

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**RADYASYON KALKANI OLARAK
UZAY GİYSİSİ MALZEMELERİNİN SİMÜLASYONU**

Elif ÇEÇEN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

EKİM 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**RADYASYON KALKANI OLARAK
UZAY GİYSİSİ MALZEMELERİNİN SİMÜLASYONU**

Elif ÇEÇEN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

EKİM 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADYASYON KALKANI OLARAK
UZAY GİYSİSİ MALZEMELERİNİN SİMÜLASYONU

Elif ÇEÇEN
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 25/10/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ (Danışman)

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Dr. Öğr. Üyesi Tolga ATAY

ÖZET

RADYASYON KALKANI OLARAK UZAY GİYSİSİ MALZEMELERİNİN SİMÜLASYONU

Elif ÇEÇEN

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

Ekim 2024; 68 sayfa

Bu tez çalışmasında uzay ortamında gerçekleşen olaylar dikkate alınarak koruyucu giysi malzemelerinin simülasyonu Geant4 ile yapılmıştır. Uzay giysilerinin tasarımı ve üretimi yüksek maliyetli olduğundan dolayı giysi üretilmeden önce simülasyon programlarında test edilmesi, kullanılacak materyallerin seçilmesi açısından önemlidir.

Simüle edilen uzay giysisi beş katmandan oluşturulmuştur. Oluşturulan katmanlarda sırasıyla içten dışa doğru; Su, polipropilen, Kevlar, polietilen ve altın materyalleri kullanılmıştır. Bu katmanların içerisinde ise insan dokusunu oluşturmak için iskelet ve doku tanımlanmıştır. Materyal olarak ilk katmanda su tercih edilme nedeni uzay radyasyonuna karşı koruyucu bir kalkan görevi görmesidir. İkinci katmanda polipropilen tercih edilme nedeni hafif yapısı sayesinde uzay giysisinin ağırlığını oldukça azaltması ve yıpranmaya karşı dayanıklı ve dirençli olmasıdır. Üçüncü katmanda kullanılan Kevlar ise koruyucu giysilerde en çok tercih edilen materyaldir. Yüksek mukavemet ve darbe direncine sahiptir. Dördüncü ve beşinci katmanda kullanılan polietilen ve altın, polietilenin esnek ve kompozit olarak kullanılabilir yapısı sayesinde altın ile katmanlı bir yapı oluşturarak altın kaplamalı polietilen “gold grafted polyethylene” olarak ifade edilen koruyucu materyali sağlamaktadır.

Son olarak Geant4 ile uzay ortamında modellenen uzay giysisine proton, elektron, nötron, alfa ve foton parçacıkları gönderilerek parçacık-madde etkileşimi simüle edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda farklı katmanlarda farklı etkileşimler gözlenmiştir. Gönderilen parçacık türüne ve enerjisine göre katmanlarda kullanılan materyallerdeki etkileşimler değişmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Geant4, Radyasyon Kalkanlama, Simülasyon, Uzay Giysisi, Uzay Görevi

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Dr. Öğr. Üyesi Tolga ATAY

ABSTRACT
**SIMULATION OF SPACESUIT MATERIALS AS
RADIATION SHIELD**

Elif ÇEÇEN

MSc Thesis in Space Science and Technology

Supervisor: Asst.Prof.Dr. Burçin DÖNMEZ

October 2024; 68 pages

In this thesis, the simulation of protective clothing materials was performed with Geant4 by considering the events occurring in the space environment. Since the design and production of space suits are costly, testing them in simulation programs before the actual production is important in terms of selecting the materials to be used.

The simulated space suit is composed of five layers. In the layers created, from inside to outside; Water, polypropylene, Kevlar, polyethylene and gold materials were used. In these layers, the skeleton and tissue were defined to form the human tissue. The reason why water was preferred as a material in the first layer is that it acts as a protective shield against space radiation. The reason why polypropylene was preferred in the second layer is that it reduces the weight of the space suit considerably thanks to its lightweight structure and is durable and resistant to wear. Kevlar used in the third layer is the most preferred material in protective clothing. It has high strength and impact resistance. Polyethylene and gold used in the fourth and fifth layers, thanks to the flexible and composite structure of polyethylene, form a layered structure with gold and provide the protective material called gold-plated polyethylene “gold grafted polyethylene”.

Finally, particle-matter interaction was simulated by sending protons, electrons, neutrons, alpha and photon particles to the spacesuit modelled in the space environment with Geant4. As a result of the analysis, different interactions were observed in different layers. The interactions in the materials used in the layers change according to the type and energy of the particles sent.

KEYWORDS: Geant4, Radiation Shielding, Simulation, Spacesuit, Space mission

COMMITTEE: Asst.Prof.Dr. Burçin DÖNMEZ

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Asst.Prof.Dr. Tolga ATAY

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez çalışmasında, uzay görevlerinde kullanılan giysiler üzerine bir araştırma yapmak ve araştırma sonucunda kullanılacak materyallerin parçacık etkileşimlerinin testlerini simülasyon programı üzerinde gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Geçtiğimiz yıllar boyunca uzay giysileri birçok belirleyici tarihi anlarda rol oynamıştır. Uzayda egemenlik kurmaya yönelik yarışlardan, Ay'a inişe, Uluslararası Uzay İstasyonu'nda (ISS) alçak Dünya yörüngesinde sürekli insan varlığının kurulmasına kadar, uzay giysileri büyük başarılarla imkân sağlamıştır. İnsanlık Dünya'nın sınırlarının ötesine geçtikçe, uzay giysilerinin önemi artmaktadır. Uzay giysileri, hayatlarını riske atan astronotları korumakta ve uzay araştırmalarında insan unsurunu temsil etmektedir.

Uzay turizminin de başlamasıyla birlikte daha fazla insan uzaya seyahat ettikçe, bu tür gezginlerin ihtiyaçlarını karşılamak için yeni uzay giysilerine ihtiyaç duyulacaktır. Öte yandan, NASA asteroitlere, Ay'a veya Mars'a yönelik misyonlar planlarken, bu ortamlara yapılacak seyahatlere uyum sağlamak için gelişmiş uzay giysileri gerekli olacaktır. Bu iki giysi kategorisi birbirinden farklıdır. Uzay turizminde kullanılan ticari giysiler öncelikli olarak fırlatma ve iniş sırasında acil durum koruması için kullanılır ve bu nedenle basit olabilirler. Uzay görevlerinde astronotlar tarafından kullanılan giysiler ise çok daha kapsamlı koruma standartlarını ve performans ihtiyaçlarını karşılaması gerekmektedir. Uzay giysilerindeki teknolojik gelişmelerden diğer endüstrilerde faydalanabilmektedir. Gelecekte uzay giysilerinin tam olarak nasıl bir form alacağını söylemek zor olsa da bu giysiler insanlığı güvenle uzaydaki yeni hedeflere taşıyacaktır.

Kullanılan veriler ve Geant4 ile ilgili sorularım için tez sürecimde yardımcı olan bölüm arkadaşım Ömerali YAĞCIOĞLU'na çok teşekkür ederim. Eğitim sürecim boyunca bilgi ve önerileriyle beni yönlendirerek yardım eden danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ'e saygı, minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Bölümde ders aldığım akademisyen hocalarıma, bölüm arkadaşlarıma ayrıca Nur ÇINAR'a çok teşekkür ederim.

Son olarak her zaman yanımda olarak bana maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, aldığım bütün kararlarda yanımda olan annem Semiha KİREMİTÇİ, babaannem Nalan ÇEÇEN ve İbrahim BANKOĞLU'na her zaman başaracağıma inandıkları ve mutluluklarımı paylaştıkları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	6
2.1. Uzay Havası	6
2.1.1. Hapsolmuş Radyasyon.....	6
2.1.2. Güneş Enerjili Parçacıklar	8
2.1.3. Galaktik Kozmik Radyasyon.....	9
2.2. Uzay Radyasyonunun Etkileri.....	10
2.2.1. Toplam İyonlaştırıcı Doz (TID).....	10
2.2.2. Yer Değiştirme Hasarı (DD).....	11
2.2.3. Tek Olay Etkisi (SEE)	11
2.3. Radyasyon Çeşitleri.....	11
2.4. Radyasyonun İnsanlar Üzerindeki Etkileri.....	12
2.4.1. Uzay Giysilerinde Radyasyon Koruma Testleri	14
2.5. Fotonların Madde ile Etkileşimi.....	17
2.5.1. Fotoelektrik Soğurma	17
2.5.2. Compton Saçılması.....	18
2.5.3. Çift Oluşumu	19
2.6. Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri.....	19
2.7. Nötronların Madde ile Etkileşimleri.....	20
2.8. Elektronların Madde ile Etkileşimleri	20
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Geant4	21
3.1.1. Geometri	21

3.1.2. Materyal.....	21
3.1.3. Parçacık Etkileşimleri	22
3.2. Katmanlar ve Özellikleri	22
3.2.1. Su (H ₂ O)	22
3.2.2. Polipropilen (PP)	23
3.2.3. Kevlar	23
3.2.4. Polietilen (PE).....	24
3.2.5. Altın (Au).....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1. Uzay Giysisi Materyal Tercihleri	26
4.2. Uzay Giysisi Simülasyonu	27
4.3. Parçacıklar ve Enerji Düzeyleri.....	29
4.4. Toplam Enerji Emilim Miktarı.....	29
4.4.1. Birinci Uzay Giysisi Enerji Emilim Miktarı Çizelgeleri (Polipropilen).....	30
4.4.2. İkinci Uzay Giysisi Enerji Emilim Miktarı Çizelgeleri (Polietilen).....	42
4.5. Doku ve İskelet katmanı için Soğurulan Doz (Gy) ve Eşdeğer Doz (mSv).....	54
4.6. Geant4 Simülasyonu Doğruluk Analizi	61
5. SONUÇLAR	64
6. KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Radyasyon Kalkanı Olarak Uzay Giysisi Malzemelerinin Simülasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25/10/2024

Elif ÇEÇEN

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Au	: Altın
C	: Karbon
CH ₂	: Metilen Grubu
CH ₃	: Metil Grubu
C ₂ H ₄	: Polietilen
E _e	: Saçılan elektronun enerjisi
eV	: Elektronvolt
G	: Gauss
Gy	: Gray
H	: Hidrojen
J	: Joule
K	: Kelvin (Sıcaklık)
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
keV	: Kiloelektronvolt
m	: Metre
MeV	: Megaelektronvolt
mSv	: Milisievert
O	: Oksijen
s	: Saniye
Sv	: Sievert
Z	: Atom Numarası
.	: Nokta (ondalık ayracı)

Kısaltmalar

ALARA: As Low As Reasonably Achievable (Makul Ölçüde Ulaşılabilir)

CERN : The European Organization for Nuclear Research (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi)

DD : Displacement Damage (Yer Değiştirme Hasarı)

EMU : Extravehicular Mobility Unit (Mekik Dışı Hareket Ünitesi)

ESA : European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)

EVA : Extravehicular Activity (Mekik Dışı Aktivite)

GCR : Galactic Cosmic Ray (Galaktik Kozmik Radyasyon)

Geant4: Geometry and Tracking 4 (Geometri ve Takip 4. İterasyon)

ISS : International Space Station (Uluslararası Uzay İstasyonu)

LEO : Low Earth Orbit (Alçak Dünya Yörüngesi)

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)

NASA : National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)

PP : Polipropilen

PE : Polietilen

RSA : Russian Space Agency (Rus Uzay Ajansı)

SEE : Single Event Effect (Tek Olay Etkisi)

SEP : Solar Energetic Particle (Güneş Enerjili Parçacık)

SF : Solar Flare (Güneş Patlaması)

SI : International System of Units (Uluslararası Birim Sistemi)

SPE : Solar Proton Event (Güneş Enerjili Protonlar)

TID : Total Ionizing Dose (Toplam İyonlaştırıcı Doz)

UV : Ultraviolet (Morötesi)

XCT : X-Ray Computed Tomography (Bilgisayar Destekli X-Işını Tomografisi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sovyet SK-1 Astronot Giysisi (Space Exploration in Moscow, Russia).....	2
Şekil 1.2. Rusya SOKOL (solda) ve ORLAN (sağda) Astronot Giysisi (Space Exploration in Moscow, Russia)	3
Şekil 1.3. ABD Astronot Giysileri Görselleri (NASA)	4
Şekil 1.4. SpaceX Uzay Giysisi ile Türkiye'nin ilk astronotu Alper Gezeravcı (TUA 2024).....	5
Şekil 1.5. Çin Feitian Astronot Giysisi (National Museum of China).....	5
Şekil 2.1. İç ve dış Van Allen Radyasyon Kuşakları (NASA)	7
Şekil 2.2. Güneş aktivitesi maksimum ve Güneş aktivitesi minimum olduğu zamanlar arasındaki koronal fark (NASA Earth Observatory)	8
Şekil 2.3. Şekilde iki ana radyasyon türü SEP ve GCR vardır. Dünya'nın etrafındaki manyetik alanı nasıl etkilediği gösterilmektedir (NASA)	9
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum. Sağ tarafa doğru gidildikçe radyasyon enerjisi artmaktadır.....	12
Şekil 2.5. Extravehicular Mobility Unit (EMU)- Mekik Dışı Hareket Ünitesi (Sundstrand 2002)	13
Şekil 2.6. Amerika Birleşik Devletleri tarafından gerçekleştirilen ilk EVA: Ed White ve Gemini IV giysi sistemi (NASA)	13
Şekil 2.7. EVA giysileri içindeki astronotları simüle etmek için kullanılan phantom (Moyers vd. 2006).....	15
Şekil 2.8. XCT cihazına yerleştirilen phantom (Moyers vd. 2006).....	16
Şekil 2.9. İyonizasyon Odası Testi (Moyers vd. 2006).....	16
Şekil 2.10. Üç ana foton madde etkileşiminin birbirleriyle ilişkisi (Evans 1955).....	17
Şekil 2.11. Fotoelektrik Soğurma	17
Şekil 2.12. Compton Saçılımı	18
Şekil 3.1. Uzay giysisinde su bulunduran katmanın 3D modellemesi (Weiss vd. 2022)	22
Şekil 3.2. Propilenin polimerizasyon denklemi	23
Şekil 3.3. Para-aramid (Kevlar) lifinin kimyasal formülü (Bajaj 2000).....	24
Şekil 3.4. Meta-aramid (Nomex) lifinin kimyasal formülü (Bajaj 2000).....	24
Şekil 3.5. Polietilenin kimyasal formülü (Ronca 2017).....	24

Şekil 3.6. Polietilen yüzeyindeki altın (Au) nanopartikülleri	25
Şekil 4.1. Uzay giysisi katmanları ve bileşenleri	26
Şekil 4.2. Uzay giysisinin Geant4'te modellenen kısmının ekran görüntüsü	28
Şekil 4.3. Uzay giysisine parçacık gönderilmiş durumda Geant4 ekran görüntüsü	28
Şekil 4.4. 50 MeV enerjideki protonların 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji emilimi	41
Şekil 4.5. 3 MeV enerjideki elektronların 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji emilimi	41
Şekil 4.6. 41.2 MeV enerjideki alfa parçacığının 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji emilimi	42
Şekil 4.7. 50 MeV enerjideki protonların 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji emilimi	52
Şekil 4.8. 3 MeV enerjideki elektronların 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji emilimi	53
Şekil 4.9. 41.2 MeV enerjideki alfa parçacığının 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji emilimi	53
Şekil 4.10. Pstar Çizelge Örneği (https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/ap_table.pl).....	61
Şekil 4.11. 5 MeV enerjili protonların polietilen içerisinde aldığı yol (Geant4 ile oluşturulmuştur)	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. NASA, ESA, RSA'ya göre astronotların maruz kalabileceği 30 günlük radyasyon limitleri	14
Çizelge 2.2. NASA, ESA, RSA'ya göre astronotların maruz kalabileceği yıllık radyasyon limitleri	15
Çizelge 4.1. Parçacıklar, Enerji Aralığı ve Kaynakları (Young 2021)	29
Çizelge 4.2. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 3.0×10^6 / Gün).....	30
Çizelge 4.3. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (50 MeV, 1.5×10^6 / Gün).....	31
Çizelge 4.4. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (100 MeV, 1.0×10^6 / Gün).....	32
Çizelge 4.5. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 2.0×10^8 / Gün).....	33
Çizelge 4.6. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (3 MeV, 8.0×10^6 / Gün).....	33
Çizelge 4.7. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (6 MeV, 7.0×10^3 / Gün).....	34
Çizelge 4.8. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 6.5×10^4 / Gün).....	35
Çizelge 4.9. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (5 MeV, 2.0×10^4 / Gün).....	35
Çizelge 4.10. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 1.0×10^4 / Gün).....	36
Çizelge 4.11. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (6.9 MeV, 1.5×10^5 / Gün)	37
Çizelge 4.12. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (16.1 MeV, 6.0×10^4 / Gün)	37
Çizelge 4.13. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (41.2 MeV, 4.0×10^4 / Gün)	38
Çizelge 4.14. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (2755.2 eV, 1.0×10^9 / Gün).....	39
Çizelge 4.15. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (5510.4 eV, 4.0×10^7 / Gün).....	40

Çizelge 4.16. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 3.0×10^6 / Gün).....	42
Çizelge 4.17. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (50 MeV, 1.5×10^6 / Gün).....	43
Çizelge 4.18. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (100 MeV, 1.0×10^6 / Gün).....	44
Çizelge 4.19. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 2.0×10^8 / Gün).....	44
Çizelge 4.20. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (3 MeV, 8.0×10^6 / Gün).....	45
Çizelge 4.21. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (6 MeV, 7.0×10^3 / Gün).....	46
Çizelge 4.22. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 6.5×10^4 / Gün).....	46
Çizelge 4.23. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (5 MeV, 2.0×10^4 / Gün).....	47
Çizelge 4.24. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 1.0×10^4 / Gün).....	48
Çizelge 4.25. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (6.9 MeV, 1.5×10^5 / Gün)	48
Çizelge 4.26. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (16.1 MeV, 6.0×10^4 / Gün)	49
Çizelge 4.27. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (41.2 MeV, 4.0×10^4 / Gün)	50
Çizelge 4.28. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (2755.2 eV, 1.0×10^9 / Gün).....	50
Çizelge 4.29. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (5510.4 eV, 4.0×10^7 / Gün).....	51
Çizelge 4.30. Polipropilen 50 MeV proton 1.5×10^6 için doz hesaplamaları	55
Çizelge 4.31. Polipropilen 100 MeV proton 1.0×10^6 için doz hesaplamaları	55
Çizelge 4.32. Polipropilen 3 MeV elektron 8.0×10^6 için doz hesaplamaları.....	55
Çizelge 4.33. Polipropilen 6 MeV elektron 7.0×10^3 için doz hesaplamaları.....	56
Çizelge 4.34. Polipropilen 1 MeV nötron 6.5×10^4 için doz hesaplamaları	56
Çizelge 4.35. Polipropilen 5 MeV nötron 2.0×10^4 için doz hesaplamaları	56

Çizelge 4.36. Polipropilen 10 MeV nötron 1.0×10^4 için doz hesaplamaları	57
Çizelge 4.37. Polipropilen 5510.4 eV foton 4.0×10^7 için doz hesaplamaları.....	57
Çizelge 4.38. Polietilen 50 MeV proton 1.5×10^6 için doz hesaplamaları.....	58
Çizelge 4.39. Polietilen 100 MeV proton 1.0×10^6 için doz hesaplamaları.....	58
Çizelge 4.40. Polietilen 3 MeV elektron 8.0×10^6 için doz hesaplamaları	58
Çizelge 4.41. Polietilen 6 MeV elektron 7.0×10^3 için doz hesaplamaları	59
Çizelge 4.42. Polietilen 1 MeV nötron 6.5×10^4 için doz hesaplamaları.....	59
Çizelge 4.43. Polietilen 5 MeV nötron 2.0×10^4 için doz hesaplamaları.....	59
Çizelge 4.44. Polietilen 10 MeV nötron 1.0×10^4 için doz hesaplamaları.....	60
Çizelge 4.45. Polietilen 5510.4 eV foton 4.0×10^7 için doz hesaplamaları	60
Çizelge 4.46. Radyasyon türüne ve enerjisine göre doku ve iskelet katmanındaki toplam eşdeğer doz.....	60

1. GİRİŞ

Uzayın derinliklerine yönelik ilk araştırmalar, insanlığın sonsuz merakına ve keşfetme arzusunu dayanmaktadır. Bu araştırmalar, uzay tarihindeki önemli adımları ve başarıları temsil etmektedir. İnsansız uzay keşifleri, insan yapımı araçlarla başlamıştır ve insanlığın uzayın sınırlarını keşfetmesi için zemin hazırlamıştır.

4 Ekim 1957'de, Sovyetler Birliği'nin Sputnik 1 adlı yapay uydusu, Dünya yörüngesine başarıyla fırlatılmıştır. Bu tarihi olay, insanlığın uzay çağının başlangıcına işaret ederek bir dizi uzay araştırma programının başlamasına yol açmıştır. Ardından, 12 Nisan 1961'de Sovyetler Birliği'nin uzay araştırma programı olan Vostok 1 misyonu ile uzaya çıkan ilk insan Yuri Gagarin olmuştur. Bu misyon uzay görevlerinin başlangıcı ve uzay keşfi tarihinde dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Vostok 2 misyonunda ise Gherman Titov, uzayda 24 saat geçirerek insanlı uzay uçuşlarının süresini arttırmıştır. Ayrıca, Vostok 6 misyonu ile Valentina Tereshkova, uzaya çıkan ilk kadın olarak tarihe geçmiştir.

5 Mayıs 1961'de, Sovyetler Birliği'nin başarısından 23 gün sonra, ABD astronotu Alan Shepard, Mercury-Redstone 3 misyonu kapsamında Freedom 7 uzay aracı ile ABD'nin ilk insanlı uzay uçuşunu gerçekleştirmiştir. Mercury programı, daha sonra John Glenn'in Friendship 7 misyonu ile devam etmiştir. 20 Şubat 1962'de Glenn, Dünya yörüngesine çıkan ilk Amerikalı olmuştur.

Sovyetler Birliği ve ABD'nin ardından Rusya (Sovyetler Birliği'nin dağılmasından sonra) ve diğer ülkeler de insanlı uzay görevlerine katılmıştır. Rusya'nın Soyuz programı, uzun süre devam eden bir dizi insanlı uzay uçuşunu içermektedir. ABD'nin Apollo programı da insanlı uzay görevleri için önemli bir adımdır. Apollo 11 misyonu, 1969'da Neil Armstrong ve Buzz Aldrin'in Ay'a iniş yapmasıyla tarihe geçmiştir. Bu görev 24 Temmuz 1969'da insanlığın Ay'a ilk defa ayak basmasıyla sonuçlanmıştır.

Birbirini izleyen bu insanlı uzay görevleriyle birlikte atmosferdeki zorlu koşullar koruyucu uzay giysisi ihtiyacını doğurmuştur. Bu doğrultuda her ülke kendi uzay misyonuna bağlı olarak uzay giysilerini geliştirmiştir. Uzay giysisi geliştiren başlıca ülkeler Rusya (önceki SSCB dönemi dahil), ABD ve Çin'dir. Sovyetler Birliği'nin Vostok programı ve ABD'nin Mercury programı kapsamında astronotlar basit uçuş giysileri giymişlerdir. Ancak, bu giysiler sadece kısa süreli uçuşlar için uygun olup uzun süreli görevlerde yetersiz kalmıştır (Jenkins 2012). Uzay görevlerinin uzun süreli hale gelmesiyle birlikte, uzay giysisi teknolojisinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Özellikle ABD'nin Gemini ve Apollo programları, uzay giysisi teknolojisinin ilerlemesi için önemli yapı taşlarıdır. Gemini programı, uzay yürüyüşleri ve uzun süreli uçuşlar için daha gelişmiş koruyucu giysiler gerektirmiştir. Apollo programı ise Ay'a insan götürmeyi amaçlayan uzun süreli görevler için daha dayanıklı ve fonksiyonel giysilerin

geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu görevler, astronotların uzayın zorlu koşullarına karşı korunması ve uzayda güvenli bir şekilde çalışması için uzay giysisinin önemini ortaya koymuştur.

