the-mission/effects-of-radiation/protection-against-radiation/>
- URL-6 ,(2022) Akrilonitril Bütadien Stiren Üretimi. Erişim: 4 Mayıs 2022. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/akrilonitril-butadienstiren-abs-abs.html>
- URL-7 ,("Karbon",2022) Karbon. (2022,Nisan 23). İçinde Wikipedia https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon#cite_ref-1
- URL-8 ("Kükürt",2022) Kükürt. (2022,Ocak 8). İçinde Wikipedia <https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C3%BCk%C3%BCrt>
- URL-9 ,(2017). Potasyumun Kullanım Alanları. Erişim: 24 Kasım 2017 <http://www.karmabilgi.net/potasyumun-kullanim-alanlari/>
- URL-10("Hafniyum",2021) Hafniyum. (2021,Nisan 21).İçinde Wikipe di https://tr.abcdef.wiki/wiki/Isotopes_of_hafnium
- URL-11("Tungsten",2022) Tungsten/image ID: 93862745. Erişim : 04 Mayıs 2022. https://fr.123rf.com/photo_93862745_la-wolframite-wolfram-minerai-.html?vti=mpowwvkrpx1nkkms6r-1-3
- URL-12("Gold",2022) Gold. (2022,Nisan 28).İçinde Wikipe di <https://en.wikipedia.org/wiki/Gold>
- Viskadorakis, Z., Vasilopoulos, K. C., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., & Kenanakis, G. (2017). Electromagnetic shielding effectiveness of 3D printed polymer composites. *Applied Physics A*, 123(12), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1353-z>
- Woosley, S., Galehdari, N. A., Kelkar, A., & Aravamudhan, S. (2018). Fused deposition modeling 3D printing of boron nitride composites for neutron radiation shielding. *Journal of Materials Research*, 33(22), 3657-3664.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa YÜKSEKYAYLA

Eğitim Durumu

Lise : Şanlıurfa İmam Hatip Lisesi, 2015

Lisans : Sinop Üniversitesi – Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi-
Nükleer Enerji Mühendisliği, 2019

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Şanlıurfa Mehmet Akif İnan Eğitim ve Araştırma Hastanesi
Nükleer Tıp Birimi - Stajyer, 2017

İş Yeri : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu- Stajyer, 2018