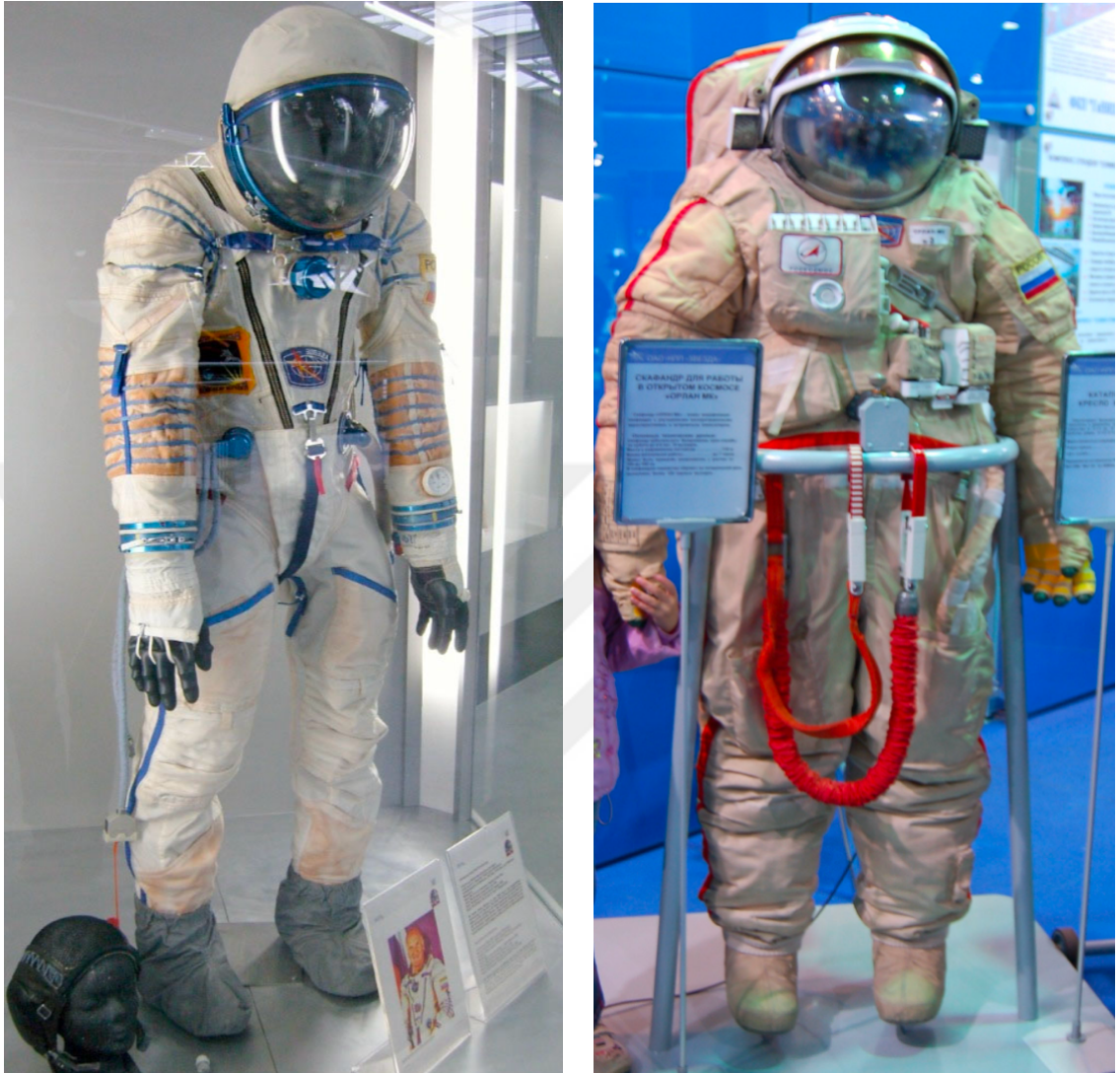
İlk uzay giysisi, 1961'de Vostok 1 misyonu ile uzaya gönderilen ilk insan Yuri Gagarin tarafından giyilen, Sovyet SK-1 giysisidir. Bu giysi, dünya yörüngesindeki uzay yolculuğunda astronotun korunması ve dış uzaydaki zararlı etkilerin en aza indirilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.



Şekil 1.1. Sovyet SK-1 Astronot Giysisi (Space Exploration in Moscow, Russia)

İlerleyen yıllarda Rus kozmonotlarının ihtiyaçları göz önüne alınarak uzay giysilerinde pek çok gelişme gerçekleştirilmiştir. Devam eden süreçlerde 1973 yılında kullanılmaya başlanan SOKOL uzay giysisi ve 1977 yılında kullanılan ORLAN uzay

giysileri günümüzde hala kullanılmaya devam etmektedir. Uzay uçuşları tarihinde en çok kullanılan iki astronot giysisi SOKOL ve ORLAN olmuştur.



Şekil 1.2. Rusya SOKOL (solda) ve ORLAN (sağda) Astronot Giysisi (Space Exploration in Moscow, Russia)

ABD'nin Mercury misyonu kapsamında ilk insanlı uzay uçuşunda kullanılan Mercury Astronot Giysisi (Navy Mark-IV) bu görevler için geliştirilen Mark serisindendir. Mark serisi giysiler yalnızca askeri pilotlar ve stratosferik uçuşlar için tam basınçlı koruyucu giysiler olarak kullanılmaktaydı. Daha sonra NASA Mark IV üzerinde değişiklikler gerçekleştirilerek bu giysileri ilk insanlı uzay programı olan Mercury Projesi'nde kullanmıştır (Thomas ve McMann 2006).

ABD'de, uzay giysisi gelişim evrimi şu sıralamayla tarif edilebilir: Mercury uzay giysisi, Gemini uzay giysisi, Apollo uzay giysisi, Apollo-Soyuz Test Projesi uzay giysisi, Skylab uzay giysisi, Space Shuttle uzay giysisi, Uzay İstasyonu uzay giysisi, SpaceX uzay giysisi ve Boeing uzay giysisi (Chang 2021).



Şekil 1.3. ABD Astronot Giysileri Görselleri (NASA)

1960'tan 2024'e kadar olan 64 yıllık süreçte, uzay giysisi tasarımlarında birçok gelişme yaşanmıştır. Ülkelerden sonra özel şirketlerin de uzay yarışına katılmalarıyla birlikte, SpaceX tarafından tasarlanan Demo-2 uzay giysisi ve Boeing tarafından tasarlanan Starliner uzay giysisi, koruyucu özelliklerinin yanı sıra estetik özellikler de

dikkate alınarak tasarlanan uzay giysileri arasındadır (Howell 2020). Şekil 1.3'te SpaceX ve Boing uzay giysileri de görülmektedir.



Şekil 1.4. SpaceX Uzay Giysisi ile Türkiye'nin ilk astronotu Alper Gezeravcı (TUA 2024)

Çin'de ise Shenzhou-7 görevindeki mekik dışı faaliyeti (EVA) için kullanılan uzay giysisine "Feitian uzay giysisi" denilmektedir. Feitian uzay giysisi tasarımında ORLAN uzay giysisi, referans olarak kullanılmıştır ve mürettebatlı uzay uçuşu görevleri için geliştirilmiştir (Moskowitz 2008).



Şekil 1.5. Çin Feitian Astronot Giysisi (National Museum of China)

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Uzay Havası

Uzay havası, Güneş, gezegenler arası ortam ve manyetosfer-iyonosfer-termosfer katmanları da dahil olmak üzere uzay ortamındaki dinamik koşulları ifade eder (Baker 1996). Gelecekte planlanan insanlı uzay görevleri daha uzun sürelerde ve Dünya'dan daha uzak mesafelerde gerçekleştirilmeyi hedeflemektedir. Dünya'dan uzaklaştıkça, koruyucu bir kalkan görevi gören manyetosfer ve radyasyon kuşaklarının kalkanlama etkisi azalmaktadır. Bunun sonucu olarak astronotlar için hayati riskler ortaya çıkmaktadır.

Uzay radyasyonu hem uzay aracının performansını hem de astronotları etkilemektedir. Uzay radyasyonunun üç kaynağı vardır: Van Allen Kuşakları'nda bulunan hapsolmuş parçacıklar, Güneş Enerjili Parçacıklar (SEP) ve Galaktik Kozmik Radyasyon (GCR) olarak sınıflandırılmaktadır (Feynman ve Gabriel 2000). Galaktik kozmik ışınlar, Güneş Sistemimizin dışından gelen yüklü ve yüksek enerjili parçacıklardır (≥ 100 MeV) (Smart ve Shea 1985). Sınıflandırılmış olan uzay radyasyon kaynaklarının birtakım etkileri mevcuttur. Bu etkiler: Toplam iyonlaştırıcı doz (TID), yer değiştirme hasarı (DD) ve tek olay etkisidir (SEE). Bu etkiler görev süresine, görev tarihine ve görevde kullanılan yörüngeye göre farklılık göstermektedir.

Kozmik radyasyon, astronotların güvenliği için kritik bir faktördür. Güneş aktivitesine bağlı olarak SEP ve GCR yoğunluğu değişmektedir. Güneş'in 11 yıllık çevriminde, Güneş aktif dönemde olduğunda GCR'in etkisi daha az fakat Güneş aktivitesi minimum olduğu dönemde GCR etkisi çok daha yüksektir. Astronotların Güneş enerjili parçacıklara veya galaktik kozmik radyasyona maruz kalması, biyolojik açıdan astronotları risk altına sokabilir. Uzay ortamındaki radyasyon kaynakları hapsolmuş radyasyon, Güneş enerjili parçacıklar ve galaktik kozmik radyasyon olmak üzere üç başlık altında incelenebilmektedir.

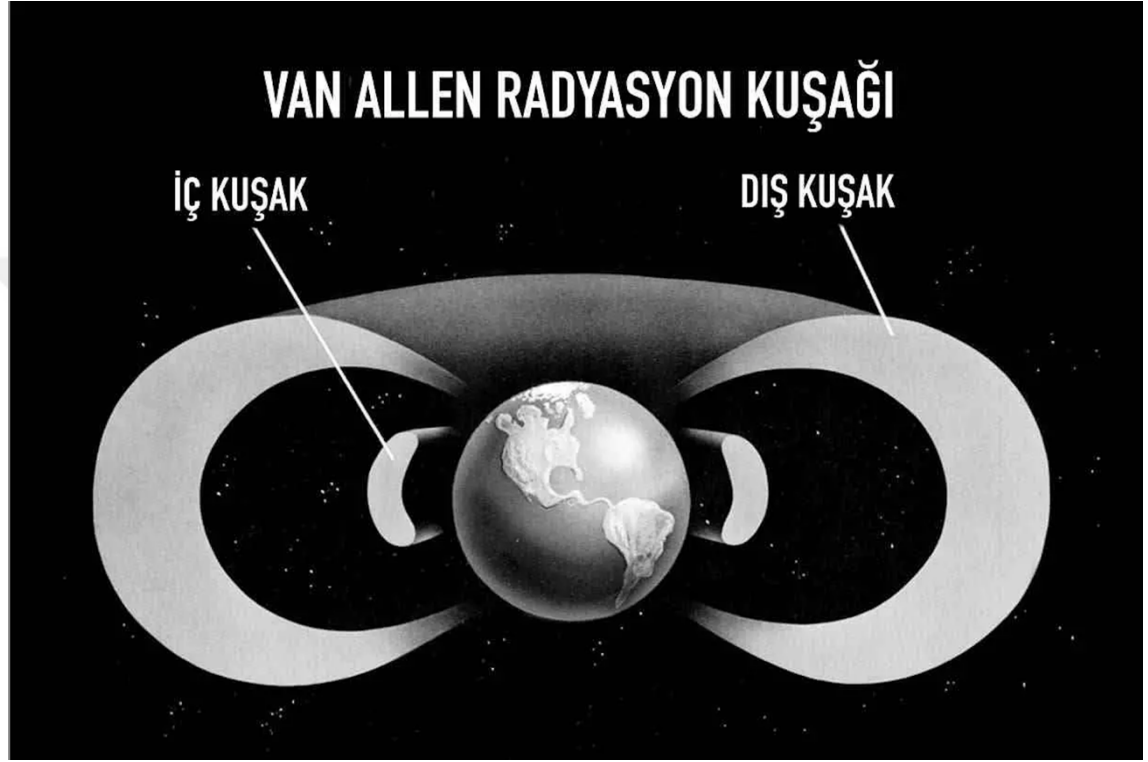
2.1.1. Hapsolmuş Radyasyon

Dünya'nın sıvı halde bulunan demir-nikel çekirdeğindeki akışkan hareketler elektrik akımının oluşmasına yol açmaktadır. Bu elektrik akımları, manyetosferi oluşturur. Manyetosfer Dünya'nın manyetik alanını ifade etmektedir. Güneş aktivitesine bağlı olarak meydana gelen olaylar sonucunda Dünya güneş rüzgârlarına (solar winds) maruz kalmaktadır. Güneş rüzgârları yüksek enerjili elektron ve protonlardan meydana gelmektedir. Bu rüzgârlar ile gelen parçacıklar Dünya'nın manyetosferini sıkıştırmakta ve sınırlamaktadır (Borovsky ve Valdivia 2018).

Dünya'nın manyetik alanı ile Güneş rüzgârı arasındaki sınır, manyetopoz (manyetopause) olarak adlandırılır. Manyetopozun konumu, dinamik gezegensel manyetik alanın basıncı ile Güneş rüzgarının dinamik basıncı arasındaki denge ile

belirlenir. Manyetopozun iç kısmında Dünya'nın manyetik alanı, dış kısmında ise Güneş rüzgârıyla birlikte gelen parçacık basıncı hakimdir (Chapman ve Ferraro 1933).

Dünyanın manyetik alanının şekli Güneş rüzgarları ile doğrudan ilişkilidir. Güneş aktivitesi maksimum olduğunda manyetik alan (manyetosfer) daralır ve sıkışır, Güneş aktivitesi minimum olduğu dönemde ise manyetik alan (manyetosfer) genişlemektedir. (Borovsky ve Valdivia 2018).



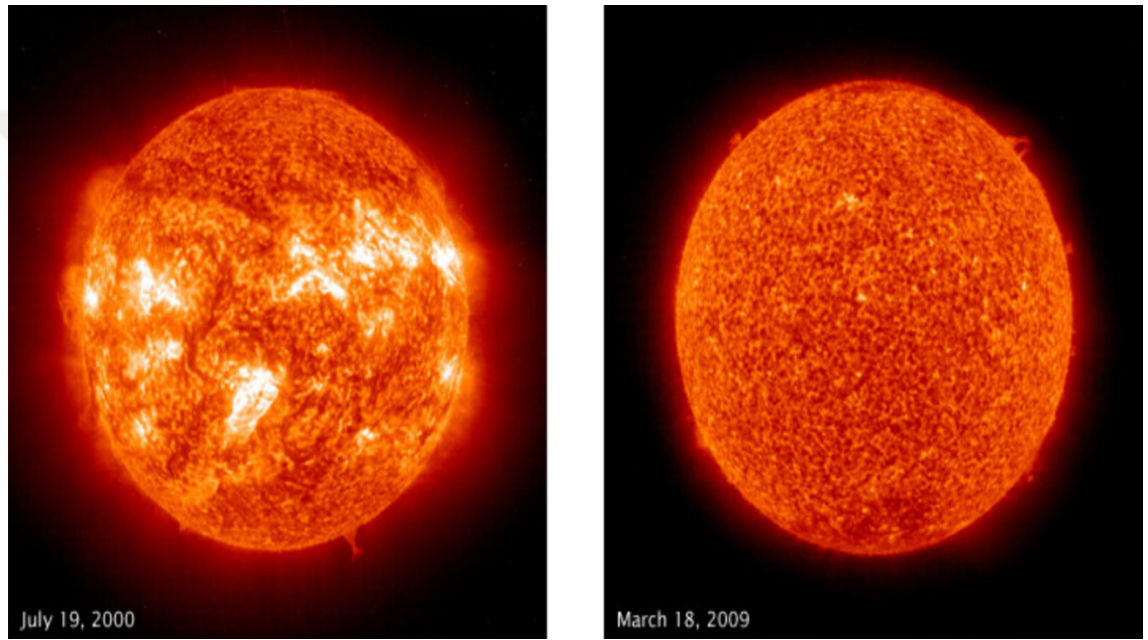
Şekil 2.1. İç ve dış Van Allen Radyasyon Kuşakları (NASA)

Güneş rüzgârları yüksek enerjili elektron ve protonlardan oluşmaktadır. Manyetosfer, Dünya'yı Güneşten ve Uzaydan (GCR) gelen radyasyondan büyük oranda korumaktadır. Fakat manyetosfer Dünya'ya güneş rüzgarlarıyla gelen parçacıkların hepsini engelleyemez ve bu parçacıkların bir kısmı Dünya'nın manyetosferi içine hapsolmektedir. Hapsolan parçacıklar Dünya'nın çevresindeki radyasyon kuşakları tarafından tuzaklanır. Bu kuşaklara "Van Allen Radyasyon Kuşakları" denilmektedir. Dünya'ya yakın olan iç kuşak tarafından tuzaklanan yüksek enerjili parçacıkların çoğunluğunu protonlar oluşturmaktadır. Dıştaki kuşakta ise genellikle düşük enerjili parçacıklar tuzaklanır ve çoğunluğunu elektronlar oluşturmaktadır. İç kuşağın sınırları 1.500 ile 13.000 km aralığında değişirken, dış kuşak 19.000 ile 40.000 km aralığında değişmektedir (Mann vd. 2016).

Hapsolmuş radyasyon, elektronik donanımları ve insan sağlığını olumsuz şekilde etkileyebilmektedir. Bu etkiler güneş aktivitesine, manyetosferik durumlara ve bulunan yörüngeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

2.1.2. Güneş Enerjili Parçacıklar

Güneş enerjili parçacıklar (Solar Energetic Particles, SEPs) uzay radyasyonunun bir başka kaynağıdır. Güneş'te meydana gelen, manyetik aktiviteye bağlı Güneş patlamaları (Solar Flares, SFs) ve koronal kütle atımları (Coronal Mass Ejections, CMEs) gibi olaylar sonucu ortaya çıkan parçacıklara Güneş enerjili parçacıklar denir. Bu olaylar sonucunda yoğun miktarda elektron, proton, alfa parçacıkları ve ağır iyonlar saçılmaktadır (Hu 2017). Güneş enerjili parçacık olayları, uzay aracındaki elektronik bileşenlere ve mürettebatlı görevlerde astronotlara radyasyon hasarı verebilir. SEP olayları Güneş'in ortalama 11 yıllık çevrimine göre artar veya azalır. Güneş patlamaları, güneşi aktivitesinin maksimum olduğu dönemde daha sık meydana gelirken, güneş aktivitesinin minimum olduğu dönemde çok daha az sıklıkta meydana gelmektedir.



Şekil 2.2. Güneş aktivitesi maksimum ve Güneş aktivitesi minimum olduğu zamanlar arasındaki koronal fark (NASA Earth Observatory)

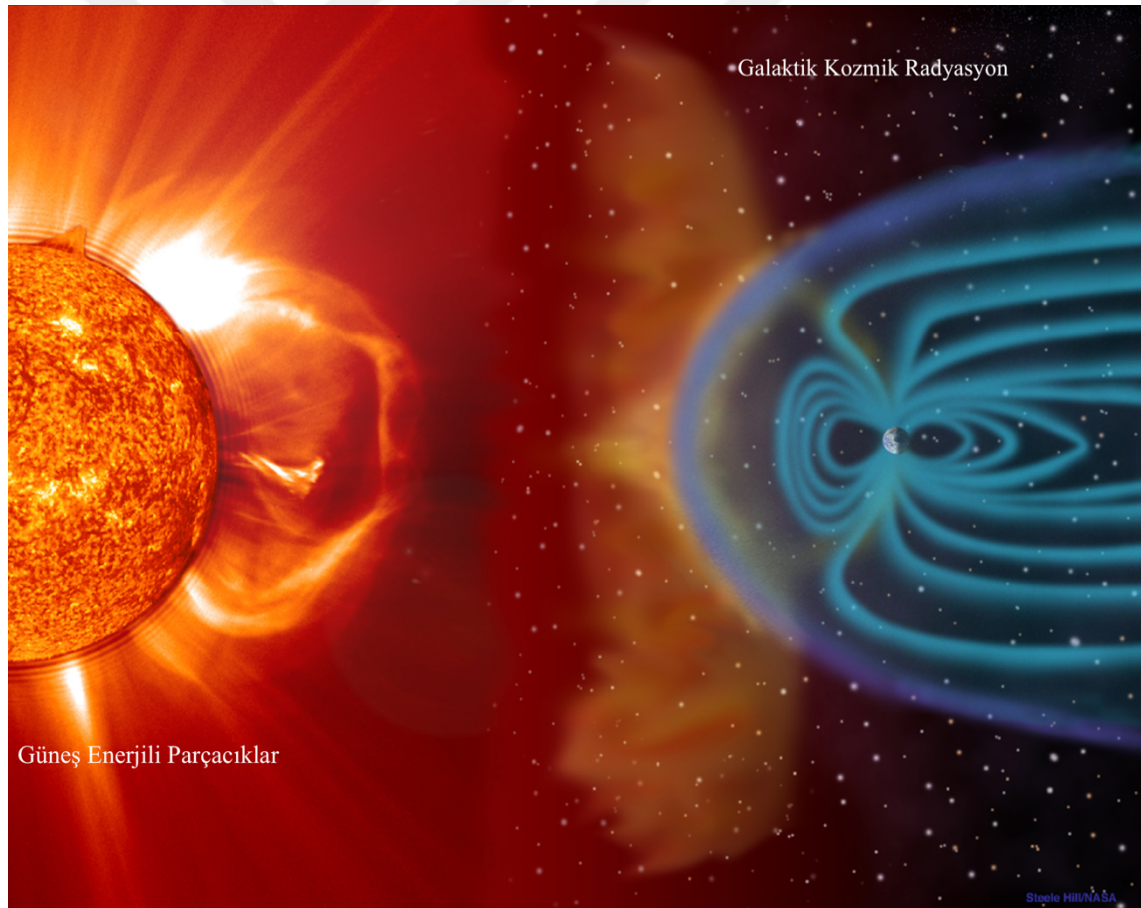
Güneş patlaması esnasında, patlamanın olduğu bölgedeki plazma milyonlarca kelvin sıcaklığa ulaşır. Buna bağlı olarak yüksek miktarda enerji açığa çıkar. Güneş patlamaları genellikle Güneş lekeleri civarında meydana gelir, lekeler manyetik olarak aktif olan bölgelerdir. Patlamalar yoğun bir enerjinin X-ışını olarak yayılması şeklinde tanımlanabilmektedir (Hu 2017).

Güneş'te meydana gelen bir diğer olay ise CME'lerdir. CME'ler çok yüksek miktarda, yüksek enerjiye sahip parçacıkların uzaya fırlatılması olarak tanımlanabilir. Püskürtülen plazma maddesi çok sayıda elektron ve proton içerir. Koronal kütle atımları da güneş çevrimi ile doğrudan ilişkilidir. Güneş aktivitesinin maksimum olduğu dönemde daha sık meydana gelirken, aktivitenin minimum olduğu dönemde çok daha az sıklıkta meydana gelmektedir. Uzay ortamındaki her türlü canlı ve ekipman için CME'ler çok büyük risk oluşturmaktadır (Chen 2011).

2.1.3. Galaktik Kozmik Radyasyon

Süpernova patlamaları, aktif çekirdeğe sahip gökadarlar, kuasarlar ve gama ışını patlamaları Galaktik Kozmik Radyasyonun kaynağını oluşturur. Aynı zamanda Galaktik Kozmik Radyasyon, Güneş sistemimizin dışından gelmektedir. Galaktik kozmik radyasyonun yoğunluğu diğer radyasyon kaynaklarına göre daha azdır. GCR yüksek iyonlaştırma potansiyelinden ötürü etkileştiği materyali kalıcı olarak etkileyebilir bu sebeple daha fazla zarar verme potansiyeline sahiptir.

Galaktik kozmik ışınların bileşimi, yaklaşık olarak %90 oranında protonlardan, %9 alfa parçacıklarından ve %1'lik bir kısmını ise daha ağır element çekirdeklerinden oluşturmaktadır (Ohnishi 2004). Güneş çevrimine bağlı olarak, Güneş aktivitesi maksimum olduğu dönemde GCR etkisi daha az iken, Güneş aktivitesi minimum olduğunda GCR'in etkisi çok daha fazladır. Kozmik radyasyonun da sebep olabileceği tek olay etkisi astronotlar için büyük ölçekte bir tehlike unsurudur fakat belirli bir zaman diliminde meydana gelen galaktik ortamın koşullarına ve Güneş aktivitesine bağlı olmakla birlikte görülme olasılığı çok düşük olduğu için bu tez kapsamında dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.3. Şekilde iki ana radyasyon türü SEP ve GCR vardır. Dünya'nın etrafındaki manyetik alanı nasıl etkilediği gösterilmektedir (NASA)

2.2. Uzay Radyasyonunun Etkileri

Uzay radyasyonu, uzay aracının elektronik sistemlerini ve insanlı görevlerde astronotları etkileyebilmektedir. Bu nedenle astronot (giysilerinin uzay radyasyonuna ne kadar dayanıklı olduğu önemli bir konudur. Bu çalışmada uzay radyasyonunun astronotlar üzerindeki etkileri vurgulanmıştır.) Bu bağlamda uzay radyasyonu 3 şekilde etki gösterebilmektedir. Bunlar toplam iyonlaştırıcı doz (TID- total ionizing dose), yer değiştirme hasarısı (DD-displacement damage ve tek olay etkisidir (SEE-single event effect). Toplam iyonlaştırıcı doz ve yer değiştirme hasarı kümülatif etkilerdir.

Radyasyon maruziyeti genellikle “rad” birimiyle ifade edilmektedir. 1 Gy (Gray) 100 rad’a eşittir (Maurer vd. 2008).

$$100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} \quad (2.1)$$

Yüksek enerjili parçacıklar enerjisi ve radyasyon türüne bağlı olarak etkilerini göstermektedir. Güneş rüzgarlarıyla gelen parçacıklar, manyetosfer ile etkileşmektedir. Manyetosfer ile etkileşen parçacıklar, farklı renklerde ışıklar yayarak gözlemlenebilmektedir. Kutup ışıkları bu olaylara örnek gösterilebilmektedir. Dünyanın manyetik alan çizgilerinin kutup bölgelerinde uzaya doğru açık olmasından dolayı yüksek enerjili parçacıklar atmosferden içeriye doğru girmekte ve bu etkileşimi gerçekleştirmektedir. Kuzey Kutbu'nda meydana gelenler “Kuzey Işıkları (Aurora Borealis)”, Güney Kutbu'nda meydana gelenler ise “Güney Işıkları (Aurora Australis)” olarak adlandırılmaktadır.

2.2.1. Toplam İyonlaştırıcı Doz (TID)

Uzay giysisinin elektronik sistem bileşenleri, görev ömrü boyunca maruz kaldığı kademeli uzay radyasyonu nedeniyle toplam iyonlaştırıcı doz etkisiyle karşı karşıya kalabilir. Bu etki, serbest yük birikmesiyle oluşur ve giysi içindeki malzemelerin yüklü parçacıklar veya yüksek enerjili fotonlarla etkileşimi sonucunda meydana gelir. Foton kaynaklı iyonizasyon, yüksek enerjili foton tarafından oluşturulan ikincil elektronların elektron-delik çiftleri oluşturmasıyla meydana gelir. Proton ve diğer yüklü parçacıklar da elektron-delik çiftleri oluşturarak iyonlaşmaya neden olur. Bu bozulma, elektronik sistemin toplam iyonlaştırıcı radyasyon toleransının tolerans sınırına ulaşmasıyla başlar.

Uzay giysisinin tasarımı sırasında, giysi üzerinde oluşacak toplam iyonlaştırıcı doz etkisinin dikkate alınması önemlidir. Giysinin malzeme seçimi ve yapısal özellikleri, bu etkiye karşı dayanıklılığını belirlemede kritik bir rol oynar. Ayrıca, uzay giysisinin görev sırasında maruz kalacağı uzay ortamının modellenmesi, giysinin uzun vadeli performansını tahmin etmede önemli bir araç olabilir. Bu nedenle, uzay giysilerinin uzun süreli kullanımı için, giysi malzemelerinin ve tasarımının toplam iyonlaştırıcı doz etkisine karşı dayanıklılığının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Toplam iyonlaştırıcı doz, birim kütle başına biriken enerjinin ölçüsüdür. Uluslararası Birim Sistemine (SI) göre kullanılan birim Gray (Gy)'dir. Uzayda en sık karşılaşılan etki, toplam iyonlaştırıcı (TID) dozdur. Elektron, proton, gama ve X-ışınları

bu etkiye sebep olmaktadır. Toplam iyonlaştırıcı doz iyonize edici ve kümülatif bir etkidir. Genellikle tek olay etkisi (SEE) ve yer değiştirme hasarıyla (DD) birlikte ortaya çıkar.

2.2.2. Yer Değiştirme Hasarı (DD)

SEP'ler ve hapsolmuş radyasyonda yoğun olarak bulunan elektron ve protonlar, yer değiştirme (DD) hasarının yanı sıra toplam iyonlaştırıcı doz (TID)'a da sebep olmaktadır. Yer değiştirme hasarı, yüksek enerjili parçacıkların (proton, elektron, nötron ve ağır iyon) sebep olduğu kümülatif ama iyonize etmeyen bir etkidir. Bu etkiler daha çok elektronik aksamalarda problemlere sebep olmaktadır.

2.2.3. Tek Olay Etkisi (SEE)

Uzay radyasyonunun sebep olduğu Tek Olay Etkisi, yüksek enerjili tek bir parçacığın sebep olduğu etkidir. Uzay radyasyonundan tam anlamıyla korunmak mümkün değildir. Çeşitli simülasyonlar yardımı ile maruz kalınacak dozlar ve dozların sebep olduğu etkiler analiz edilebilmektedir. Bu analizler sonucunda kullanılacak olan materyal tercihleri belirlenmektedir. Tek olay etkisinin meydana gelme olasılığı çok düşük olduğu için bu tez çalışması kapsamında ihmal edilmiştir.

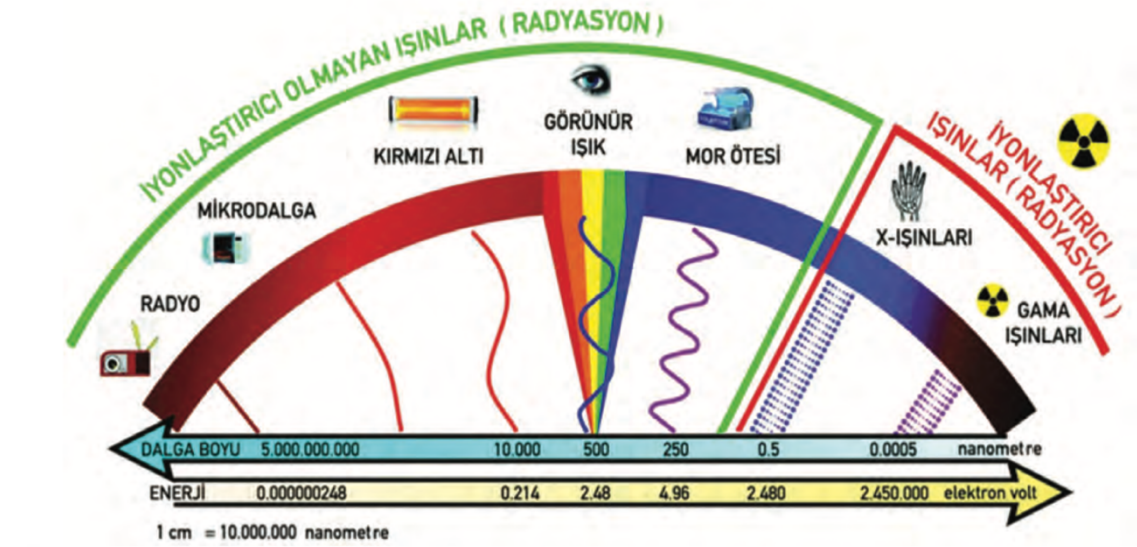
2.3. Radyasyon Çeşitleri

Radyasyon bir kaynaktan salınan enerji olarak tanımlanabilir. Belirli bir kütlesi ve enerjisi olan, hızlı hareket eden parçacıklara “Parçacık tipi radyasyon” denilmektedir. Örnek olarak nötron, proton, alfa ve daha ağır iyonlar gösterilmektedir (Daşdağ 2010). Belirli bir enerjisi olan fakat kütlesi olmayan ve titreşim yoluyla ilerleyen radyasyon türü “Dalga Tipi Radyasyon” olarak ifade edilmektedir. Bu tip radyasyonlara elektromanyetik dalga denilmektedir. Dalga tipi radyasyon ışık hızıyla (3×10^8 m/s) hareket eder. Parçacık tipi ve dalga tipi radyasyonlar kendi içlerinde ikiye ayrılır.

Şekil 2.4'te gösterilen elektromanyetik spektrum incelendiğinde radyasyon taşıdığı enerjiye veya dalga boyuna göre iyonlaştırıcı radyasyon (X-ışınları ve gama ışınları) ya da iyonlaştırıcı olmayan radyasyon (radyo, mikrodalga, kırmızı altı, görünür ışık ve mor ötesi) olarak iki şekilde incelenir. Radyasyonun insanlar üzerindeki etkileri dikkate alındığında iyonlaştırıcı radyasyonun etkileri önemlidir. İyonlaştırıcı radyasyonun insan sağlığı için olumsuz etkileri olmaktadır.

İyonlaştırıcı Radyasyon: X-ışınları ve gama ışınları dalga özelliği gösteren iyonlaştırıcı radyasyondur. Yüksek enerjili olduklarından dolayı madde içerisine nüfus ederek atomlarla etkileşebilmektedirler. Bundan dolayı insan sağlığı için olumsuz etkileri olmaktadır.

İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon: Radyo dalgaları, mikro dalgalar ve görünür ışıktır dalga özelliği gösteren iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. Düşük enerjiye sahip oldukları için dokularda atomları titreştirerek düşük miktarda ısı artışına neden olmaktadır.



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum. Sağ tarafa doğru gidildikçe radyasyon enerjisi artmaktadır

2.4. Radyasyonun İnsanlar Üzerindeki Etkileri

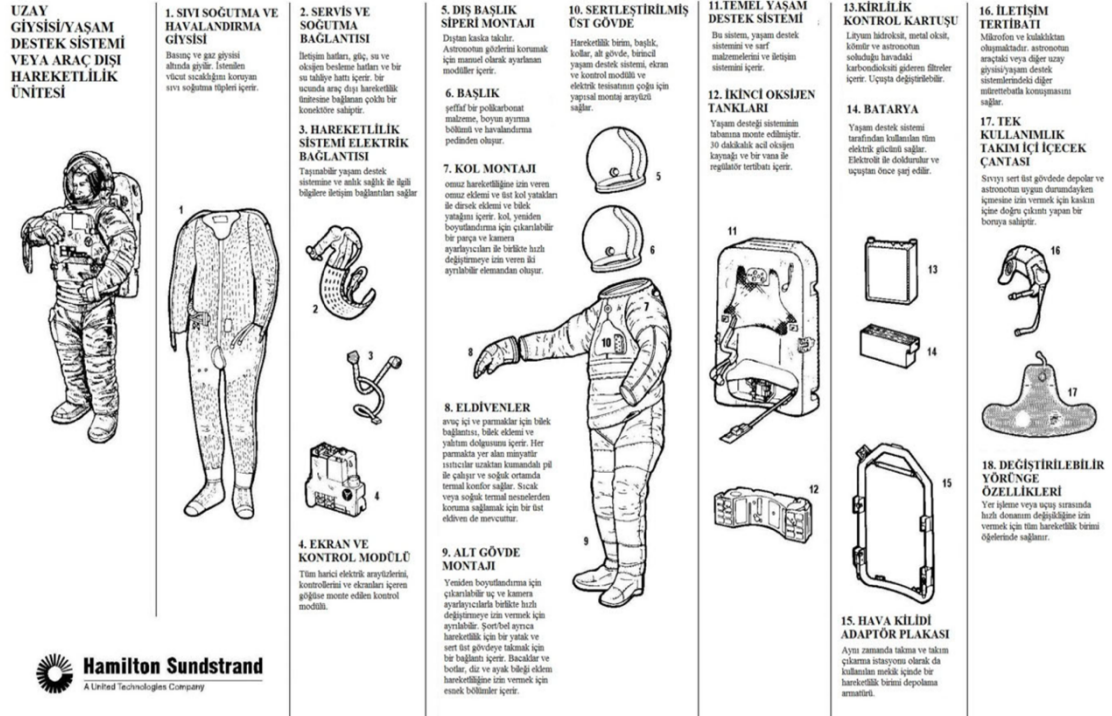
İyonlaştırıcı radyasyonun canlılarda sebep olduğu etkiler, radyasyonun doku içinden geçerken, dokuda bulunan atomları uyarılması ve iyonlaştırmasıyla oluşan etkilerdir. Radyasyonun biyolojik olarak iki çeşit etkisi vardır. Birincisi somatik ikincisi ise genetik etkilerdir. Birinci etkide radyasyon ile etkileşime giren canlının doğrudan kendisinde oluşan etkilerdir. İkinci etki ise gelecek nesillerinde ortaya çıkan etkilerdir (Daşdağ 2010).

Uzayda karşılaşılan ana zorluk, parçacık radyasyonunun etkileridir. Yüksek enerjili parçacıklar, insan dokusunun derinliklerine nüfus ederek hücrelere ve DNA'ya zarar verebilmektedir. Astronotun ilerleyen yaşamında kanser riskini artırabilir ve parçacığın enerjisi yeterince yüksek ise görev esnasında akut rahatsızlığa neden olabilmektedir (Zeitlin vd. 2006).

Radyasyon rahatsızlıklarını önleyebilmek ve astronotların hayati fonksiyonlarını sürdürerek hayatta kalmalarını sağlamak için bir uzay giysisine ihtiyaçları vardır. EMU (Extravehicular Mobility Unit) giysileri ile astronotlar uzay aracı dışında görev yapabilmektedir. Bu giysiler minyatür bir uzay aracı görevini görmektir (Christoffersen vd. 2008). EVA (Extravehicular Activity) genel olarak Mekik Dışı Aktivitelerini ifade ederken, EMU bu aktivitelerde kullanılan özel giysileri ifade etmektedir.

Radyasyondan korunma alanında dikkat edilen unsurlardan biri ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibidir. Bu prensip, radyasyon maruziyetinin mümkün olan en düşük seviyede tutulmasını amaçlar ve her türlü radyasyon kaynağından gelen maruziyetin minimize edilmesini sağlamaktadır. Astronotların radyasyon maruziyetini ALARA prensibi doğrultusunda en düşük seviyede tutmak için radyasyon kalkanlarının kullanımı, uzay araçlarının tasarımında radyasyon korumasının dikkate alınması ve maruziyetin sürekli olarak izlenmesi yöntemlerini içermektedir. Bu

sayede astronotların radyasyon maruziyet sınırlarına yaklaşmamasını ve bu sınırların tolerans değerleri olarak kabul edilmemesini sağlamayı amaçlamaktadır. (NASA HIDH 2010).



Şekil 2.5. Extravehicular Mobility Unit (EMU)- Mekik Dışı Hareket Ünitesi (Sundstrand 2002)



Şekil 2.6. Amerika Birleşik Devletleri tarafından gerçekleştirilen ilk EVA: Ed White ve Gemini IV giysi sistemi (NASA)

Uluslararası Uzay İstasyonu (International Space Station, ISS) ile bu zamana kadar gerçekleştirilenden çok daha fazla uzay aracı dışı görev gerçekleştirilmiştir. Gelecekte planlanan görevlere bakıldığında daha uzun zamanlı mekik dışı aktivitelere ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir. Bu uzun zamanlı mekik dışı aktivite ihtiyacı, astronotların ISS'in dışında gerçekleştirdiği görevlerde uzaydaki radyasyona maruz kalabileceklerini ifade etmektedir. ISS'in kalkanlaması sayesinde astronotlar, proton ve elektron gibi parçacıkların büyük çoğunluğundan korunmaktadır. Fakat, mekik dışı aktiviteler sırasında astronotlar ISS tarafından sağlanan koruyucu kalkanın dışındadır bu sebeple astronotlar yalnızca uzay giysileri ile korunmaktadır (Benton vd. 2006).

2.4.1. Uzay Giysilerinde Radyasyon Koruma Testleri

Radyasyon tehlikesinin bulunduğu ortamlarda çalışan kişilerin, maruz kaldığı radyoaktivite incelendiğinde, maruz kaldıkları yıllık doz miktarı 25 mSv'nin altındadır. ISS'de görev alan astronotların 6 aylık maruz kaldıkları doz ise yaklaşık 80 mSv 'dir (Temel ve Bozdoğan 2018).

Alçak Dünya Yörüngesi'nde (LEO) yapılan mekik dışı aktiviteleri sırasında cilt, göz ve yüzeysel bölgelere, düşük enerjili elektronlar ve protonlar büyük hasarlar verebilmektedir. Meydana gelen hasarlar doğrultusunda astronotların maruz kalabileceği radyasyon limitleri belirlenmiştir (Cucinotta 2003).

Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de NASA (National Aeronautics and Space Administration – Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), ESA (European Space Agency – Avrupa Uzay Ajansı) ve RSA (Russian Space Agency – Rus Uzay Ajansı) için astronotların 30 günlük ve yıllık radyasyon limitleri verilmektedir (Temel ve Bozdoğan 2018).

Astronotların maruz kalacakları radyasyon limitleri, görev süreleri kanser kaynaklı ölüm riskini aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır. NASA tarafından yapılan bu uygulama ile, risk faktörleri ve radyasyon hesaplamalarının bir modellemesi kullanılarak hesaplanmaktadır. (Cucinotta ve Durante 2009).

Çizelge 2.1. NASA, ESA, RSA'ya göre astronotların maruz kalabileceği 30 günlük radyasyon limitleri

Radyasyon Limitleri (30 Günlük)			
Organ	NASA (mSv)	ESA (mSv)	RSA (mSv)
Deri Dokusu	1500	1500	1500
Göz Merceği	1000	500	500
Kan yapıcı organlar	250	250	250

Çizelge 2.2. NASA, ESA, RSA'ya göre astronotların maruz kalabileceği yıllık radyasyon limitleri

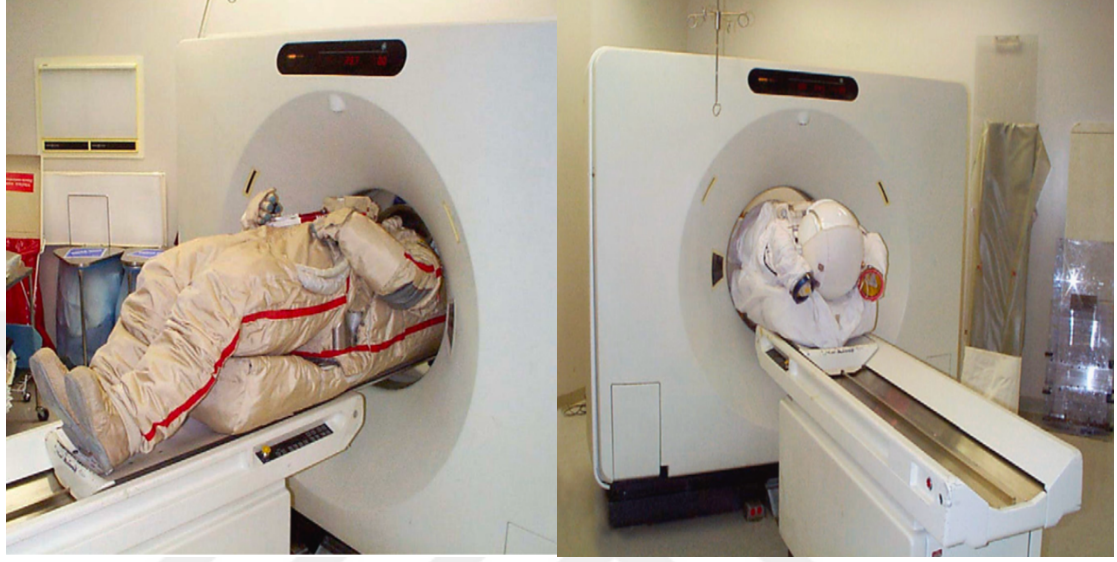
Radyasyon Limitleri (Yıllık)			
Organ	NASA (mSv)	ESA (mSv)	RSA (mSv)
Deri Dokusu	3000	3000	3000
Göz Merceği	2000	1000	1000
Kan yapıcı organlar	500	500	500

Radyasyon efektif doz hesaplamaları için kullanılan radyasyon değerleri, iki farklı yöntemle belirlenebilmektedir. Radyasyon testleri için "Bilgisayar Destekli X-Işını Tomografisi (X-Ray Computed Tomography, XCT)" ve "İyonizasyon Odası" cihazı kullanılmaktadır. XCT'de uzay giysisinin tamamı radyasyona maruz bırakılarak gerçekleştirilen bir test yöntemidir. İyonizasyon odasında ise enerjinin hesaplanması için bölgesel olarak uzay giysisinin hayati önem taşıyan kısımlarına parçacık gönderilerek uygulanan bir yöntemdir. Her iki yöntemde de dışarıdan gönderilen parçacıkların uzay giysisine etkisi detektörler yardımı ile tespit edilebilmektedir. Bunun için Uzay giysisi içine "Phantom" adı verilen dozimetre yerleştirilerek radyasyona maruz bırakılmaktadır (Cucinotta vd. 2003).



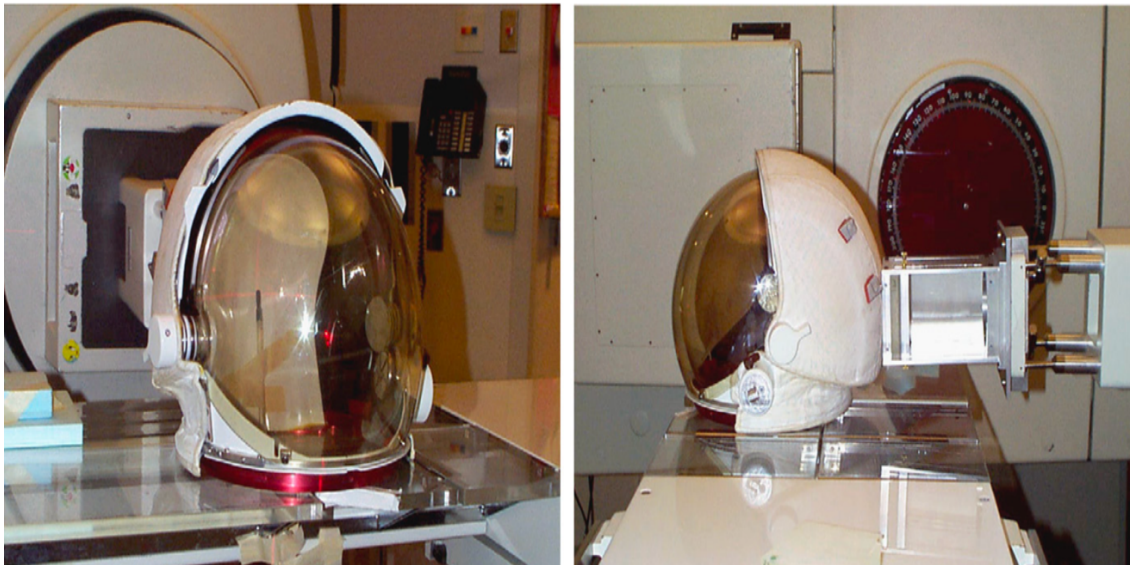
Şekil 2.7. EVA giysileri içindeki astronotları simüle etmek için kullanılan phantom (Moyers vd. 2006)

Phantom (Şekil 2.7), ağırlık itibarıyla yaklaşık olarak %67 karbon, %20 oksijen, %9 hidrojen, %2 azot ve %0,22 antimon içeriğiyle insan dokusuna yakın olacak şekilde üretilmektedir. Phantom farklı ölçülerde 12 bölgeye ayrılarak bu bölgelere radyasyon detektörü yerleştirilmektedir. Uzun giysisi içerisine konulan phantom, XCT'ye yerleştirilerek vücudun farklı bölgelerinde maruz kalınan radyasyon miktarını ölçmektedir (Şekil 2.8) (Cucinotta vd. 2003; Moyers vd. 2006).



Şekil 2.8. XCT cihazına yerleştirilen phantom (Moyers vd. 2006)

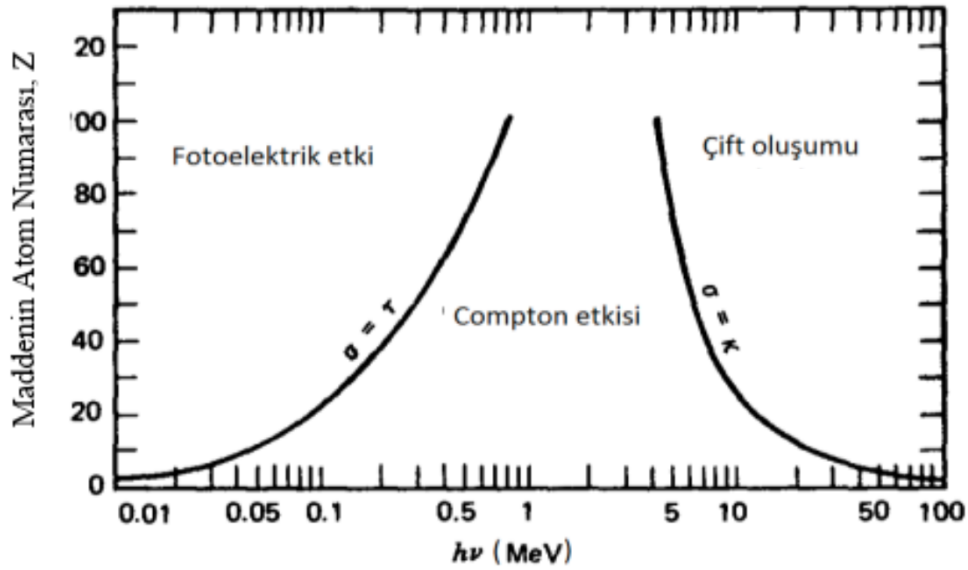
İyonizasyon odası testi, uzay giysisinin içerisine nüfuz edebilen proton ve elektronların eşik enerji değerini belirlemektedir. Farklı giysi bölümlerinin üzerine “Doğrusal Parçacık Hızlandırıcı” ile radyasyon gönderilmekte ve uzay giysisinin içerisindeki iyonizasyon odası yardımıyla uzay giysisi içerisine giren proton ve elektronların eşik enerji değerleri ölçülmektedir (Moyers vd. 2006).



Şekil 2.9. İyonizasyon Odası Testi (Moyers vd. 2006)

2.5. Fotonların Madde ile Etkileşimi

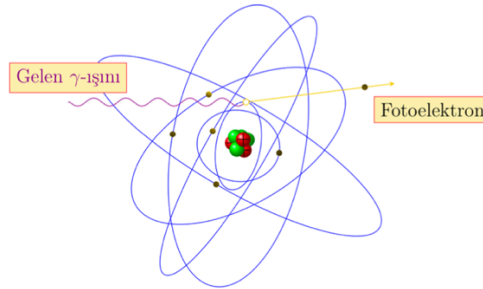
Fotonların madde ile etkileşimi, fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumu olmak üzere üç süreç altında tanımlanabilir. Bu etkileşimlerden hangisinin gerçekleşeceği temel olarak maddenin atom numarası (Z) ile fotonun enerjisine bağlıdır. Bu etkileşimlerin her birinde foton enerjisinin tamamını veya bir kısmını elektrona aktarır, daha sonra foton ya yok olur ya da belirli bir açı ile saçılmaya uğrar. Bu etkileşimlerin ortaya çıkma olasılıkları Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Üç ana foton madde etkileşiminin birbirleriyle ilişkisi (Evans 1955)

Madde ile etkileşen fotonun başlangıç enerjisi $h\nu$ ve Z 'ye bağlı olarak üç etkileşimin baskın olduğu bölgeler şekilde görülmektedir. Şekil 2.10'da bölgeleri birbirinden ayıran çizgiler fotoelektrik soğurma ve Compton saçılması ile Compton saçılması ve çift oluşumu etkilerinin oluşma olasılıklarının birbirine eşit olduğu değerleri temsil etmektedir.

2.5.1. Fotoelektrik Soğurma



Şekil 2.11. Fotoelektrik Soğurma

Bu tür foton etkileşimlerinde, fotonun enerjisi, elektronunun bağlanma enerjisine yakın olduğunda meydana gelmektedir. Soğurucu ile etkileşime giren foton kaybolmakta, onun yerine atoma bağlı olan elektronlardan biri fotoelektron olarak fırlatılmaktadır. Bu işlem atomun tamamı ile gerçekleşir, serbest elektronlar ile gerçekleşmez.

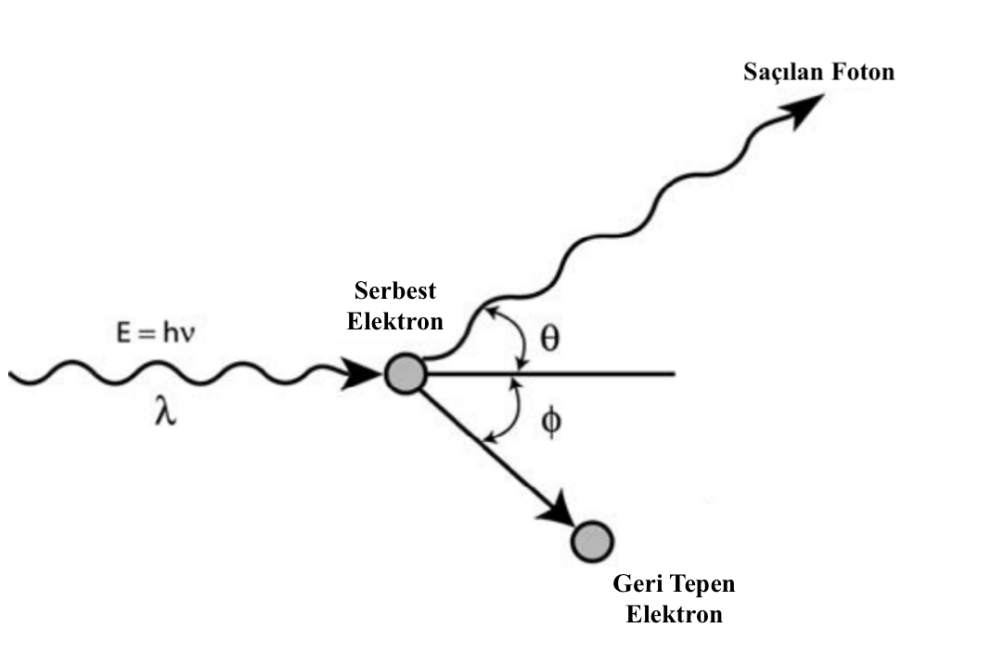
$$E_{e-} = h\nu - E_b \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de görülen $h\nu$ fotonun etkileşim öncesi enerjisini, E_b elektronun bağlanma enerjisini ve E_{e-} ise fotoelektronun kinetik enerjisini temsil etmektedir. Fotoelektrik soğurma enerjisi düşük olan fotonlar için baskın olan bir etkileşimdir.

$$\tau \cong \text{sabit} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (2.3)$$

Fotoelektrik soğurma olasılığı yaklaşık olarak eşitlik 2.3’te görüldüğü gibi ifade edilmektedir. Tesir kesiti τ ile ifade edilmekte olup, Z ve foton başlangıç enerjisi E_γ ’ya bağlı olarak değişmektedir. Bu eşitlikte, n 4 ile 5 arasında değişen bir değerdir. Fotoelektrik soğurma olasılığı Z ile doğru, gelen fotonun enerjisi ile ters orantılıdır.

2.5.2. Compton Saçılması



Şekil 2.12. Compton Saçılımı

Compton saçılması, fotonun bağlı veya serbest bir elektron ile etkileşimi sonucu saçılması olayıdır. Saçılma sonucu foton enerjisinin bir kısmını etkileştiği elektrona aktarmaktadır. Etkileşimden sonra elektrona “Geri Tepen Elektron (Recoil Electron)” denilmektedir. Fotoelektrik soğurmada en büyük farkı Compton saçılmasında gelen foton enerjisinin tamamını kaybetmez.

Compton saçılmasında, gelen fotonun yönü θ açısı kadar değişmektedir. Tüm saçılma açıları mümkün olduğundan, saçılma sonucunda elektronun enerjisi geniş bir aralıkta dağılmaktadır. θ açısının 180° olması durumunda, ikincil elektron maksimum kinetik enerjiye ulaşmaktadır. Fotonun çarpışma sonrası sahip olduğu saçılma enerjisi ise kütle ve momentum korunumu denklemleriyle hesaplanmaktadır;

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te m_0c^2 elektronun durağan kütle enerjisidir ve 0.511 MeV'dir. Compton saçılmasında elektrona enerji aktarımı olmaktadır.

2.5.3. Çift Oluşumu

Fotonun enerjisi, elektronun durgun kütle enerjisinin (0.511 MeV) iki katından büyük ise (> 1.022 MeV) çift oluşumu etkileşiminin olması mümkündür. Gelen fotonun enerjisi arttıkça çift oluşum etkileşiminin olma olasılığı artmaktadır. Bu etkileşim sonucunda foton yok olur ve elektron-pozitron çifti oluşmaktadır, bu olaya çift oluşum denmektedir. Fotonun sahip olduğu enerji bu iki parçacık arasında paylaşılmaktadır, enerji eşit olarak paylaşılacak zorunda değildir.

2.6. Ağır Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Ağır yüklü parçacıklar, elektron ve pozitron dışındaki yüklü parçacıklardır. Ağır yüklü parçacıklar, içinden geçtiği ortamın yörünge elektronlarına elektromanyetik kuvvet uygulamakta ve onlara enerji aktarmaktadır. Aktarılan enerji miktarına bağlı olarak, madde içinde yol alırken enerjilerini başlıca iki yolla kaybetmektedirler. İlk olarak atomdan elektron kopararak iyonize edebilir ya da ikinci olarak atomu iyonlaşmamış ama uyarılmış bir durumda bırakabilmektedirler. Ağır yüklü parçacıklar bir çarpışmada enerjilerinin çok azını kaybetmekte ve doğrusal bir yol izlemektedirler (Turner 2008).

Ağır yüklü parçacığın bir ortamdaki ortalama lineer enerji kayıp hızı (MeV/cm ile ifade edilir), radyasyon fiziğinde ve dozimetride temel öneme sahiptir. $-dE/dx$ ile gösterilen bu niceliğe ortamın parçacık için durdurma gücü ve parçacığın lineer enerji transferi (LET) denilmektedir. Burada " dx " diferansiyel yol uzunluğu, " dE " ise diferansiyel enerji kaybı olarak tanımlanır. Durdurma gücü ve LET, yüklü parçacıkların

bıraktığı doz ve farklı radyasyon türlerinin biyolojik etkinlikleri ile yakından ilişkilidir (Turner 2008).

2.7. Nötronların Madde ile Etkileşimleri

Nötronlar nötr parçacıklardır. Bu sebeple bulunduğu ortam içinde Coulomb etkileşmesi yapmazlar. Nötronlar ancak bir atom çekirdeği ile çarpıştığında enerjisini kaybederler. Bu sebeple nüfuz etme güçleri çok yüksektir (Knoll 2010). Nötronların durdurulmasında su ve hidrojen ağırlıklı elementler kullanılmaktadır. Nötronlar enerjilerine bağlı olarak madde içerisinde farklı etkileşimlere neden olurlar. Bunlar, Elastik Saçılma, İnelastik Saçılma, Radyatif Yakalama ve Fisyon'dur.

Nötronların madde ile etkileşimleri arasında en temel olan elastik saçılma'dır. Bu süreçte, nötron çekirdek ile etkileşime girer, ancak çekirdeğin iç yapısında bir değişiklik olmadan sadece enerji ve momentum aktarımı gerçekleşir. İnelastik saçılmada ise nötronun çekirdek ile etkileşimi sonucu hedef çekirdek uyarılır ve kararsız bir bileşik çekirdek oluşur. Radyatif Yakalamada bir atom çekirdeği nötron soğurarak uyarılmış hale geçer, daha sonra gama ışını yayarak kararlı duruma döner. Fisyon, yüksek enerjili nötronların bir atom çekirdeği ile çarpışarak çekirdeğin daha küçük parçacıklara ayrılmasıdır.

2.8. Elektronların Madde ile Etkileşimleri

Elektronlar da ağır yüklü parçacıklar gibi, atomları iyonlaştırabilme ve uyarabilme yeteneğine sahiptir. Ancak, ağır yüklü parçacıklardan farklı olarak, elektronlar enerjilerini daha düşük bir hızla ve daha kıvrımlı bir yol izleyerek kaybederler. Elektronların izlediği yolda daha büyük sapmalar görülmektedir. Elektron etkileşimlerinde, enerji kaybı bremsstrahlung veya elektromanyetik radyasyon yoluyla gerçekleşebilmektedir (Knoll, 2010).

Elektronların madde ile etkileşimlerinden iyonlaşma sürecinde, elektronlar madde atomlarıyla çarpışarak atomlardan elektron kopartmakta ve böylece enerjilerinin bir kısmını kaybetmektedirler. Elastik çarpışmalarda, elektronlar yalnızca yön değiştirmektedir. İnelastik çarpışmalarda ise yön değiştirmesinin yanı sıra enerjilerinin bir kısmını yörünge elektronuna aktararak iyonizasyon veya uyarılma meydana getirmektedir. Özellikle yüksek enerjili elektronların çekirdeğe yakın geçişleri sırasında ise bremsstrahlung gözlenmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Geant4

Oldukça maliyetli olan uzay giysilerinin üretimi gerçekleştirilmeden önce, uzay giysilerinin radyasyon ile etkileşimlerinin detaylarının öğrenilebilmesi, performans özelliklerinin belirlenebilmesi ve geliştirilebilmesi için simülasyonlar önemli bir yere sahiptir. Bu tez çalışmasında uzay giysi malzemelerinin simülasyonlarının gerçekleştirilmesi ve simülasyonlardan elde edilen verilerin analiz edilmesi Geant4 ile gerçekleştirilmiştir.

Geant4, parçacıkların madde içinden geçişini simüle etmeye yönelik geliştirilen, açık kaynaklı, C++ tabanlı nesne yönelimli bir simülasyon araç takımudur (Allison vd. 2006). Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Organization for Nuclear Research, CERN)'de geliştirilmiştir. Kullanılmaya başlamasından bu yana uzay bilimleri, nükleer fizik ve tıbbi fizik dahil olmak üzere birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır.

Eksiksiz bir simülasyon için aşağıdaki bileşenlere sahiptir:

- Sistemin geometrisi.
- Sisteme dahil olan malzemeler.
- Temel parçacıklar (oluşturma, izleme).
- Parçacıkların maddeyle etkileşimi.
- Dedektörün parçacıklara tepkisi.
- Olay oluşturma.
- Görselleştirme ve analiz araçları.

Dedektörün geometrisi ve malzeme özellikleri ile dedektörde önemli olan fiziksel işlemler kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır.

3.1.1. Geometri

Geant4 simülasyon programında, geometri modelleyici (Geant4 Collaboration 2003), Geant4 araç takımının önemli bir bileşenidir. Farklı şekillerde basit ve karmaşık dedektörlerin geometrik yapısının tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Tıbbi uygulamalar için insan fantomları, uzay ortamındaki simülasyonlar için uzay araçları ve gezegenler modellenenilmektedir (Apostolakis vd. 2009).

3.1.2. Materyal

Geant4'te bir materyalin türünü tanımlamanın çeşitli yöntemleri vardır. Bir materyal, element, bileşik veya karışım olarak tanımlanabilir. Elementler, atom numaraları ve mol ağırlıklarıyla; bileşikler, içerdikleri atom sayılarıyla; karışımlar ise

ağırlık kesirleriyle tanımlanmaktadır. Geant4'ün veri tabanında birçok materyal bulunmaktadır. G4NistManager'ın algoritmaya çağrılması halinde birçok materyalin dahil olduğu veri tabanına erişim sağlanabilmektedir.

3.1.3. Parçacık Etkileşimleri

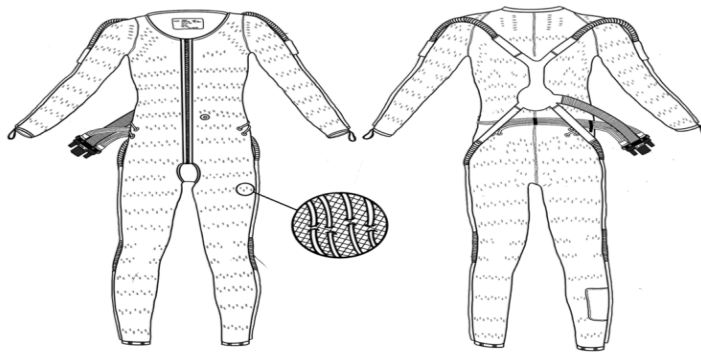
Geant4, parçacık etkileşimlerini tanımlayan ve modelleyen bir kütüphane içermektedir. Geant4'te bulunan parçacıklar kategorisi, foton, elektron, proton ve nötron (aynı zamanda müon, nötrino vb.) gibi parçacıkların kimyasal ve fiziksel özelliklerini simüle etmek için yardımcı olmaktadır. Parçacıkların temel özelliklerini yük, kütle vb. karakterize ederken G4ParticleDefinition sınıfı kullanılabilir. Ayrıca bu sınıf, parçacığın geçirebileceği süreçleri tanımlamak için de kullanılabilir. Örneğin, G4GammaConversion, G4PhotoElectricEffect, G4ComptonScattering ve G4RayleighScattering, G4PairProduction gibi belirli etkileşimleri kapsamlı bir şekilde modelleyebilmektedir.

3.2. Katmanlar ve Özellikleri

3.2.1. Su (H₂O)

Su iki hidrojen ve bir oksijen atomundan meydana gelmektedir. Kimyasal formülü H₂O olan bir bileşiktir. H⁺ ve OH⁻ iyonu içeren bir maddenin verdiği nötralleşme reaksiyonu ile oluşmaktadır. Suyun kimyasal yapısında bulunan Hidrojen atomları, nötronlar ile etkileşime girdiklerinde yavaşlamasına ve enerji kaybetmelerine neden olmaktadır. Suyun yoğunluğu yüksek (997 kg/m³) olduğu için gelen parçacıklar daha fazla madde ile etkileşime girmektedir. Bu sayede gelen radyasyonun enerjisi düşmekte ve etkisi azalmaktadır.

Kullanılan su katmanı hem nötronları durdurmakta hem de radyasyonun yayılmasını engellemektedir (Kodaira vd. 2014). Katmanın kalınlığı arttıkça durdurma özelliği de doğru oranda artmaktadır fakat katman kalınlığını sınırlayan en önemli faktör astronotların ergonomik koşullarda hafif, esnek ve hareket kabiliyeti yüksek uzay giysilerine ihtiyaç duymalarıdır. Bu sebeple tüplerin çapı ince tercih edilmiştir. Kullanılan tüplerin dış çapı 3-6 mm, iç çapı ise 2-4 mm aralığındadır. Simülasyonda kullanılan tüplerin iç çapı 4 mm olarak tercih edilmiştir.



Şekil 3.1. Uzay giysisinde su bulunduran katmanın 3D modellemesi (Weiss vd. 2022)

3.2.2. Polipropilen (PP)

Polipropilen lifleri propilenin polimerizasyonu sonucu elde edilmektedir. Şekil 3.2’de propilenin polimerizasyon denklemi gösterilmektedir. Polimer zincirindeki tekrarlanan propilen sayısı “n” ile ifade edilmektedir. Metil grupları (CH₃) polimer zincirinde düzenli veya düzensiz olarak yer alabilmektedir. Metilen grupları (CH₂) ise polimerin moleküler ağırlığını ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir (Koch 2000).



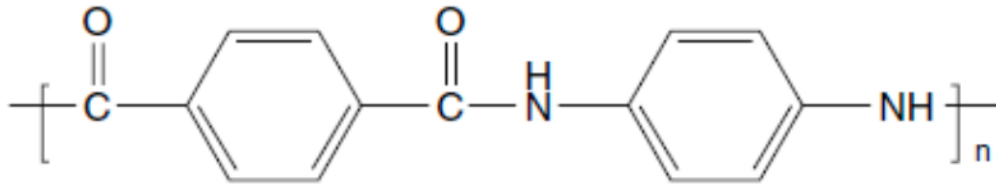
Şekil 3.2. Propilenin polimerizasyon denklemi

Polipropilen lifleri hafif yapıda ve dayanıklı sentetik liflerdir. Polipropilen liflerinin özgül ağırlığı 0.90-0.95 gr/cm³ arasındadır (Harmancıoğlu 1981). Liflerinin kimyasal yapısı sebebi ile nem kazanımları düşük ve hidrofob yapıdadır. Liflerin kopma mukavemeti ve kimyasal dayanımı yüksektir (Zhu ve Yang 2007). Uzay giysilerinin dış katmanlarında daha yüksek performanslı ve dayanıklı materyaller kullanılmaktadır. İç katmanlarında ise polipropilen lifleri su tüplerinin etrafında hidrofob özelliği sayesinde yalıtım sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

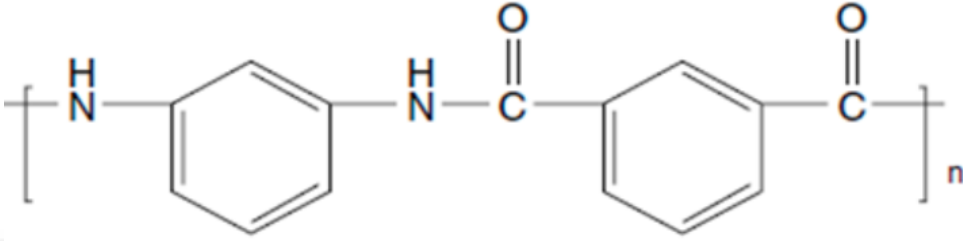
3.2.3. Kevlar

Aramid (aromatik poliamid) lifleri, yüksek mukavemet ve ısıya dayanıklı özellikte olan sentetik liflerdir. Aramid lifleri, yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu lifler, para-aramid ve meta-aramid olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te para-aramid ve meta-aramid liflerinin kimyasal formülleri gösterilmektedir. Her iki aramid türü de yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır ancak kimyasal özellikleri ve kullanım alanları ile birbirlerinden ayrılmaktadır.

Para-aramid lifleri, 1970 yılında DuPont şirketi tarafından keşfedilmiştir. Keşfedilen ve geliştirilen bu liflere DuPont şirketi tarafından ticari adı olan “Kevlar” ismi verilmiştir. Kevlar ismi hem ticari hem de endüstriyel alanlarda yaygın olarak kabul görmüş ve kullanılmıştır. Para-aramidler, moleküler zincirleri lif eksenine paralel olacak şekilde elde edilmesiyle yüksek mukavemet kazanmaktadır (bkz. Şekil 3.3). Bu lifler özellikle yüksek mukavemet ve darbe direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Campbell 2003). Uzay giysilerinde kullanılan malzemelerin yüksek mukavemet, dayanıklılık ve esneklik gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Kevlar, bu gereksinimleri karşılayan bir materyal olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Para-aramid (Kevlar) lifinin kimyasal formülü (Bajaj 2000)

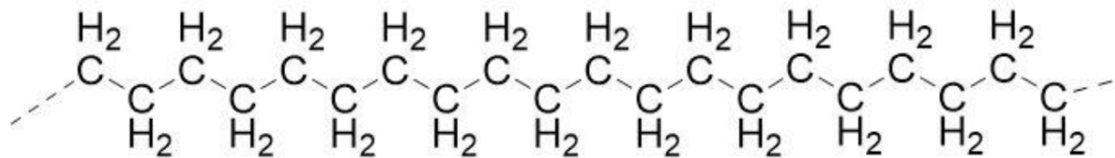


Şekil 3.4. Meta-aramid (Nomex) lifinin kimyasal formülü (Bajaj 2000)

Meta-aramid lifleri de DuPont şirketi tarafından keşfedilen aramid liflerindendir. Ticari olarak kullanılan isimlerinden biri firmanın adlandırdığı “Nomex”tir. Meta-aramid lifleri ise moleküler zincirlerinin daha rastgele düzenlendiği bir kimyasal yapıya sahiptir (bkz. Şekil 3.4). Bu yapı sayesinde para-aramidlere göre daha yüksek ısı dayanıklılığı, kimyasal direnç ve esneklik göstermektedir (Campbell 2003). Meta-aramid lifleri yüksek sıcaklık ve alev direnci gerektiren endüstriyel ve güvenlik uygulamalarında kullanılmaktadır.

3.2.4. Polietilen (PE)

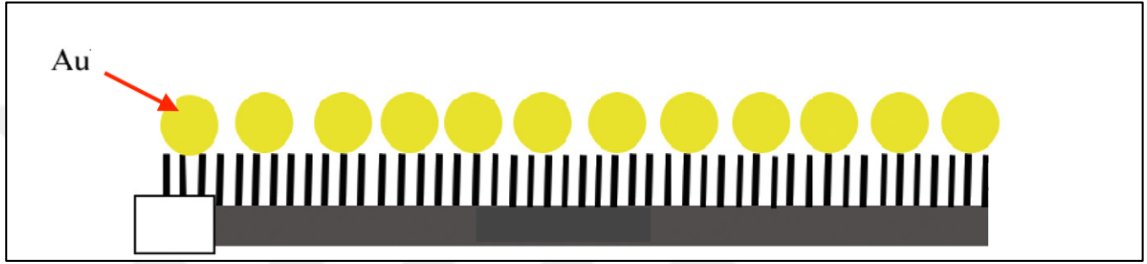
Polietilen (PE), etilen monomerlerinin polimerizasyonu sonucu elde edilmektedir. Etilenin Kimyasal formülü $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ şeklindedir. Polietilenin temel yapı taşı olan etilen, çift bağlı karbon atomlarından oluşmaktadır ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$). Şekil 3.5’te görüldüğü üzere polimerizasyon sürecinde bu çift bağlar kırılır ve tek bağa dönüşerek uzun zincirli polietilen moleküllerini oluşturmaktadır (Ronca 2017). Polietilen lifleri yüksek çekme mukavemetine ve darbe direncine sahiptir. Isı iletkenliği düşük olduğu için yalıtkan olarak kullanılabilir. Esnekliği ve kolay işlenebilirliği sayesinde kompozit olarak kullanılmaya uygundur.



Şekil 3.5. Polietilenin kimyasal formülü (Ronca 2017)

3.2.5. Altın (Au)

Altın, periyodik tabloda “Au” sembolü ile gösterilmektedir. Atom numarası 79 ve yoğunluğu 19.32 g/cm^3 olan bir elementtir. Kimyasal direnci yüksektir ve korozyona karşı dayanıklıdır. Altın, yüksek yoğunluk ve atomik kütleye sahip olduğundan dolayı radyasyona karşı kalkan görevi görmektedir. Elektron yoğunluğu yüksek olduğu için fotonları ve X-ışınlarını durdurabilmektedir. Bu özelliği sayesinde altın, uzay araçları ve uzay giysileri için radyasyondan koruma amacı ile kullanılabilir. Aynı zamanda zararlı ışınları yansıtma özelliği sayesinde UV kalkanı olarak da kullanılmaktadır. Güneş’in zararlı ışınlarını geri yansıtarak sıcaklığı düzenlemeye yardımcı olmaktadır. Astronotların vizörleri, altın kaplama ile kaplanarak güneşin zararlı UV ışınlarını bloke ederek koruma sağlamaktadır.

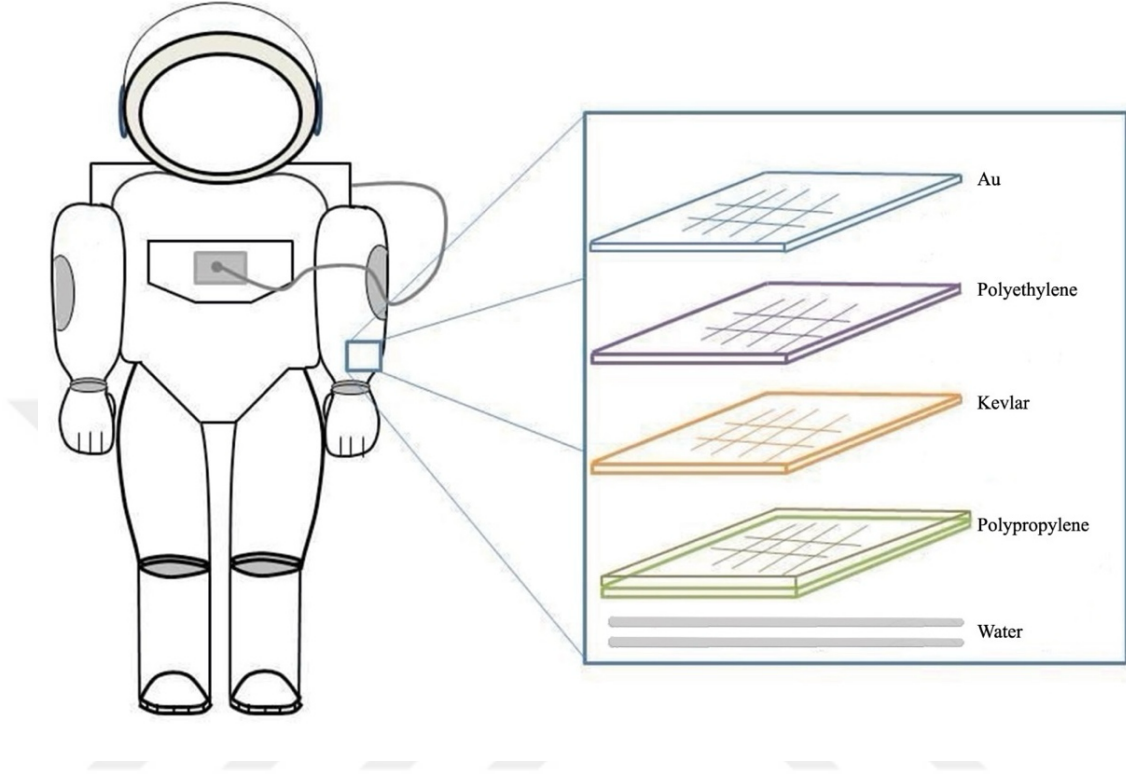


Şekil 3.6. Polietilen yüzeyindeki altın (Au) nanopartikülleri

Uzay giysisinde materyal olarak altın kullanılırken, altının polietilene tutunması için polietilenin yüzeyi kimyasal işlemlerle modifiye edilmektedir. Altın nanopartikülleri, modifiye edilmiş polietilen yüzeyine kimyasal bağlar veya fiziksel adsorpsiyon yoluyla eklenmektedir bu işleme altın kaplanmış polietilen (gold grafted polyethylene) denilmektedir (Wagner vd. 2018). Şekil 3.6’da polietilen yüzeyindeki altın nanopartikülleri gösterilmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Uzay Giysisi Materyal Tercihleri



Şekil 4.1. Uzay giysisi katmanları ve bileşenleri

Bu tez kapsamında simüle edilen uzay giysisi beş katmandan oluşturulmuştur. Oluşturulan katmanlarda kullanılan materyaller sırasıyla içten dışa doğru; su, polipropilen, Kevlar, polietilen ve altındır. Bu katmanların içerisinde ise insan dokusunu oluşturmak için iskelet ve doku tanımlanmıştır.

İlk katmanda materyal olarak su tercih edilme nedeni uzay radyasyonuna karşı koruyucu bir kalkan görevi görmesi ve aynı zamanda termal izolasyona yardımcı olmasıdır. Suyun kimyasal yapısında bulunan H atomları parçacıkları durdurucu özelliğe sahiptir.

İkinci katmanda polipropilen tercih edilmiştir. Hafif yapısı sayesinde uzay giysisinin ağırlığını oldukça azaltmaktadır. Yıpranmaya karşı dayanıklı ve dirençli bir yapısı vardır. Bu yapısının yanı sıra ilk katmanda kullanılan suyun termal ısınma kaynaklı oluşan nemini hızla uzaklaştırarak uzay giysisinin sıcaklığını dengelemektedir ve kuru kalmasını sağlamaktadır.

Üçüncü katmanda kullanılan Kevlar koruyucu giysilerde en çok tercih edilen materyaldir. Yüksek mukavemet ve darbe direncine sahiptir. Çelik yelek gibi balistik koruyucu giysilerin yanı sıra aleve dayanıklı itfaiyeci koruyucu giysilerinde de kullanılmaktadır. Uzaydaki astronotların maruz kaldıkları mikrometeoritlere ve termal

değişimlere karşı Kevlar koruyucu bir kalkan görevi görmektedir. Aynı zamanda radyasyon kalkanlama özelliği sağlamaktadır.

Dördüncü katmanda polietilen kullanılmıştır. Polietilen lifleri esnek ve dayanıklı olduğu için farklı materyaller ile kompozit olarak kullanılabilir. Bu katmanda tercih edilmesinin nedeni, altın ile birlikte kullanarak “gold grafted polyethylene” olarak bilinen koruyucu materyali oluşturmaktır. Aynı zamanda kimyasal yapısında bulunan H atomları parçacıkları durdurma özelliğine sahiptir.

En son katman olan beşinci katmanda ise altın kullanılmıştır. Altın maliyetinden dolayı nadir olarak koruyucu giysilerde kullanılan bir materyaldir. Yüksek yoğunluğa sahip olması radyasyona maruz kalma riskini barındıran uzay ortamında iyonlaştırıcı radyasyondan korumak için altın kaplamalar veya altın katmanlar olarak kullanılabilir.

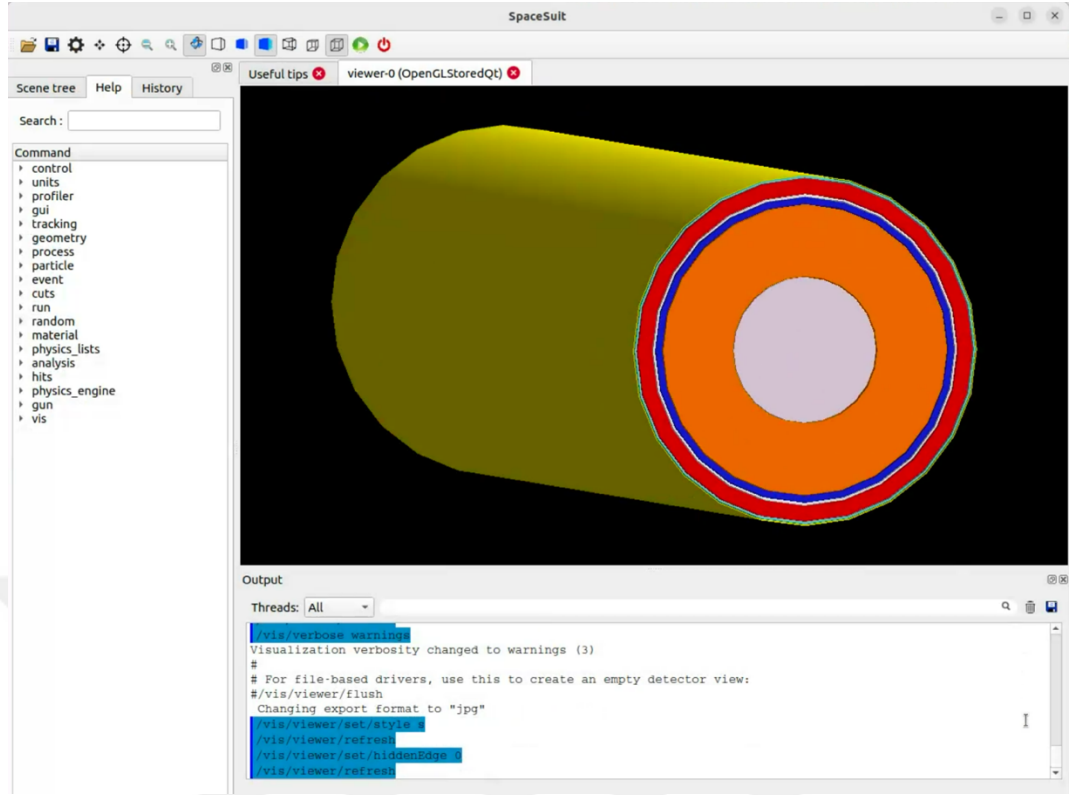
4.2. Uzay Giysisi Simülasyonu

Uzay giysisi materyallerinin modellenmesi bu tezin temelini oluşturmaktadır. Uzay giysisine ait modelin oluşturulması, simülasyonların gerçekleştirilmesi, simülasyon sonuç verilerinin analiz ve görüntülemeleri Geant4 ile yapılmıştır.

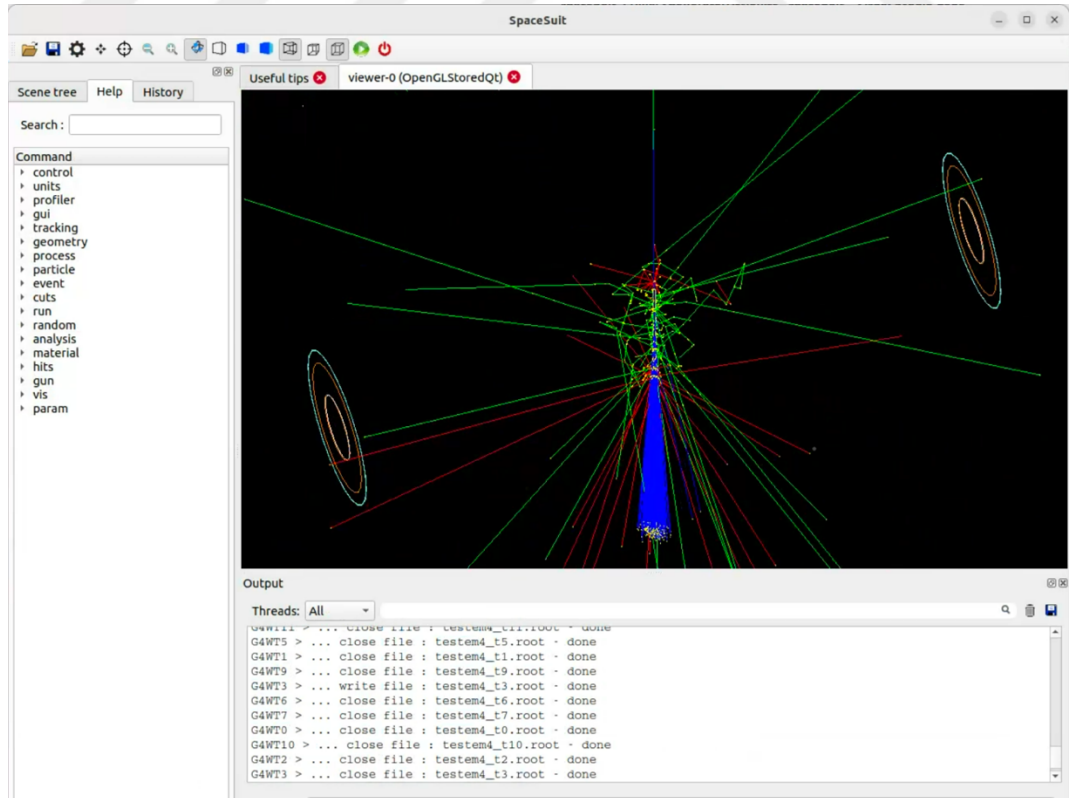
Uzay giysisi temsili olarak silindir şeklinde ve uzay ortamında simüle edilmiştir. Şekil 4.2’de Geant4 kullanılarak oluşturulan üç boyutlu modeli gösterilmektedir. Beş katmandan oluşan silindirin iç yarı çapı 10 cm’dir. 10 cm iç yarı çap iskelet (Skeleton) ve dokudan (Tissue) oluşmaktadır. Silindirin uzunluğu 100 cm olacak şekilde belirlenerek oluşturulmuştur. Oluşturulan katmanlarda kullanılan materyaller sırasıyla içten dışa doğru; su (4 mm), polipropilen (0.5 mm), Kevlar (0.6 cm), polietilen (0.5 mm) ve altın (100 nm) dir.

Şekil 4.3’te ise uzay ortamında modellenen beş katmandan oluşan uzay giysisine parçacık gönderilerek parçacık-madde etkileşimi modellenmiştir. Bu etkileşim doğrultusunda farklı katmanlarda farklı davranışlar gözlenmiştir. Gönderilen parçacık türüne göre katmanlarda kullanılan materyallerin etkileşimleri değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla etkileşim miktarı kullanılan materyallerin özelliklerine bağlıdır. Gönderilen parçacıklar sırasıyla proton, elektron, nötron, alfa ve fotondur. Farklı türde ve sayıda parçacık gönderilerek modelleme gerçekleştirilmiştir.

İkinci katmanda kullanılan polipropilen ve polietilen arasındaki farkı gözlemlemek için iki farklı uzay giysisi oluşturulmuştur. İlk uzay giysisinde, diğer katmanlar sabit tutulurken ikinci katmanda bulunan polipropilen dört farklı kalınlıkta kullanılmış ve her bir kalınlık için simülasyon yeniden çalıştırılmıştır. Sonuçlar ise çizelgeler ile verilmiştir. Daha sonra ikinci uzay giysisi oluşturulmuş ve ikinci katmanda bulunan polipropilen yerine polietilen kullanılmıştır. İlk uzay giysisi için uygulanan adımlar ikinci uzay giysisini modellerken de aynen uygulanmış ve simülasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. Uzak giysisinin Geant4'te modellenen kısmının ekran görüntüsü



Şekil 4.3. Uzak giysisine parçacık gönderilmiş durumda Geant4 ekran görüntüsü

4.3. Parçacıklar ve Enerji Düzeyleri

Uzay giysileri, özellikle düşük enerjili parçacıklara karşı koruma sağlamaktadır. Enerjileri 30 MeV'in altında olan Güneş Enerjili Protonlar (Solar Proton Event – SPE), uzay giysileri ve uzay araçları tarafından etkili bir şekilde kalkanlanabilmektedir. Ancak, daha yüksek enerjili parçacıklar ve GCR'lerin durdurulabilmesi için uzay giysileri tek başına yeterli değildir.

Çizelge 4.1. Parçacıklar, Enerji Aralığı ve Kaynakları (Young 2021)

Parçacık	Enerji Aralığı (MeV)	Kaynaklar
Elektron	<1 MeV- 10 MeV	Van Allen Kuşakları, SEP
Proton	10 MeV – 10.000 MeV	Van Allen Kuşakları, SEP, GCR
Foton	0.1 MeV- 10 MeV	SEP, GCR
Alfa	10 MeV – 1.000 MeV	SEP, GCR

Parçacık enerjisi arttıkça ortamdaki sayısı azalmaktadır, bu sebeple Çizelge 4.1' de gösterilen enerjilerin tamamı astronotlar için tehlike oluşturmamaktadır. Yüksek enerjili parçacıkların miktarı ve görülme olasılığı çok düşük olduğundan dolayı bu tez kapsamında ihmal edilmiştir.

4.4. Toplam Enerji Emilim Miktarı

Uzay giysisi simülasyonunun test edilebilmesi için ISS baz alınmıştır. ISS yaklaşık olarak Dünya'dan 400 km yükseklikte bulunmaktadır. ISS'in eğimi 51.6°'dir. Bu eğim, istasyonun ekvator düzlemine göre olan açısını ifade etmektedir. Toplam enerji emilimini hesaplamak için uzay giysisi testlerinde kullanılan limitler de dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Çizelgelerde verilen enerji ve parçacık sayıları proton ve elektron için Stassinopoulos vd. (1988) çalışmasındaki değerler baz alınarak kullanılmıştır. Foton ve alfa verileri GOES uydusundan alınan değerlere göre hesaplanmıştır. Nötron verileri ise Clowdsley vd. (2001) çalışmasındaki makaleden alınmıştır. Kullanılan parçacık değerleri günlük olarak verilmiştir.

Uzay giysisinin ikinci katmanında bulunan polipropilen malzemesinin etkisini incelemek için ilk olarak diğer katman kalınlıkları sabit tutularak sadece polipropilenin kalınlığı değiştirilmiştir. Değiştirilen katman kalınlıkları 0.3, 0.5, 0.7 ve 1.0 mm olarak alınmıştır. Sabit tutulan diğer katman kalınlıkları için daha önce kullanılan uzay giysilerindeki kalınlıklar referans alınmıştır (Krucińska vd. 2022).

Daha sonra ikinci katmanda bulunan polipropilenin yerine polietilen malzemesi kullanılarak ikinci bir uzay giysisi oluşturulmuştur ve birinci uzay giysisinde uygulanan modellemenin aynısı ikinci uzay giysisi için de uygulanmıştır. Her iki uzay giysisi için

de alınan değerler ve sonuçlar parçacık türüne ve enerjisine göre aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

4.4.1. Birinci Uzay Giysisi Enerji Emilim Miktarı Çizelgeleri (Polipropilen)

Birinci uzay giysisinde polipropilen dışındaki materyallerin kalınlığı sabit tutularak polipropilenin kalınlığı değiştirilmiş ve katmanlardaki enerji emilim miktarı hesaplanmıştır. Uzay giysisindeki parçacık etkileşimlerini incelemek için farklı türde, enerjide ve sayıda parçacık gönderilerek modelleme gerçekleştirilmiştir. Verilen çizelgelerde sırası ile proton, elektron, nötron, alfa ve foton ile etkileşime giren katmanların enerji emilim miktarları verilmiştir.

Proton Etkileşimleri

İlk olarak protonlar incelendiğinde Çizelge 4.2’de gönderilen 10 MeV enerjideki protonlar doku ve iskelete ulaşmamaktadır. Altın, polietilen ve Kevlar katmanlarında tamamı durdurulmaktadır. Çizelge 4.3’te gönderilen 50 MeV enerjideki protonların enerjisinin artması ile doku katmanına parçacıklar ulaşmakta fakat iskelete parçacıklar ulaşmamaktadır. Son olarak 100 MeV enerjideki protonların etkileşimleri incelendiğinde bütün katmanlara parçacıkların ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 4.2. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 3.0×10^6 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.5×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³
		Sayı	3.0×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.0×10 ⁶	3.0×10 ⁶
	Polietilen	Enerji (MeV)	2.599	2.599	2.599	2.599
		Sayı	2,999,998	2,999,998	2,999,998	2,999,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	7.395	7.395	7.395	7.395
		Sayı	2,995,473	2,995,473	2,995,473	2,995,473
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.2'nin devamı

Materyal	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.3. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (50 MeV, 1.5×10^6 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}
		Sayı	1,499,228	1,499,228	1,499,228	1,499,228
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.622	0.622	0.622	0.622
		Sayı	1,499,998	1,499,998	1,499,998	1,499,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	1.027	1.027	1.027	1.027
		Sayı	1,498,975	1,498,975	1,498,975	1,498,975
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0.3689	0.6090	0.8574	1.2320
		Sayı	1,496,880	1,496,881	1,496,882	1,496,882
	Su	Enerji (MeV)	5.353	5.379	5.405	5.445
		Sayı	1,496,264	1,495,853	1,495,434	1,494,814
	Doku	Enerji (MeV)	41.70	41.45	41.18	40.79
		Sayı	1,486,982	1,486,515	1,486,006	1,485,176
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.4. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (100 MeV, 1.0×10^6 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}
		Sayı	987,679	987,679	987,679	987,679
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.3643	0.3643	0.3643	0.3643
		Sayı	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.5962	0.5962	0.5962	0.5962
		Sayı	999,507	999,507	999,507	999,507
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0.2113	0.3522	0.4930	0.7042
		Sayı	998,576	998,576	998,576	998,576
	Su	Enerji (MeV)	2.951	2.955	2.958	2.963
		Sayı	998,327	998,150	997,973	997,710
	Doku	Enerji (MeV)	44.08	44.17	44.26	44.40
		Sayı	994,184	994,008	993,818	993,539
	İskelet	Enerji (MeV)	49.20	48.98	48.76	48.42
		Sayı	933,985	933,769	933,536	933,079

Elektron Etkileşimleri

Elektron etkileşimlerine bakıldığında Çizelge 4.5'te gönderilen 1 MeV enerjideki elektron parçacıkları doku ve iskelete ulaşmamaktadır. Altın, polietilen, Kevlar, polipropilen ve su katmanlarının hepsinde enerji Emilimi gerçekleşmektedir. Çizelge 4.6'da gönderilen 3 MeV enerjideki elektronlarda ise doku katmanına parçacıklar ulaşmakta fakat iskelete parçacıklar ulaşmamaktadır. Son olarak Çizelge 4.7'de 6 MeV enerjideki elektronların da doku katmanına ulaştığı fakat iskelet katmanına ulaşmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.5. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 2.0×10^8 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1.414162×10^8	1.413929×10^8	1.413844×10^8	1.413774×10^8
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.1016	0.1013	0.1012	0.1011
		Sayı	1.999616×10^8	1.999616×10^8	1.999616×10^8	1.999616×10^8
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.2248	0.2225	0.2207	0.2193
		Sayı	1.988482×10^8	1.988482×10^8	1.988482×10^8	1.988482×10^8
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0.1014	0.1696	0.2373	0.3360
		Sayı	1.897882×10^8	1.898594×10^8	1.899299×10^8	1.900338×10^8
	Su	Enerji (MeV)	0.6148	0.5684	0.5230	0.4578
		Sayı	1.819389×10^8	1.749465×10^8	1.662573×10^8	1.496045×10^8
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.6. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (3 MeV, 8.0×10^6 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	5,535,337	5,535,477	5,534,359	5,533,832
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0842	0.0842	0.0841	0.0841
		Sayı	7,999,802	7,999,802	7,999,802	7,999,802
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.1456	0.1455	0.1454	0.1453
		Sayı	7,997,275	7,997,275	7,997,275	7,997,275
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0.0450	0.0791	0.1140	0.1653
		Sayı	7,990,695	7,990,827	7,990,957	7,991,143
	Su	Enerji (MeV)	0.8797	0.8934	0.9079	0.9303
		Sayı	7,987,202	7,986,005	7,983,859	7,979,971

Çizelge 4.6'nın devamı

Materyal	Doku	Enerji (MeV)	1.739	1.699	1.659	1.599
		Sayı	7,635,943	7,590,035	7,536,619	7,446,700
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.7. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (6 MeV, 7.0×10^3 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	4855	4856	4855	4855
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0836	0.0839	0.0837	0.0838
		Sayı	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.1405	0.1409	0.1406	0.1409
		Sayı	6997	6997	6997	6997
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0.0494	0.0822	0.1153	0.1639
		Sayı	6995	6995	6995	6995
	Su	Enerji (MeV)	0.7174	0.7181	0.7213	0.7243
		Sayı	6995	6994	6993	6993
	Doku	Enerji (MeV)	4.427	4.394	4.363	4.316
		Sayı	6971	6967	6968	6962
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Nötron Etkileşimleri

Nötron etkileşimlerine bakıldığında gönderilen 1, 5 ve 10 MeV enerjideki nötronların neredeyse tüm katmanlarda enerji emilimine sebep olduğu görülmektedir fakat enerjileri düşüktür. Nötronlar nötr parçacıklardır. Bu sebeple nüfuz etme güçleri çok yüksektir fakat iyonlaştırıcı radyasyona sebep olmamaktadır.

Çizelge 4.8. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 6.5×10^4 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0	0	0.0040	0
		Sayı	0	0	1	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	9.5×10^{-3}	9.7×10^{-3}	9.5×10^{-3}	9.2×10^{-3}
		Sayı	2458	2561	2487	2485
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.0120	0.0119	0.0116	0.0116
		Sayı	2351	2324	2350	2385
	Polipropilen	Enerji (MeV)	8.1×10^{-3}	9.0×10^{-3}	9.6×10^{-3}	1.04×10^{-3}
		Sayı	1821	2916	3943	5497
	Su	Enerji (MeV)	0.0164	0.0164	0.0163	0.0165
		Sayı	15,811	15,951	16,083	16,260
	Doku	Enerji (MeV)	0.0645	0.0646	0.0646	0.0645
		Sayı	54,008	53,028	53,869	53,790
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0517	0.0516	0.0514	0.0514
		Sayı	26,362	26,225	26,106	25,951

Çizelge 4.9. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (5 MeV, 2.0×10^4 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	8.6×10^{-3}	8.3×10^{-3}	8.4×10^{-3}	8.2×10^{-3}
		Sayı	428	420	433	411
	Kevlar	Enerji (MeV)	8.8×10^{-3}	8.5×10^{-3}	9.1×10^{-3}	9.1×10^{-3}
		Sayı	368	384	357	359
	Polipropilen	Enerji (MeV)	5.8×10^{-3}	6.2×10^{-3}	7.0×10^{-3}	7.9×10^{-3}
		Sayı	311	475	649	877

Çizelge 4.9'un devamı

Materyal	Su	Enerji (MeV)	0.0122	0.0127	0.0127	0.0125
		Sayı	2400	2428	2416	2470
	Doku	Enerji (MeV)	0.0546	0.0546	0.0545	0.0546
		Sayı	10,780	10,792	10,825	10,848
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0593	0.0593	0.0592	0.0591
		Sayı	7538	7519	7527	7511

Çizelge 4.10. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 1.0×10^4 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	9.8×10^{-3}	6.6×10^{-3}	7.3×10^{-3}	9.8×10^{-3}
		Sayı	105	105	110	100
	Kevlar	Enerji (MeV)	1.06×10^{-3}	8.6×10^{-3}	8.6×10^{-3}	6.8×10^{-3}
		Sayı	87	92	77	94
	Polipropilen	Enerji (MeV)	8.0×10^{-3}	7.9×10^{-3}	8.7×10^{-3}	9.3×10^{-3}
		Sayı	83	134	169	229
	Su	Enerji (MeV)	0.0133	0.0123	0.0134	0.0122
		Sayı	606	620	624	649
	Doku	Enerji (MeV)	0.0546	0.0548	0.0545	0.0547
		Sayı	2837	2846	2845	2873
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0552	0.0555	0.0553	0.0549
		Sayı	1975	1971	1968	1961

Alfa Parçacığı Etkileşimleri

Alfa ağır yüklü bir parçacıktır. Bu sebeple alfa parçacığı durdurmak diğer parçacıklara göre daha kolaydır. Çizelgelerde de gösterildiği gibi 6.9 ve 16.1 MeV enerjideki alfa parçacıkları altın ve polietilen katmanı tarafından tamamen durdurulmuştur. Çizelge 4.13'te ise parçacıklar polipropilen katmanına kadar ulaşmasına rağmen su, doku ve iskelete ulaşmamaktadır.

Çizelge 4.11. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (6.9 MeV, 1.5×10^5 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0386	0.0386	0.0386	0.0386
		Sayı	1.5×10^5	1.5×10^5	1.5×10^5	1.5×10^5
	Polietilen	Enerji (MeV)	6.86	6.86	6.86	6.86
		Sayı	149,998	149,998	149,998	149,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.12. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (16.1 MeV, 6.0×10^4 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0245	0.0245	0.0245	0.0245
		Sayı	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4

Çizelge 4.12'nin devamı

Materyal	Polietilen	Enerji (MeV)	16.06	16.06	16.06	16.06
		Sayı	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4
	Kevlar	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polipropilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.13. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (41.2 MeV, 4.0×10^4 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136
		Sayı	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4
	Polietilen	Enerji (MeV)	9.95	9.95	9.95	9.95
		Sayı	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4
	Kevlar	Enerji (MeV)	30.94	30.94	30.94	30.94
		Sayı	39,845	39,845	39,845	39,845
	Polipropilen	Enerji (MeV)	1.244	1.244	1.244	1.244
		Sayı	4759	4759	4759	4759
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.13'ün devamı

Materyal	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Foton Etkileşimleri

Fotonlar için uzay giysisindeki katmanlardaki enerji Emilimi incelendiğinde diğer parçacık türlerine göre Çizelge 4.14'te parçacık sayıları daha yüksek olmasına rağmen düşük enerjili fotonlar doku ve iskelete ulaşmamaktadır. Çizelge 4.15'e bakıldığında doku katmanına parçacıkların ulaştığı görülmektedir fakat ulaşan parçacık sayısı çok düşüktür.

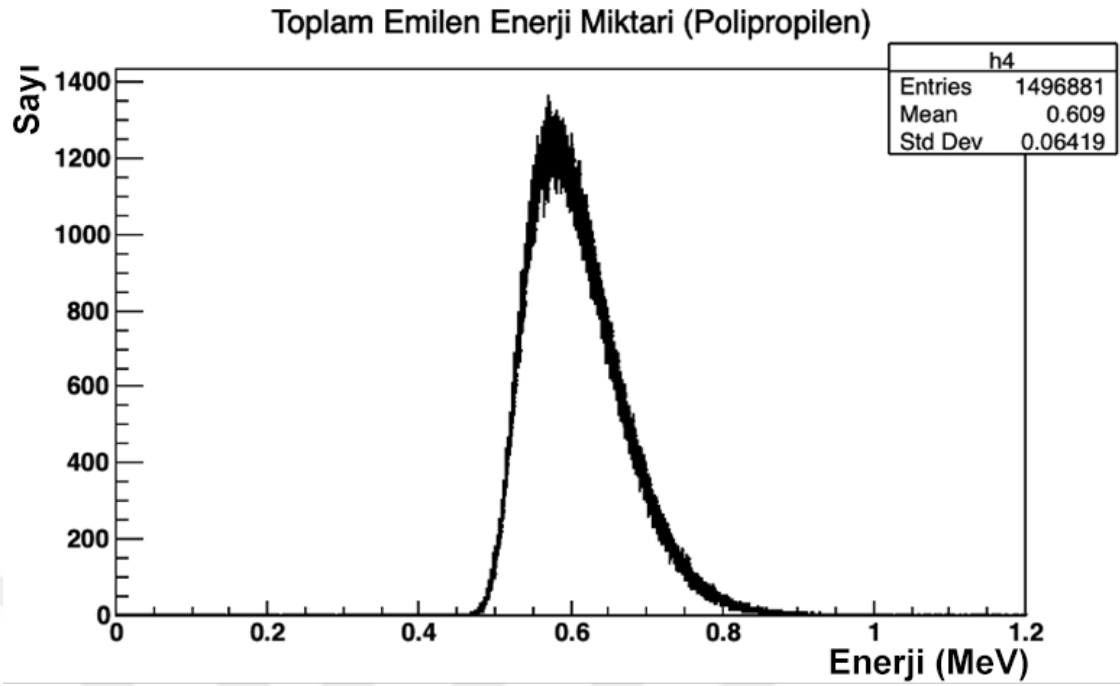
Çizelge 4.14. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (2755.2 eV, 1.0×10^9 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}
		Sayı	3.84935×10^8	3.84935×10^8	3.84935×10^8	3.84935×10^8
	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	6.090006×10^8	6.090006×10^8	6.090006×10^8	6.090006×10^8
	Kevlar	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	5,648,730	5,648,730	5,648,730	5,648,730
	Polipropilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	15	15	15	15
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

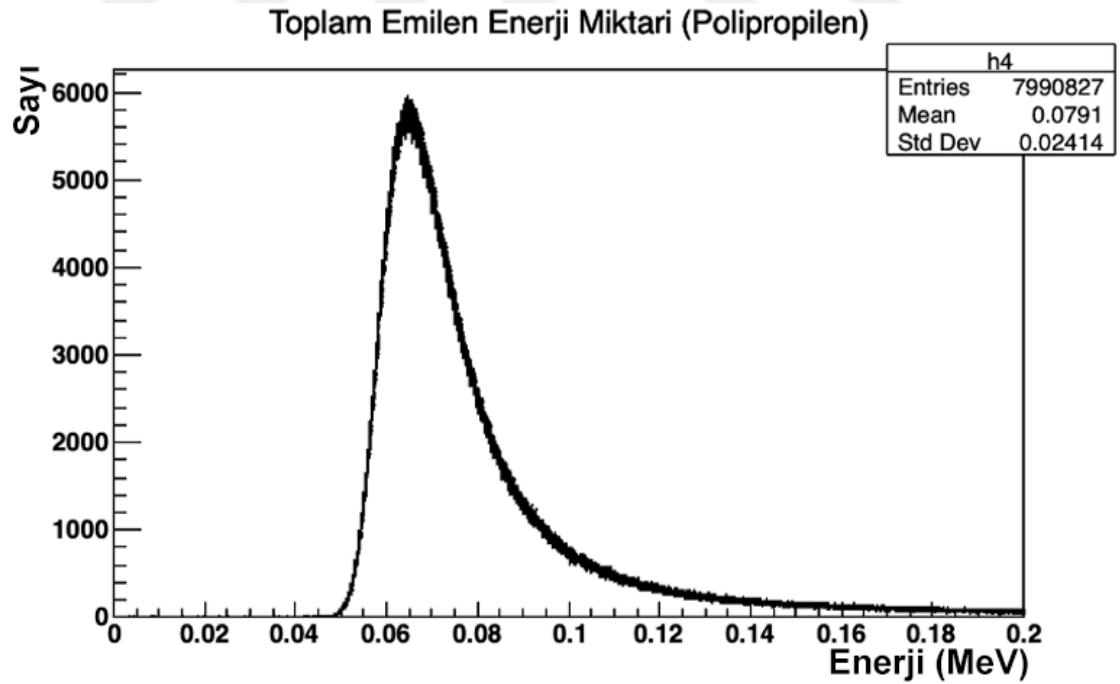
Çizelge 4.15. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (5510.4 eV, 4.0×10^7 / Gün)

	PP Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}
		Sayı	3,826,035	3,826,039	3,826,045	3,826,048
	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1.569971×10^7	1.569976×10^7	1.569981×10^7	1.569984×10^7
	Kevlar	Enerji (MeV)	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
		Sayı	1.59791×10^7	1.59800×10^7	1.59806×10^7	1.59809×10^7
	Polipropilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1253865	1888204	2398080	2980042
	Su	Enerji (MeV)	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
		Sayı	3,219,592	2,585,399	2,075,301	1,492,681
	Doku	Enerji (MeV)	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
		Sayı	6	6	5	3
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

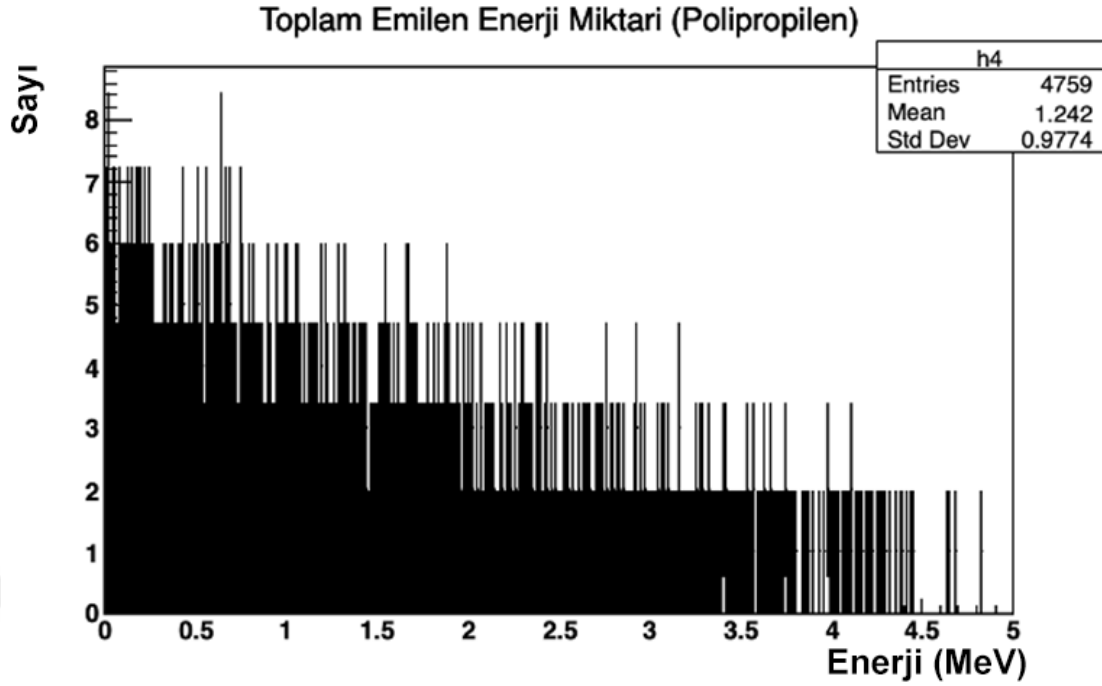
Yukarıda verilen çizelgelerde farklı kalınlıklardaki polipropilenin enerji emilimleri incelendiğinde kalınlık arttıkça enerji emiliminin arttığı görülmektedir. Sabit değer olarak kullanılan 0.5 mm polipropilen katmanı için 50 MeV enerjideki 1.5×10^6 proton, 3 MeV enerjideki 8.0×10^6 elektron ve 41.2 MeV enerjideki 4.0×10^4 alfa parçacığı için aşağıdaki histogramlar oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. 50 MeV enerjideki protonların 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji Emilimi



Şekil 4.5. 3 MeV enerjideki elektronların 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji Emilimi



Şekil 4.6. 41.2 MeV enerjideki alfa parçacığının 0.5 mm polipropilen katmanındaki enerji emilimi

4.4.2. İkinci Uzak Giysisi Enerji Emilim Miktarı Çizelgeleri (Polietilen)

İkinci uzak giysisini modelleme amacı mevcut uzak giysilerinde kullanılan polietilen ile bu simülasyonda kullanılan polipropilenin karşılaştırmasını yapmaktır. İkinci uzak giysisinde ikinci katmanda bulunan polipropilen yerine polietilen kullanılmıştır ve farklı kalınlıklardaki enerji emilimi incelenmiştir. İlk uzak giysisi modellemesindeki aynı adımlar izlenerek aşağıdaki çizelgeler oluşturulmuştur.

Çizelge 4.16. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV , $3.0 \times 10^6 / \text{Gün}$)

PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
		Sayı	3.0×10^6	3.0×10^6	3.0×10^6
	Polietilen	Enerji (MeV)	2.599	2.599	2.599
		Sayı	2,999,998	2,999,998	2,999,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	7.395	7.395	7.395
		Sayı	2,995,473	2,995,473	2,995,473

Çizelge 4.16'nın devamı

Materyal	Polietilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.17. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (50 MeV, 1.5×10^6 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}	1.1×10^{-3}
		Sayı	1,499,228	1,499,228	1,499,228	1,499,228
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.622	0.622	0.622	0.622
		Sayı	1,499,998	1,499,998	1,499,998	1,499,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	1.027	1.027	1.027	1.027
		Sayı	1,498,975	1,498,975	1,498,975	1,498,975
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.3845	0.6351	0.8941	1.2850
		Sayı	1,496,880	1,496,881	1,496,882	1,496,882
	Su	Enerji (MeV)	5.355	5.382	5.409	5.451
		Sayı	1,496,243	1,495,813	1,495,362	1,494,723
	Doku	Enerji (MeV)	41.68	41.42	41.15	40.73
		Sayı	1,486,970	1,486,466	1,485,918	1,485,087
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.18. Proton için katmanlarda emilen enerji miktarı (100 MeV, 1.0×10^6 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}	7.0×10^{-4}
		Sayı	987,679	987,679	987,679	987,679
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.3643	0.3643	0.3643	0.3643
		Sayı	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.5962	0.5962	0.5962	0.5962
		Sayı	999,507	999,507	999,507	999,507
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.2203	0.3671	0.5139	0.7341
		Sayı	998,576	998,576	998,576	998,576
	Su	Enerji (MeV)	2.951	2.955	2.958	2.963
		Sayı	998,321	998,128	997,947	997,657
	Doku	Enerji (MeV)	44.08	44.18	44.28	44.42
		Sayı	994,182	993,989	993,784	993,483
	İskelet	Enerji (MeV)	49.19	48.96	48.73	48.37
		Sayı	933,971	933,745	933,468	932,967

Çizelge 4.19. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 2.0×10^8 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1.414164×10^8	1.413944×10^8	1.413864×10^8	1.413797×10^8
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.1016	0.1013	0.1012	0.1011
		Sayı	1.999616×10^8	1.999616×10^8	1.999616×10^8	1.999616×10^8
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.2247	0.2224	0.2207	0.2193
		Sayı	1.988482×10^8	1.988482×10^8	1.988482×10^8	1.988482×10^8
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.1058	0.1770	0.2473	0.3498
		Sayı	1.897882×10^8	1.898594×10^8	1.899299×10^8	1.900338×10^8

Çizelge 4.19'un devamı

Materyal	Su	Enerji (MeV)	0.6119	0.5636	0.5165	0.4489
		Sayı	1.815317×10^8	1.740663×10^8	1.647721×10^8	1.46822×10^8
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.20. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (3 MeV, 8.0×10^6 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻⁴
		Sayı	5,535,328	5,534,706	5,534,359	5,533,906
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0842	0.0842	0.0841	0.0841
		Sayı	7,999,802	7,999,802	7,999,802	7,999,802
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.1456	0.1455	0.1454	0.1453
		Sayı	7,997,275	7,997,275	7,997,275	7,997,275
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0468	0.0823	0.1185	0.1719
		Sayı	7,990,695	7,990,827	7,990,957	7,991,143
	Su	Enerji (MeV)	0.8805	0.8949	0.9101	0.9337
		Sayı	7,987,118	7,985,747	7,983,465	7,979,196
	Doku	Enerji (MeV)	1.736	1.695	1.653	1.591
		Sayı	7,633,159	7,584,587	7,528,192	7,432,291
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.21. Elektron için katmanlarda emilen enerji miktarı (6 MeV, 7.0×10^3 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	4855	4855	4854	4857
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0837	0.0838	0.0838	0.0840
		Sayı	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.1405	0.1409	0.1406	0.1409
		Sayı	6997	6997	6997	6997
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0516	0.0861	0.1204	0.1710
		Sayı	6995	6995	6995	6995
	Su	Enerji (MeV)	0.7179	0.7190	0.7218	0.7236
		Sayı	6995	6994	6993	6993
	Doku	Enerji (MeV)	4.423	4.392	4.357	4.308
		Sayı	6969	6967	6966	6963
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.22. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (1 MeV, 6.5×10^4 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	6.927×10^{-9}	0	3.120×10^{-8}	0
		Sayı	1	0	1	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	9.4×10^{-3}	9.6×10^{-3}	9.6×10^{-3}	9.3×10^{-3}
		Sayı	2450	2478	2474	2481
	Kevlar	Enerji (MeV)	0.0119	0.0120	0.0117	0.0116
		Sayı	2362	2316	2370	2410

Çizelge 4.22'nin devamı

Materyal	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0081	0.0091	0.0096	0.0103
		Sayı	1891	3046	4109	5702
	Su	Enerji (MeV)	0.0164	0.0164	0.0163	0.0165
		Sayı	15,819	15,956	16,112	16,296
	Doku	Enerji (MeV)	0.0646	0.0646	0.0646	0.0645
		Sayı	54,019	53,920	53,869	53,791
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0517	0.0516	0.0514	0.0513
		Sayı	26,360	26,210	26,079	25,944

Çizelge 4.23. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (5 MeV, 2.0×10^4 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0	0	0	0.0263
		Sayı	0	0	0	1
	Polietilen	Enerji (MeV)	8.5×10^{-3}	8.4×10^{-3}	8.2×10^{-3}	8.5×10^{-3}
		Sayı	425	429	422	411
	Kevlar	Enerji (MeV)	8.5×10^{-3}	8.8×10^{-3}	9.3×10^{-3}	8.7×10^{-3}
		Sayı	374	377	362	360
	Polietilen	Enerji (MeV)	5.9×10^{-3}	6.1×10^{-3}	7.2×10^{-3}	7.8×10^{-3}
		Sayı	322	496	679	902
	Su	Enerji (MeV)	0.0123	0.0127	0.0125	0.0125
		Sayı	2399	2425	2413	2462
	Doku	Enerji (MeV)	0.0546	0.0546	0.0546	0.0546
		Sayı	10,779	10,797	10,838	10,837
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0593	0.0593	0.0592	0.0591
		Sayı	7537	7524	7530	7505

Çizelge 4.24. Nötron için katmanlarda emilen enerji miktarı (10 MeV, 1.0×10^4 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	0.0094	0.0067	0.0075	0.0104
		Sayı	102	107	112	106
	Kevlar	Enerji (MeV)	1.05×10^{-3}	8.4×10^{-3}	8.6×10^{-3}	6.9×10^{-3}
		Sayı	86	89	79	88
	Polietilen	Enerji (MeV)	7.5×10^{-3}	7.7×10^{-3}	8.4×10^{-3}	9.2×10^{-3}
		Sayı	88	143	173	237
	Su	Enerji (MeV)	0.0132	0.0124	0.0136	0.0122
		Sayı	602	617	623	656
	Doku	Enerji (MeV)	0.0546	0.0548	0.0545	0.0545
		Sayı	2836	2843	2847	2874
	İskelet	Enerji (MeV)	0.0552	0.0555	0.0554	0.0549
		Sayı	1973	1968	1971	1961

Çizelge 4.25. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (6.9 MeV, 1.5×10^5 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0386	0.0386	0.0386	0.0386
		Sayı	1.5×10^5	1.5×10^5	1.5×10^5	1.5×10^5
	Polietilen	Enerji (MeV)	6.86	6.86	6.86	6.86
		Sayı	149,998	149,998	149,998	149,998
	Kevlar	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.25'in devamı

Materyal	Polietilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.26. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (16.1 MeV, 6.0×10^4 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0245	0.0245	0.0245	0.0245
		Sayı	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4
	Polietilen	Enerji (MeV)	16.06	16.06	16.06	16.06
		Sayı	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4	6.0×10^4
	Kevlar	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Polietilen	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.27. Alfa parçacığı için katmanlarda emilen enerji miktarı (41.2 MeV, 4.0×10^4 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136
		Sayı	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4
	Polietilen	Enerji (MeV)	9.95	9.95	9.95	9.95
		Sayı	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4	4.0×10^4
	Kevlar	Enerji (MeV)	30.94	30.94	30.94	30.94
		Sayı	39,845	39,845	39,845	39,845
	Polietilen	Enerji (MeV)	1.244	1.244	1.244	1.244
		Sayı	4759	4759	4759	4759
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.28. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (2755.2 eV, 1.0×10^9 / Gün)

	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}
		Sayı	3.84935×10^8	3.84935×10^8	3.84935×10^8	3.84935×10^8
	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	6.09×10^8	6.09×10^8	6.09×10^8	6.09×10^8
	Kevlar	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	5,648,730	5,648,730	5,648,730	5,648,730

Çizelge 4.28'in devamı

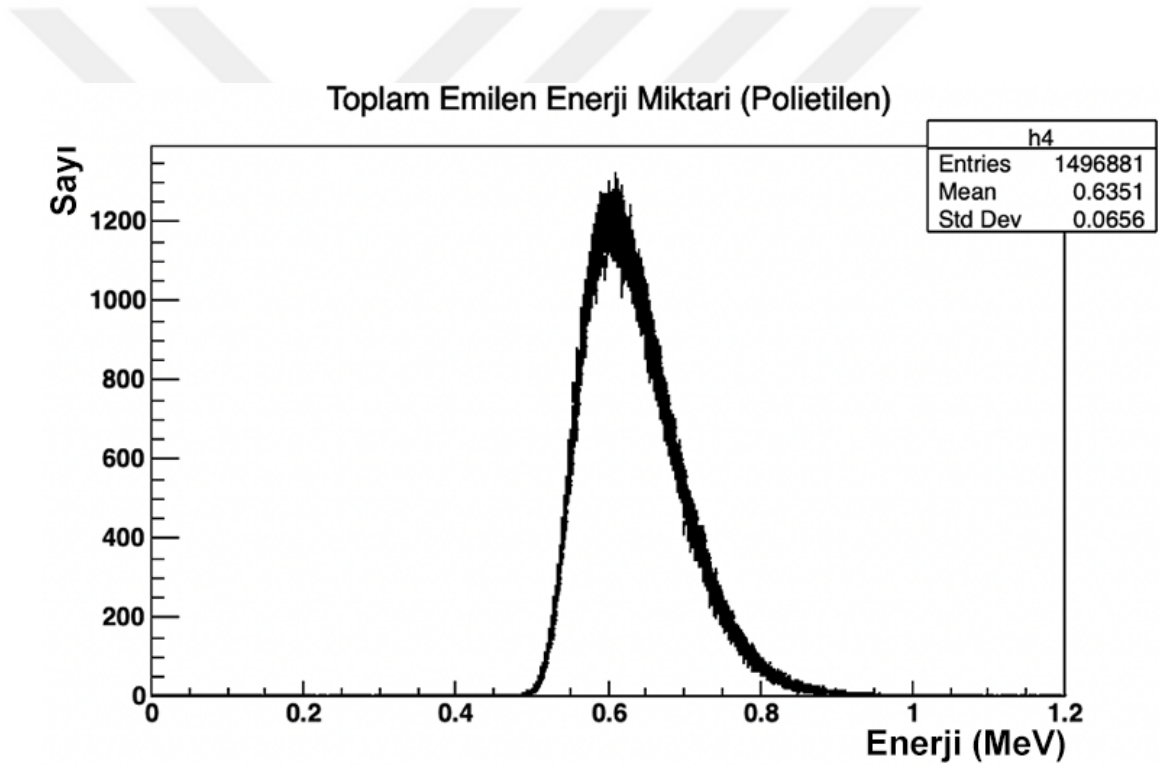
Materyal	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	15	15	15	15
	Su	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	Doku	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Çizelge 4.29. Foton için katmanlarda emilen enerji miktarı (5510.4 eV, 4.0×10^7 / Gün)

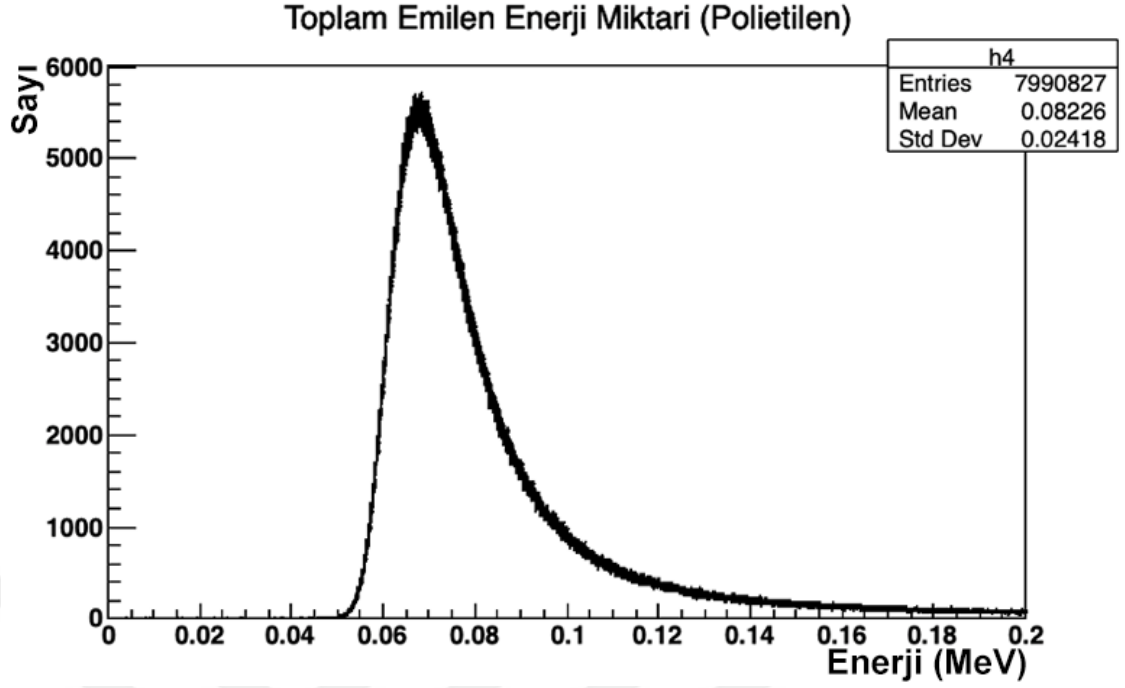
	PE Kalınlığı (mm)		0.3	0.5	0.7	1.0
Materyal	Altın	Enerji (MeV)	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}
		Sayı	3,826,034	3,826,040	3,826,046	3,826,048
	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1.569971×10^7	1.569977×10^7	1.569981×10^7	1.569984×10^7
	Kevlar	Enerji (MeV)	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
		Sayı	1.59791×10^7	1.59801×10^7	1.59806×10^7	1.59810×10^7
	Polietilen	Enerji (MeV)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
		Sayı	1,300,576	1,950,336	2,467,939	3,050,888
	Su	Enerji (MeV)	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
		Sayı	3,172,896	2,523,204	2,005,366	1,421,726
	Doku	Enerji (MeV)	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}
		Sayı	6	6	4	3
	İskelet	Enerji (MeV)	0	0	0	0
		Sayı	0	0	0	0

Her iki uzay giysisi için de çizelgeler dikkate alındığında çok benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Polipropilen lifleri hafif yapıda ve dayanıklı sentetik liflerdir. Liflerinin kimyasal yapısı sebebi ile nem kazanımları düşük ve hidrofob yapıdadır. Liflerin kopma mukavemeti ve kimyasal dayanımı yüksektir bu gibi özellikleri sayesinde uzay giysilerinin iç katmanlarında polipropilen lifleri kullanılabilir. Aynı zamanda polipropilen lifleri su tüplerinin etrafında hidrofob özelliği sayesinde yalıtım sağlamak amacıyla tercih edilebilmektedir. Polietilen lifleri ise mevcut uzay giysilerinin üretiminde kullanılmaktadır. Yüksek çekme mukavemetine ve darbe direncine sahiptir. Isı iletkenliği düşük olduğu için yalıtkan olarak kullanılabilir.

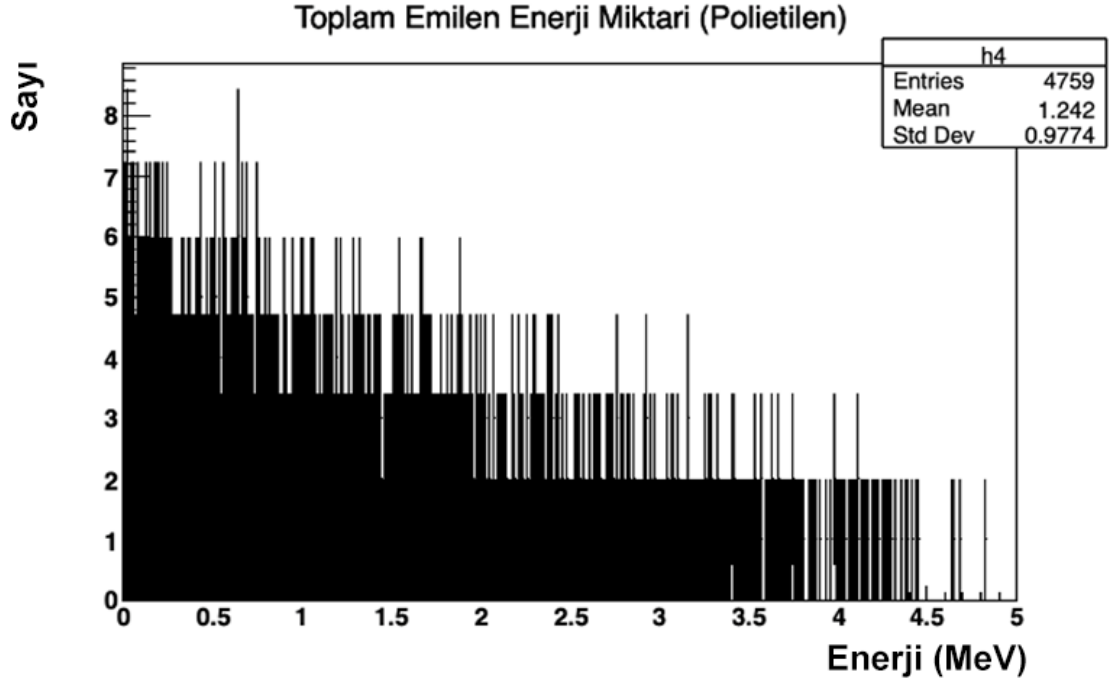
Verilen çizelgeler dikkate alındığında polietilen katmanında da polipropilende olduğu gibi kalınlık arttıkça enerji emiliminin arttığı görülmektedir. Sabit değer olarak kullanılan 0.5 mm polietilen katmanı için 50 MeV enerjideki 1.5×10^6 proton, 3 MeV enerjideki 8.0×10^6 elektron ve 41.2 MeV enerjideki 4.0×10^4 alfa parçacığı için aşağıdaki histogramlar oluşturulmuştur.



Şekil 4.7. 50 MeV enerjideki protonların 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji emilimi



Şekil 4.8. 3 MeV enerjideki elektronların 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji Emilimi



Şekil 4.9. 41.2 MeV enerjideki alfa parçacığının 0.5 mm polietilen katmanındaki enerji Emilimi

4.5. Doku ve İskelet katmanı için Soğurulan Doz (Gy) ve Eşdeğer Doz (mSv)

SI birim sistemine göre soğurulan radyasyon dozunun birimi Gray (Gy)'dir. Bir maddenin kilogram başına ne kadar enerji emdiğini göstermektedir.

Doku ve iskelet katmanında emilen radyasyon dozunu hesaplamak için MeV cinsinden elde ettiğimiz ortalama enerji emilim değerlerini katmana gelen parçacık sayısı ile çarptıktan sonra joule (J)'e dönüştürerek enerjisini joule cinsinden hesaplarız. Hesaplamalar aşağıdaki adımları takip ederek yapılmaktadır;

$$1 \text{ MeV} = 1.60218 \times 10^{-13} \text{ J} \quad (4.1)$$

$$E_{\text{joule}} = E_{\text{MeV}} \times 1.60218 \times 10^{-13} \text{ J} \quad (4.2)$$

$$D(\text{Gy}) = \frac{E_{\text{joule}}}{m} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te $D(\text{Gy})$ Gray cinsinden soğurulan radyasyon dozu ifade etmektedir. E_{joule} katmanda soğurulan enerjiyi ifade ederken m ise katmanın kütlesini ifade etmektedir. Çizelgeler oluşturulurken yukarıdaki denklemler kullanılmıştır.

Daha sonra elde edilen Gy değerleri ile mSv cinsinden eşdeğer doz (H) hesaplaması yapılmıştır. Eşdeğer dozu hesaplamak için soğurulan doz ile radyasyon ağırlık faktörü çarpılır (W_R). Bu işlem denklem 4.4'te verilmektedir. Radyasyonun türüne göre W_R değeri değişmektedir. Bu değer proton için 5, elektron için 1, nötron için 100 keV- 2 MeV arası 20, 2 MeV- 20 MeV arasında ise 10, alfa için 20 ve fotonlar için 1 olarak alınmaktadır (Valentin 2003).

$$H = D \times W_R \quad (4.4)$$

İlk olarak polipropilen kullanılarak oluşturulan uzay giysisinde protonlar için soğurulan doz ve eşdeğer dozlar Çizelge 4.30 ve 4.31'de gösterilmektedir. 10 MeV enerjideki 3.0×10^6 adet proton için yapılan modellemede doku ve iskelet katmanlarına parçacık ulaşmamaktadır.

Çizelge 4.30. Polipropilen 50 MeV proton 1.5×10^6 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	8.5644×10^{-7}	0	4.2822×10^{-3}	0
0.5	8.5103×10^{-7}	0	4.2551×10^{-3}	0
0.7	8.4520×10^{-7}	0	4.2260×10^{-3}	0
1.0	8.3673×10^{-7}	0	4.1836×10^{-3}	0

Çizelge 4.31. Polipropilen 100 MeV proton 1.0×10^6 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	6.0529×10^{-7}	1.2694×10^{-6}	3.0264×10^{-3}	6.3470×10^{-3}
0.5	6.0642×10^{-7}	1.2634×10^{-6}	3.0321×10^{-3}	6.3170×10^{-3}
0.7	6.0754×10^{-7}	1.2574×10^{-6}	3.0377×10^{-3}	6.2870×10^{-3}
1.0	6.0929×10^{-7}	1.2480×10^{-6}	3.0464×10^{-3}	6.2400×10^{-3}

Elektron etkileşimleri incelendiğinde 1 MeV enerjideki 2.0×10^8 adet elektron için yapılan modellemede doku ve iskelet katmanlarına parçacık ulaşmamaktadır. Çizelge 4.32 ve 4.33'te doku katmanındaki soğurulan doz ve eşdeğer doz değerleri verilmektedir. İskelet katmanına parçacık ulaşmamaktadır.

Çizelge 4.32. Polipropilen 3 MeV elektron 8.0×10^6 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	1.8341×10^{-7}	0	1.8341×10^{-4}	0
0.5	1.7811×10^{-7}	0	1.7811×10^{-4}	0
0.7	1.7269×10^{-7}	0	1.7269×10^{-4}	0
1.0	1.6446×10^{-7}	0	1.6446×10^{-4}	0

Çizelge 4.33. Polipropilen 6 MeV elektron 7.0×10^3 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.2624×10^{-10}	0	4.2624×10^{-7}	0
0.5	4.2282×10^{-10}	0	4.2282×10^{-7}	0
0.7	4.1990×10^{-10}	0	4.1990×10^{-7}	0
1.0	4.1502×10^{-10}	0	4.1502×10^{-7}	0

Nötron etkileşimlerinde tüm katmanlara parçacık geldiği görülmektedir. Nötronlar nötr parçacıklardır. Bu sebeple nüfuz etme güçleri çok yüksektir fakat iyonlaştırıcı radyasyona sebep olmamaktadır.

Çizelge 4.34. Polipropilen 1 MeV nötron 6.5×10^4 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.8114×10^{-11}	3.7649×10^{-11}	9.6228×10^{-7}	7.5298×10^{-7}
0.5	4.7314×10^{-11}	3.7381×10^{-11}	9.4628×10^{-7}	7.4762×10^{-7}
0.7	4.8065×10^{-11}	3.7067×10^{-11}	9.6130×10^{-7}	7.4134×10^{-7}
1.0	4.7920×10^{-11}	3.6775×10^{-11}	9.5840×10^{-7}	7.3550×10^{-7}

Çizelge 4.35. Polipropilen 5 MeV nötron 2.0×10^4 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	8.1295×10^{-12}	1.2348×10^{-11}	8.1295×10^{-8}	1.2348×10^{-7}
0.5	8.1386×10^{-12}	1.2317×10^{-11}	8.1386×10^{-8}	1.2317×10^{-7}
0.7	8.1485×10^{-12}	1.2309×10^{-11}	8.1485×10^{-8}	1.2309×10^{-7}
1.0	8.1808×10^{-12}	1.2262×10^{-11}	8.1808×10^{-8}	1.2262×10^{-7}

Çizelge 4.36. Polipropilen 10 MeV nötron 1.0×10^4 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	2.1395×10^{-12}	3.0115×10^{-12}	2.1395×10^{-8}	3.0115×10^{-8}
0.5	2.1541×10^{-12}	3.0218×10^{-12}	2.1541×10^{-8}	3.0218×10^{-8}
0.7	2.1416×10^{-12}	3.0063×10^{-12}	2.1416×10^{-8}	3.0063×10^{-8}
1.0	2.1666×10^{-12}	2.9739×10^{-12}	2.1666×10^{-8}	2.9739×10^{-8}

Alfa parçacıklarının etkileşimleri incelendiğinde modelleme yapılırken gönderilen enerji aralıklarından hiçbirinde alfa parçacığı doku ve iskelet katmanlarına ulaşmamıştır.

Son olarak foton etkileşimleri için 2755.2 eV enerjideki fotonlar doku ve iskelet katmanına ulaşmazken 5510.4 eV enerjideki fotonlar doku katmanına ulaşmakta fakat iskelet katmanına ulaşmamaktadır. Çizelge 4.37’de doku katmanı için soğurulan doz ve eşdeğer dozlar gösterilmektedir.

Çizelge 4.37. Polipropilen 5510.4 eV foton 4.0×10^7 için doz hesaplamaları

Polipropilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.1436×10^{-17}	0	4.1436×10^{-14}	0
0.5	4.1436×10^{-17}	0	4.1436×10^{-14}	0
0.7	3.4530×10^{-17}	0	3.4530×10^{-14}	0
1.0	1.6574×10^{-17}	0	1.6574×10^{-14}	0

Son olarak polietilen kullanılarak oluşturulan ikinci uzay giysisi için de doku ve iskelet için soğurulan doz ve eşdeğer doz hesaplanmıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere her iki uzay giysisi için de birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Sırası ile ilk uzay giysisi için verilen çizelgeler ikinci uzay giysisi için de aynı sırada aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.38. Polietilen 50 MeV proton 1.5×10^6 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	8.5602×10^{-7}	0	4.2801×10^{-3}	0
0.5	8.5039×10^{-7}	0	4.2519×10^{-3}	0
0.7	8.4454×10^{-7}	0	4.2227×10^{-3}	0
1.0	8.3545×10^{-7}	0	4.1772×10^{-3}	0

Çizelge 4.39. Polietilen 100 MeV proton 1.0×10^6 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	6.0529×10^{-7}	1.2691×10^{-6}	3.0264×10^{-3}	6.3455×10^{-3}
0.5	6.0654×10^{-7}	1.2629×10^{-6}	3.0327×10^{-3}	6.3145×10^{-3}
0.7	6.0779×10^{-7}	1.2565×10^{-6}	3.0389×10^{-3}	6.2825×10^{-3}
1.0	6.0953×10^{-7}	1.2466×10^{-6}	3.0476×10^{-3}	6.2330×10^{-3}

Çizelge 4.40. Polietilen 3 MeV elektron 8.0×10^6 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	1.8302×10^{-7}	0	1.8302×10^{-4}	0
0.5	1.7756×10^{-7}	0	1.7756×10^{-4}	0
0.7	1.7188×10^{-7}	0	1.7188×10^{-4}	0
1.0	1.6332×10^{-7}	0	1.6332×10^{-4}	0

Çizelge 4.41. Polietilen 6 MeV elektron 7.0×10^3 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.2574×10^{-10}	0	4.2574×10^{-7}	0
0.5	4.2263×10^{-10}	0	4.2263×10^{-7}	0
0.7	4.1920×10^{-10}	0	4.1920×10^{-7}	0
1.0	4.1431×10^{-10}	0	4.1431×10^{-7}	0

Çizelge 4.42. Polietilen 1 MeV nötron 6.5×10^4 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.8198×10^{-11}	3.7646×10^{-11}	9.6396×10^{-7}	7.5292×10^{-7}
0.5	4.8110×10^{-11}	3.7359×10^{-11}	9.6220×10^{-7}	7.4718×10^{-7}
0.7	4.8065×10^{-11}	3.7029×10^{-11}	9.6130×10^{-7}	7.4058×10^{-7}
1.0	4.7921×10^{-11}	3.6765×10^{-11}	9.5842×10^{-7}	7.3530×10^{-7}

Çizelge 4.43. Polietilen 5 MeV nötron 2.0×10^4 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	8.1288×10^{-12}	1.2346×10^{-11}	8.1288×10^{-8}	1.2346×10^{-7}
0.5	8.1423×10^{-12}	1.2325×10^{-11}	8.1423×10^{-8}	1.2325×10^{-7}
0.7	8.1733×10^{-12}	1.2314×10^{-11}	8.1733×10^{-8}	1.2314×10^{-7}
1.0	8.1725×10^{-12}	1.2252×10^{-11}	8.1725×10^{-8}	1.2252×10^{-7}

Çizelge 4.44. Polietilen 10 MeV nötron 1.0×10^4 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	2.1387×10^{-12}	3.0085×10^{-12}	2.1387×10^{-8}	3.0085×10^{-8}
0.5	2.1518×10^{-12}	3.0172×10^{-12}	2.1518×10^{-8}	3.0172×10^{-8}
0.7	2.1431×10^{-12}	3.0163×10^{-12}	2.1431×10^{-8}	3.0163×10^{-8}
1.0	2.1634×10^{-12}	2.9739×10^{-12}	2.1634×10^{-8}	2.9739×10^{-8}

Çizelge 4.45. Polietilen 5510.4 eV foton 4.0×10^7 için doz hesaplamaları

Polietilen Kalınlığı (mm)	Soğurulan Doz (Gray)		Eşdeğer Doz (mSv)	
	Doku	İskelet	Doku	İskelet
0.3	4.1436×10^{-17}	0	4.1436×10^{-14}	0
0.5	4.1436×10^{-17}	0	4.1436×10^{-14}	0
0.7	2.7624×10^{-17}	0	2.7624×10^{-14}	0
1.0	1.6574×10^{-17}	0	1.6574×10^{-14}	0

Çizelge 4.46. Radyasyon türüne ve enerjisine göre doku ve iskelet katmanındaki toplam eşdeğer doz

Radyasyon Türü	Enerji	Toplam Eşdeğer Doz (mSv)	
		1. Uzay Giysisi (PP)	2. Uzay Giysisi (PE)
Proton	50 MeV	4.2551×10^{-3}	4.2519×10^{-3}
	100 MeV	9.3491×10^{-3}	9.3472×10^{-3}
Elektron	3 MeV	1.7811×10^{-4}	1.7756×10^{-4}
	6 MeV	4.2282×10^{-7}	4.2263×10^{-7}

Çizelge 4.46'nın devamı

Nötron	1 MeV	1.6939×10^{-6}	1.7094×10^{-6}
	5 MeV	2.0456×10^{-7}	2.0467×10^{-7}
	10 MeV	5.1759×10^{-8}	5.1690×10^{-8}
Foton	5510.4 eV	4.1436×10^{-14}	4.1436×10^{-14}

NASA, ESA, RSA'ya göre astronotların maruz kalabileceği yıllık radyasyon limitleri 3000 mSv olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.46'da simülasyonda oluşturulan uzay giysilerinin radyasyon türüne göre günlük olarak doku ve iskeletteki toplam eşdeğer doz değerleri mSv cinsinden hesaplanmıştır. Bu değerler hesaplanırken ikinci katmanda bulunan polipropilen ve polietilenin katman kalınlıkları 0.5 mm için olan değerler kullanılmıştır. Tüm radyasyon türlerine göre eşdeğer dozun toplam değeri yıllık, yaklaşık olarak 5 mSv dir. Bu değer belirlenen yıllık radyasyon limitinin çok altında olduğu görülmektedir.

4.6. Geant4 Simülasyonu Doğruluk Analizi

Tez çalışması kapsamında yapılan simülasyonun doğruluğunu kontrol etmek için NIST kütüphanesinde bulunan Pstar, Astar ve Estar'da mevcut olan durdurma gücü çizelgelerindeki verilerden yararlanılmıştır. Pstar, protonlar, Astar alfa parçacıkları ve Estar ise elektronlar için durdurma gücü değerlerini vermektedir. Şekil 4.10'da Pstar'dan alınan bir çizelge örneği gösterilmektedir.

(required) Kinetic Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm ² /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm ²)	Projected (g/cm ²)	Detour Factor Projected / CSDA
1.000E-03	1.849E+02	5.407E+01	2.390E+02	4.716E-06	2.489E-06	0.5279
1.500E-03	2.265E+02	4.284E+01	2.693E+02	6.672E-06	3.777E-06	0.5661
2.000E-03	2.615E+02	3.593E+01	2.975E+02	8.438E-06	5.031E-06	0.5962
2.500E-03	2.924E+02	3.117E+01	3.236E+02	1.005E-05	6.236E-06	0.6206
3.000E-03	3.203E+02	2.766E+01	3.480E+02	1.154E-05	7.394E-06	0.6409
4.000E-03	3.699E+02	2.277E+01	3.926E+02	1.424E-05	9.584E-06	0.6731
5.000E-03	4.135E+02	1.949E+01	4.330E+02	1.666E-05	1.163E-05	0.6978
6.000E-03	4.530E+02	1.712E+01	4.701E+02	1.888E-05	1.355E-05	0.7176
7.000E-03	4.893E+02	1.531E+01	5.046E+02	2.093E-05	1.536E-05	0.7339
8.000E-03	5.230E+02	1.387E+01	5.369E+02	2.285E-05	1.708E-05	0.7477
9.000E-03	5.548E+02	1.271E+01	5.675E+02	2.466E-05	1.873E-05	0.7595

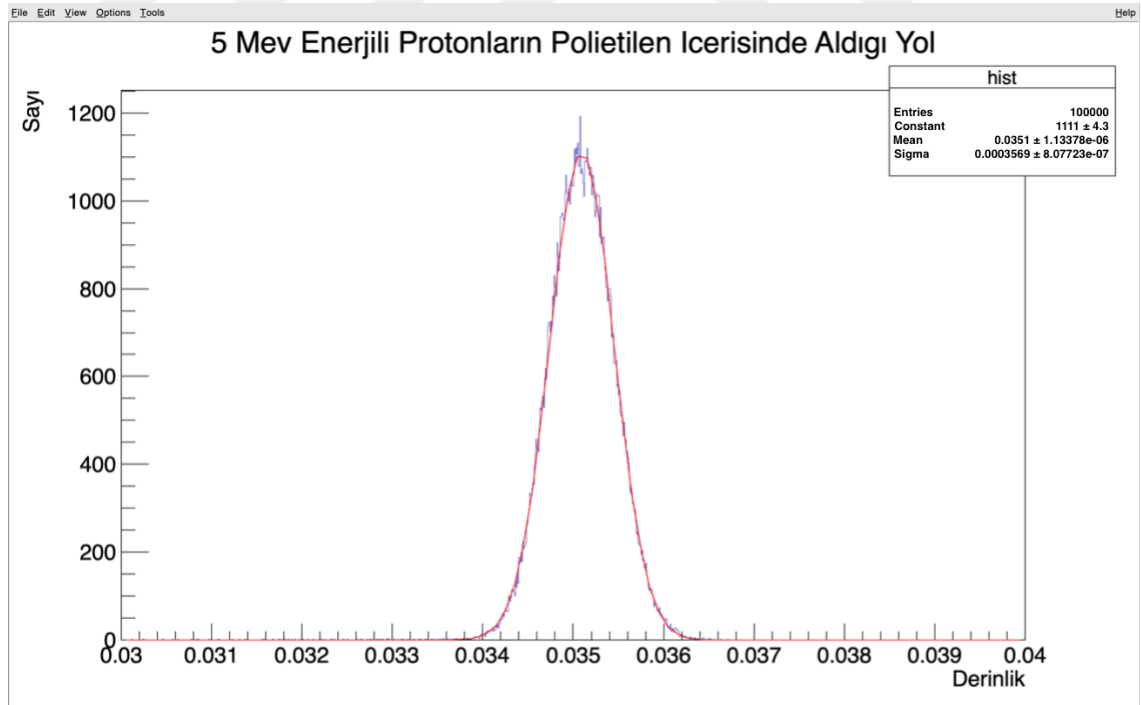
Şekil 4.10. Pstar Çizelge Örneği (https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/ap_table.pl)

Çizelgede verilen Kinetik Enerji (Kinetic Energy), gönderilen protonların MeV cinsinden enerjisini göstermektedir. Durdurma Gücü (Stopping Power) MeVcm²/g cinsinden verilmektedir. Elektronik (Electronic), Nükleer (Nuclear) ve Toplam (Total), Durdurma Gücünün alt başlıklarıdır. Elektronik, gönderilen parçacık ile hedef malzemenin yüklü parçacıkları arasındaki etkileşimler sonucu oluşan enerji kaybını vermektedir. Nükleer ise gönderilen protonun, hedef malzemenin atom çekirdeği ile

elastik çarpışması sonucu kaybettiği enerji miktarını göstermektedir. Toplam ise bu iki değerin toplamından elde edilmektedir.

Diğer sütunda bulunan Menzil (Range) ise gönderilen protonun hedef malzeme içerisinde aldığı yolu göstermektedir fakat bu yol doğrusal değildir. Sürekli Yavaşlama Yaklaşımı Menzili (Continuous Slowing Down Approximation Range – CSDA) protonun doğrusal bir yol izlediği ve kademeli olarak enerji kaybettiği yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. Öngörülen (Projected) Menzil ise protonun malzeme içerisindeki ilk ve son konumu arasındaki yolu vermektedir. Yoldan Sapma Faktörü (Detour Factor) idealize edilmiş CSDA menzilin öngörülen doğrusal menzilden ne kadar saptığını göstermektedir.

Doğruluk analizi için aşağıda verilen örnekte Pstar web sitesindeki veriler kullanılmıştır. Seçilen materyal olarak uzay giysisinde kullanılan materyaller arasında bulunan polietilen tercih edilmiştir. Tercih edilmesinin başlıca nedeni NIST Pstar web sitesinde bu materyalin mevcut olmasıdır. Enerji olarak 5 MeV seçilmiştir ve analizi yaparken çizelgede verilen Öngörülen Menzil (Projected Range) değeri kullanılmış ve bu değer $3.295 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2$ olarak verilmiştir. Geant4 simülasyonunda elde edilen değer cm cinsinden olduğundan dolayı bu değeri polietilenin yoğunluğuna (0.94 g/cm^3) bölerek ortalama (mean) değeri 0.0351 cm olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 4.11. 5 MeV enerjili protonların polietilen içerisinde aldığı yol (Geant4 ile oluşturulmuştur)

Yukarıda verilen histogram Geant4 ile oluşturulmuştur. Pstar'da kullanılan aynı enerji değeri ve materyal ile simölasyon yaparak sonuç elde edilmiştir. 5 MeV enerjide 100000 adet proton gönderilmiştir. Histogramda bu parçacıkların polietilen içerisinde aldığı yol gösterilmektedir. şekil 4.11'de görölüdüğü üzere gönderilen parçacıkların aldığı yolun ortalama (mean) değeri 0.0351 cm olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak bulunan iki değer birbiri ile uyumlu olduğundan dolayı yapılan simölasyonun doğruluğu kanıtlanmıştır.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, uzay giysisi materyallerinin modellenmesi Geant4 ile simüle edilmiş, radyasyon hasarı ve madde-parçacık etkileşimleri araştırılmıştır. Bu araştırma doğrultusunda beş katman olarak modellenen uzay giysisinde materyal olarak; su, polipropilen, Kevlar, polietilen ve altın kullanılmıştır en iç katmanda ise insan dokusunu oluşturmak için iskelet ve doku tanımlanmıştır. Radyasyon etkileşimlerini incelemek için uzay giysisine farklı türde parçacıklar gönderilmiştir. Bu parçacıklar proton, elektron, nötron, alfa ve fotonlardır. Parçacık türlerine ve enerjilerine göre gelen parçacık sayıları değişmektedir.

İkinci katmanda kullanılan polipropilen ve polietilen arasındaki farkı gözlemlemek için iki farklı uzay giysisi oluşturulmuştur. İlk uzay giysisinde, diğer katmanlar sabit tutulurken ikinci katmanda bulunan polipropilen dört farklı kalınlıkta kullanılmış ve her bir kalınlık için simülasyon yeniden çalıştırılmıştır. Sonuçlar ise çizelgeler ile verilmiştir. Daha sonra ikinci uzay giysisi oluşturulmuş ve ikinci katmanda bulunan polipropilen yerine polietilen kullanılmıştır. İlk uzay giysisi için uygulanan adımlar ikinci uzay giysisini modellerken de aynen uygulanmış ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her iki uzay giysisi için de birbirine çok benzer sonuçlar çıktığı görülmüştür. Simülasyon çıktıları çizelgeler ile verilmiştir, elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

- Toplam enerji emilimi hesaplanırken ilk olarak birinci uzay giysisine proton parçacıkları gönderilmiştir. 10 MeV enerjide 3.0×10^6 adet parçacık, 50 MeV enerjide 1.5×10^6 adet parçacık ve 100 MeV enerjide ise 1.0×10^6 adet parçacık gönderilmiştir. Polipropilenin kalınlığı 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 mm olarak değiştirilmiştir. Kalınlık arttıkça enerji emiliminin arttığı görülmüştür. Gönderilen enerji miktarı arttıkça uzay giysisinin kalkanlama özelliğinin azaldığı görülmüştür. 10 MeV' deki parçacıkların tamamı en son Kevlar katmanına gelene kadar durdurulmuştur. 50 MeV' de gönderilen parçacıklar ise doku katmanına ulaşmıştır fakat iskelet katmanında parçacık görülmemektedir. 100 MeV' de ise parçacıklar bütün katmanlar ile etkileşime girerek tamamen nüfuz etmiştir. Aynı sonuçlar ikinci uzay giysisinde de görülmektedir.
- İkinci adım olarak parçacık tipi değiştirilerek birinci uzay giysisine elektron gönderilmiştir. 1 MeV enerjide 2.0×10^8 adet parçacık, 3 MeV enerjide 8.0×10^6 adet parçacık ve 6 MeV enerjide ise 7.0×10^3 adet parçacık gönderilmiştir. 1 MeV'deki parçacıkların tamamı bütün katmanlar ile etkileştikten sonra en son su katmanı ile etkileşerek durdurulmuştur. Doku ve iskelet katmanına parçacıklar ulaşamamıştır. 3 MeV'de ise doku katmanına parçacıklar gelirken iskelet katmanına parçacık ulaşamamaktadır. 6 MeV'de parçacıklar doku katmanına kadar ulaşmıştır fakat iskelet katmanına geçememişlerdir. Doku katmanına ulaşan parçacıkların enerji emiliminin arttığı görülmüştür. Gönderilen parçacığın enerjisi arttıkça parçacıkları durdurmak zorlaşmaktadır. Aynı sonuçlar ikinci uzay giysisinde de görülmektedir.
- Nötronların katmanlar ile parçacık etkileşimleri incelenirken sırası ile 1 MeV enerjide 6.5×10^4 adet parçacık, 5 MeV enerjide 2.0×10^4 adet parçacık ve 10 MeV enerjide 1.0×10^4 adet parçacık gönderilmiştir. Nötronların neredeyse tüm katmanlarda enerji emilimine sebep olduğu görülmektedir fakat enerjileri

düşüktür. Nötronlar nötr parçacıklardır bu sebeple iyonlaştırıcı radyasyona sebep olmamaktadır. Aynı sonuçlar ikinci uzay giysisinde de görülmektedir.

- Daha sonra dördüncü adımda parçacık tipi olarak alfa seçilmiştir. Alfa ağır yüklü bir parçacıktır bu sebeple alfa parçacığını durdurmak diğer parçacıklara göre daha kolaydır. Gönderilen alfa parçacıklarının enerjileri sırasıyla 6.9 MeV enerjide 1.5×10^5 adet parçacık, 16.1 MeV enerjide 6.0×10^4 adet parçacık ve 41.2 MeV enerjide 4.0×10^4 adet parçacık gönderilmiştir. 6.9 ve 16.1 MeV enerjideki alfa parçacıkları altın ve polietilen katmanı tarafından tamamen durdurulmuştur. 41.2 MeV enerjide ise parçacıklar polipropilen katmanına kadar ulaşmasına rağmen su, doku ve iskelet katmanına ulaşmamaktadır. Polipropilenin farklı kalınlıklarda alınmasının enerji emilimine bir etkisi olmamıştır. Aynı sonuçlar ikinci uzay giysisinde de görülmektedir.
- En son olarak fotonlar ile simülasyon tamamlanmıştır. 2755.2 eV enerjide 1.0×10^9 adet parçacık ve 5510.4 eV enerjide 4.0×10^7 adet parçacık gönderilmiştir. 2755.2 eV enerjide fotonlar doku ve iskelete ulaşmamaktadır. 5510.4 eV enerjide ise doku katmanına parçacıkların ulaştığı görülmektedir fakat ulaşan parçacık sayısı çok düşüktür. Aynı sonuçlar ikinci uzay giysisinde de görülmektedir.

Tüm bu parçacık etkileşimleri dikkate alındığında elde edilen veriler doğrultusunda doku ve iskelete ulaşan parçacıklar için kilogram başına ne kadar enerji emildiği Gy cinsinden hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar soğurulan radyasyon dozunu vermektedir. Daha sonra elde edilen Gy değerleri ile eşdeğer doz hesaplanmıştır. Tüm radyasyon türlerine göre eşdeğer dozun toplam değeri yıllık, yaklaşık olarak 5 mSv dir. Bu değerin belirlenen yıllık radyasyon limitinin çok altında olduğu görülmektedir. İki farklı uzay giysisi incelendiğinde birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kullanım amacına göre istenilen materyal tercih edilebilir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında farklı materyaller ve katman sayıları kullanılarak Geant4 ile simüle edilebilir. Bunun yanında, ilgili simülasyonlar sadece uzay ortamında değil farklı ortamlarda da koşullar değiştirilerek tekrarlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- 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.
- 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.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., ... & Yoshida, H. (2016). Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 835, 186-225.
- Apostolakis, J., Asai, M., Bogdanov, A. G., Burkhardt, H., Cosmo, G., Elles, S., ... & Wright, D. H. (2009). Geometry and physics of the geant4 toolkit for high and medium energy applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 78(10), 859-873.
- Baker, D. N. (1996). Solar wind-magnetosphere drivers of space weather. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58(14), 1509-1526.
- Bajaj, P. (2000). Heat and flame protection. *Handbook of technical textiles*, 223-263.
- Benton, E. R., Benton, E. V., Frank, A. L., & Moyers, M. F. (2006). Characterization of the radiation shielding properties of US and Russian EVA suits using passive detectors. *Radiation measurements*, 41(9-10), 1191-1201.
- Borovsky, J. E., & Valdivia, J. A. (2018). The Earth's magnetosphere: a systems science overview and assessment. *Surveys in geophysics*, 39(5), 817-859.
- Cadogan, D. P. (2015). The past and future space suit: these single-occupant spacecraft enable human exploration outside of Earth's atmosphere, and new designs and materials promise even greater functionality. *American Scientist*, 103(5), 338-348.
- Chapman, S., & Ferraro, V. C. (1933). A new theory of magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 38(2), 79-96.
- Campbell Jr, F. C. (Ed.). (2003). *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier.
- Chang, E. Y. W. (2021). Fashion styling and design aesthetics in spacesuit: An evolution review in 60 Years from 1960 to 2020. *Acta Astronautica*, 178, 117-128.
- Chen, P. F. (2011). Coronal mass ejections: models and their observational basis. *Living Reviews in Solar Physics*, 8(1), 1-92.
- Christoffersen, R., Lindsay J. F., Noble, S. K., Meador, M. A., Kosmo, J. J., Lawrence, J. A., Brostoff, L., Young, A. and McCue, T., *Lunar Dust Effects on Spacesuit Systems*, NASA Center for AeroSpace Information, 40 pages, 2008.
- Cloudsley, M. S., Wilson, J. W., Shinn, J. L., Badavi, F. F., Heinbockel, J. H., & Atwell, W. (2001). Neutron environment calculations for low Earth orbit (No.

- 2001-01-2327). SAE Technical Paper.
- Cucinotta, F. A. (2014). Space radiation risks for astronauts on multiple International Space Station missions. *PloS one*, 9(4), e96099.
- Cucinotta, F. A., & Durante, M. (2009). Risk of radiation carcinogenesis. Human health and performance risks of space exploration missions. NASA SP-2009-3405. Houston: National Aeronautics and Space Administration, 119-170.
- Cucinotta, F. A., Shavers, M. R., Saganti, P. B., & Miller, J. (2003). Radiation protection studies of international space station extravehicular activity space suits (No. NASA/TP-2003-212051).
- Daşdağ, S. (2010). İyonlaştırıcı radyasyonlar ve kanser. *Dicle tıp dergisi*, 37(2).
- Feynman, J., & Gabriel, S. B. (2000). On space weather consequences and predictions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A5), 10543-10564.
- GOES Space Environment Monitor (2024). Son erişim: 10.09.2024. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>.
- Howell, E. (2020, May 22). How SpaceX's sleek spacesuit changes astronaut fashion from the space shuttle era. *Space.com*.
- Hu, S. (2017). Solar particle events and radiation exposure in space. NASA Space Radiation Program Element, Human Research Program, 1-15.
- Jenkins, D. R. (2012). Dressing for Altitude: US Aviation Pressure Suits, Wiley Post to Space Shuttle (Vol. 595). Government Printing Office.
- Knoll, G.F., 2010. Radiation Detection and Measurement. 4rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., USA 857 p.
- Koch, P. A. (2000). Polypropylene fiber table second issue. *Chemical Fibers International*, 50(2), 233-253.
- Krucińska, I., Skrzetuska, E., Puszkarz, A. K., & Kawełczyk, M. (2022). Assessment of the Impact of Ionizing Radiation Absorption on the Structural, Mechanical and Biophysical Properties of Textiles Used in Multilayer Space Suit. *Materials*, 15(14), 4992.
- Mann, I. R., Ozeke, L. G., Murphy, K. R., Claudepierre, S. G., Turner, D. L., Baker, D. N., ... & Honary, F. (2016). Explaining the dynamics of the ultra-relativistic third Van Allen radiation belt. *Nature Physics*, 12(10), 978-983
- Maurer, R. H., Fraeman, M. E., Martin, M. N., & Roth, D. R. (2008). Harsh environments: space radiation. *Johns Hopkins APL technical digest*, 28(1), 17.
- Moldwin, M. (2022). An introduction to space weather. Cambridge University Press.
- Moskowitz, C. (2008, September 27). Chinese astronauts complete first spacewalk. *Space.com*.
- Moyers, M. F., Saganti, P. B., & Nelson, G. A. (2006). EVA space suit proton and electron threshold energy measurements by XCT and range shifting. *Radiation measurements*, 41(9-10), 1216-1226.
- NASA. (2010). Human Integration Design Handbook (NASA/SP-2010-3407/REV1).

NASA.

- National Institute of Standards and Technology. (2024). Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. Son Erişim: 10.09.2024. https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/ap_table.pl
- Ohnishi, K., & Ohnishi, T. (2004). The biological effects of space radiation during long stays in space. *Biological Sciences in Space*, 18(4), 201-205.
- Ronca, S. (2017). Polyethylene. In *Brydson's plastics materials* (pp. 247-278). Butterworth-Heinemann.
- Smart, D. F., & Shea, M. A. (1985). Galactic cosmic radiation and solar energetic particles. *Handbook of geophysics and the space environment*, 6-1.
- Skoog, A., I., Abramov, I., P., Doodnik, M.N., (2002). "Soviet-Russian Astronaut Suits: A historical look at the 1960s, *Cilt 51* (No. 1-9): 113-131.
- Stassinopoulos, E. G., & Raymond, J. P. (1988). The space radiation environment for electronics. *Proceedings of the IEEE*, 76(11), 1423-1442.
- Sundstrand, H. (2002). *NASA Extravehicular Mobility Unit (EMU) LSS/SSA Data Book*.
- Temel, E., & Bozdoğan, F. (2018). Astronot Giysilerine Uygulanan Testler. *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2), 115-124.
- Thomas, K. S., & McMann, H. J. (2006). *US spacesuits* (pp. 231-294). Springer.
- Turner, J. E. (2008). *Atoms, radiation, and radiation protection*. John Wiley & Sons
- Valentin, J. (2003). Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR): ICRP Publication 92. *Annals of the ICRP*, 33(4), 1-121.
- Young, L. R., & Sutton, J. P. (Eds.). (2021). *Handbook of bioastronautics* (pp. 3-19). Cham: Springer.
- Zeitlin, C., Guetersloh, S. B., Heilbronn, L. H., Miller, J., & Shavers, M. (2006). Radiation tests of the extravehicular mobility unit space suit for the international space station using energetic protons. *Radiation measurements*, 41(9-10), 1158-1172.
- Zhu, M. F., & Yang, H. H. (2007). Polypropylene fibers. *Handbook of fiber chemistry*, 3.
- Wagner, J., Peng, W., & Vana, P. (2018). Polyethylene-grafted gold and silver nanoparticles using catalyzed chain growth (CCG). *Polymers*, 10(4), 407.
- Weiss, H., Hernandez, Y., Kim, K. H., & Rajulu, S. L. (2022). 3D virtual fit assessment and modeling: liquid cooling and ventilation garment. *International journal of clothing science and technology*, 34(3), 301-314.
- Wilson, J. W., Anderson, B. M., Cucinotta, F. A., Ware, J., & Zeitlin, C. J. (2006). Spacesuit radiation shield design methods. *SAE Transactions*, 277-293.

ÖZGEÇMİŞ

Elif ÇEÇEN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Ege Üniversitesi
2014-2019	Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir