

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YER GÖZLEM UYDULARINDAKİ DEDEKTÖRLERDE RADYASYON
HASARININ BENZETİŞİMİNİN YAPILMASI**

Ömerali YAĞCIOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**EKİM 2024
ANTALYA**

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YER GÖZLEM UYDULARINDAKİ DEDEKTÖRLERDE RADYASYON
HASARININ BENZETİŞİMİNİN YAPILMASI**

Ömerali YAĞCIOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**EKİM 2024
ANTALYA**

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

YER GÖZLEM UYDULARINDAKİ DEDEKTÖRLERDE RADYASYON
HASARININ BENZETİŞİMİNİN YAPILMASI

Ömerali YAĞCIOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

Dr. Öğr. üyesi Burçin DÖNMEZ (Danışman)

Prof Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Dr. Öğr. üyesi Tolga ATAY

ÖZET

YER GÖZLEM UYDULARINDAKİ DEDEKTÖRLERDE RADYASYON HASARININ BENZETİŞİMİNİN YAPILMASI

Ömerali YAĞCIOĞLU

Yüksek Lisans Tezi / Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. üyesi Burçin DÖNMEZ

Ekim 2024, 46 Sayfa

Bu çalışma, GEANT4 simülasyonları kullanarak SiPIN ve MCT dedektörlerinin radyasyon zararına karşı dayanıklılığını incelemektedir. Çalışmanın amacı, yeryüzü gözlem uydularında kullanılan dedektörlerin uzun vadeli radyasyon direncini değerlendirmektir. Simülasyonlar, Landsat-8 ve GOES uydularından elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Dedektör boyutları ve geometrileri GEANT4 ile tanımlanmış ve dedektör hacmi bir bütün olarak ele alınmıştır. Enerji birikimi, doz, Frenkel çiftleri ve Atom Başına Yer Değiştirmeler (DPA) hesaplanmıştır. NIEL (Non-Ionizing Energy Loss) kullanılarak, 1 MeV nötron eşdeğer akıları belirlenmiştir. Her bir enerji seviyesi ayrı ayrı değerlendirilmiş, ardından genel bir değerlendirme yapılmıştır. Dedektörler, Kapton, Dacron ve alüminyum katmanlarından oluşan çok katmanlı izolasyon (MLI) içinde yerleştirilmiştir. Sonuçlar, 10 MeV'nin altındaki protonların ve 40 MeV'nin altındaki alfa parçacıklarının MLI katmanlarını geçemediğini göstermiştir. GOES uydusundan alınan elektron ve fotonlar için enerji aralığı da MLI katmanlarını geçmek için yetersiz kalmıştır. GOES uydusu nötron verisi sağlamadığından, bu veriler STS-36 görevinden elde edilmiş ve 7 yıllık bir süreye projeksiyon yapılmıştır. Bu veriler, dedektörlerin maruz kalacağı radyasyon zararının bir tahminini sunmaktadır.

Ayrıca, GOES uydusundan elde edilen veriler, güneş döngüsünün parçacık akısını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Güneş minimumu dönemlerinde, 50 MeV'nin üzerindeki enerjilere sahip parçacıkların sayısı artma eğilimindedir ve bu parçacıkların güneş döngüsü ile uyumlu olmadıkları için kozmik ışınlar olabileceği düşünülmektedir. 50 MeV'nin altındaki parçacıklar ise güneş döngüsünün değişiklikleri ile tutarlılık göstermektedir.

Veri analizi ayrıca radyasyona bağlı hasarın mevcut olduğunu ancak henüz ölçülebilir seviyelere ulaşmadığını göstermektedir. Hartmann'ın (2017) bulgularına göre, 1 MeV nötron akısında radyasyon zararları genellikle 10^{14} veya daha yüksek akı seviyeleri gerektirmektedir. Çalışmamızda, yaklaşık 10^{11} (100 milyar) seviyelerinde çok daha düşük

akılar gözlemlenmiştir, bu da belli bir hasarın meydana geldiğini ancak henüz tespit edilebilir eşiğin altında kaldığını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma yeryüzü gözlem uyduları için dedektörlerin radyasyon zararına dayanıklılığının kapsamlı bir analizini sunmakta ve gelecekteki uydu görevleri için önemli bilgiler sağlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELER Atom Başına Yer Değiştirme (DPA), Frenkel Çiftleri, GE-ANT4, Landsat-8 OLI, MCT, Radyasyon Dayanıklılığı, SiPIN

JÜRİ: Dr. Öğr. üyesi Burçin DÖNMEZ

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Dr. Öğr. üyesi Tolga ATAY

ABSTRACT

SIMULATION OF RADIATION DAMAGE IN DETECTORS ON EARTH OBSERVATION SATELLITES

Ömerali YAĞCIOĞLU

MSc Thesis in SPACE SCIENCE and TECHNOLOGIES

Supervisor: Asst.Prof.Dr. Burçin DÖNMEZ

October 2024, 46 pages

This study investigates the radiation damage hardness of SiPIN and MCT detectors using GEANT4 simulations. The aim is to evaluate the long-term radiation resistance of detectors in Earth observation satellites. Simulations were carried out using data from the Landsat-8 and GOES satellites.

Detector dimensions and geometries were defined in GEANT4, treating the detector volume as a whole. Energy deposition, dose, Frenkel pairs, and Displacements Per Atom (DPA) values were calculated. Using NIEL (Non-Ionizing Energy Loss), 1 MeV neutron equivalent fluxes were determined. Each energy level was considered separately, followed by an overall evaluation. The detectors were positioned within multilayer insulation (MLI) made of Kapton, Dacron, and aluminum layers. The results showed that protons with energies below 10 MeV and alpha particles with energies below 40 MeV could not penetrate the MLI layers. The energy range for electrons and photons from the GOES satellite was insufficient to penetrate the MLI layers. Since GOES did not provide neutron data, estimates were derived from the STS-36 mission and projected over 7 years. These data offer an estimate of the radiation damage to which the detectors will be exposed.

Moreover, data from the GOES satellite indicated that the solar cycle significantly affects particle flux. During periods of solar minimum, the number of particles with energies above 50 MeV tends to increase, potentially due to cosmic rays, as these particles do not show coherence with the solar cycle. Particles below 50 MeV, however, remain consistent with the solar cycle's variations.

Furthermore, data analysis reveals that, while radiation-induced damage is present, it has not reached measurable levels. According to findings from Hartmann (2017), measurable radiation damage, such as from 1 MeV neutron fluxes, generally requires flux levels of 10^{14} or higher. In our study, we observed fluxes at a much lower level, approximately 10^{11} (100 billion), indicating that while damage is occurring, it remains below the threshold of detectability.

In conclusion, this study provides a comprehensive analysis of radiation damage hardness in detectors for Earth observation satellites, with significant insights for future satellite missions.

KEYWORDS: Displacements Per Atom (DPA), Frenkel Pairs, GEANT4, Landsat-8 OLI, MCT Radiation Damage Hardness, SiPIN,

COMMITTEE: Asst. Prof. Burçin DÖNMEZ

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM

Asst. Prof. Tolga ATAY



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında ve tamamlanmasında bana destek olan değerli aileme ve kıymetli hocam Dr. Burçin DÖNMEZ'e en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Öncelikle, her zaman yanımda olan ve bana desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz minnettarım. Annem Selcen YAĞCIOĞLU ve kardeşim Barış YAĞCIOĞLU , bu süreçte gösterdikleri sabır ve anlayışla her zaman motivasyon kaynağım oldular. Onların desteği olmasaydı, bu çalışmayı gerçekleştirmek çok daha zor olurdu.

Ayrıca, akademik hayatım boyunca bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak ufkumu genişleten sevgili hocam Dr. Burçin DÖNMEZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun değerli yönlendirmeleri, eleştirileri ve teşvikleri, bu tezin oluşmasında büyük rol oynamıştır. Bana olan inancınız ve desteğiniz için minnettarım. Ayrıca tezin yazımı konusundaki katkılarından dolayı Elif ÇEÇEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunar, çalışmalarımın onların desteği sayesinde bu noktaya geldiğini belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Radyasyon Kaynakları	5
2.1.1. Van Allen Kuşağı	6
2.1.2. Güneş	6
2.1.3. Kozmik Işınlr	7
2.2. Dedektörlerde Radyasyon Hasarının Ölçütleri	7
2.2.1. Frenkel Çiftleri	7
2.2.2. Atom Başına Yer Değiştirme (Displacement Per Atom-DPA)	8
2.2.3. İyonize Olmayan Enerji Kaybı (NIEL)	9
2.2.4. Kinchin-Pease Modeli	11
2.3. Parçacık Etkileşimleri	13
2.3.1. Yüklü Ağır Parçacık Etkileşimleri	13
2.3.2. Elektromanyetik dalga Etkileşimleri	15
2.3.3. Nötron Etkileşimleri	15
2.4. Yer Gözlem Uyduları	17
2.4.1. Operasyonel Arazi Görüntüleyici	19
2.5. Çok Katmanlı izolasyon	21
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. GOES Görevi ve Verileri	23
3.2. Verilerin İşlenmesi	24
3.3. Geant4	27
3.3.1. Simülasyonun Güvenilirlik Analizi	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Nötron Akısı Eşdeğeri	39

5. SONUÇLAR	42
6. KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yer Gözlem Uydularındaki Dedektörlerde Radyasyon Hasarının Benzetişiminin Yapılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20.....

Ömerali YAĞCIOĞLU

İmza



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

A	: Atomik Kütle Ağırlığı
$barn$	: $10^{-28}m^2$
c	: Işık hızı
e	: Elementer Yük
E_g	: Gamma Fotonunun Enerjisi
f	: Odak Uzaklığı
Gy	: Gray
H	: Yükseklik
m_0	: Elektron Kütlesi
N_A	: Avogadro Sayısı
p	: Piksel Boyutu
$Q(T)$	: Yer Değiştirme Verimliliği Faktörü
ρ	: Malzeme Yoğunluğu
r_0	: Elektron Yapıçapı
σ	: Kesit Alanı
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	: Elastik Tesir Kesiti
T	: Transfer Enerjisi
θ	: Saçılma Açısı
Z	: Atom Numarası
$\therefore$	Nokta (ondalık ayracı)

Kısaltmalar:

<i>CCD</i>	: Charge-Coupled Device (Yük Bağlanmış Cihaz)
<i>CSV</i>	: Comma Separated Value (Virgülle Ayrılmış Veri)
<i>DPA</i>	: Displacement Per Atom (Atom Başına Yer Değiştirme)
<i>EPEAD</i>	: Energetic Proton Electron Alpha Detector(Enerjik Proton Elektron Alfa Dedektörü)
<i>EPS</i>	: Energetic Particle Sensor (Enerjik Parçacık Sensörü)
<i>EUV</i>	: Extreme Ultra Violet (Aşırı Morötesi)
<i>GOES</i>	: Geostationary Operational Environmental Satellite (Jeostatik Operasyonel Çevresel Uydu)
<i>GPS</i>	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
<i>GSD</i>	: Ground Sampling Distance (Yer Örneklem Mesafesi)
<i>HEPAD</i>	: High Energy Proton and Alpha Particle Detector (Yüksek Enerjili Proton ve Alfa Dedektörü)
<i>LDCM</i>	: Landsat Data Continuity Mission (Landsat Veri Devamlılık Misyonu)
<i>MLI</i>	: Multi Layered Insulation (Çok Katmanlı İzolasyon)
<i>MCT</i>	: Mercury Cadmium Telluride (HgCdTe)
<i>MeV</i>	: Mega Electron Volt (Mega Elektron Volt)
<i>NIEL</i>	: Non-ionizing Energy Loss (İyonize Olmayan Enerji Kaybı)
<i>NOAA</i>	: National Oceanic and Atmospheric Administration (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)
<i>OLI</i>	: Operational Land Imager (Operasyonel Arazi Görüntüleyici)
<i>SEM</i>	: Space Environment Monitor (Uzay Çevresi İzleyicisi)
<i>SEP</i>	: Solar Energetic Particle (Güneş Enerjik Parçacığı)
<i>SiPIN</i>	: Silicon PIN (P-type, Intrinsic, N-type) (Silisyum PIN (P-tipi, İçsel, N-tipi))
<i>SNR</i>	: Signal Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)

SWPC : Space Weather Prediction Center (Uzay Hava Tahmin Merkezi)
TeV : Tera Electron Volt (Tera Elektron Volt)
TIRS : Thermal Infrared Sensor (Termal Kızılötesi Sensör)
USGS : United States Geological Survey (Amerika Birleşik Devletleri
Jeolojik Araştırma Kurumu)
XRS : X-Ray Sensor (X-Işını Sensörü)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Radyasyon Kaynakları (Stabile, 2008)	5
Şekil 2.2	Güneş Leke sayıları ile Güneş çevrimi (Space Wheater Prediciton Center NOAA)	6
Şekil 2.3	Frenkel çifti oluşumunun illustrasyonu (Kılıç, 2012)	8
Şekil 2.4	Nötron, proton ve elektron için silikon malzemesi içerisindeki NI-EL değerleri (Kılıç, 2012)	9
Şekil 2.5	Landsat-8 uydusunun OLI Ekipmanının illustrasyonu (Irons vd. 2011)	19
Şekil 2.6	Landsat-8 uydusunun 14 dedektöründen 1 tanesi (Knight ve Kvaran 2014)	19
Şekil 2.7	LandSat-8 için Push-Broom metodunu gösteren bir illustrasyon. Yer Örneklem mesafesi gösterilmiştir (Pankromatik band hariç) . .	21
Şekil 2.8	LandSat-8 için çok katmanlı izolasyon uygulanırken	22
Şekil 3.1	Geant4 içerisinde dedektörlerin konumlanmaları	29
Şekil 3.2	Pstar'dan alınmış bir tablo örneği	31
Şekil 3.3	5 MeV proton parçacıklarının SiPIN içerisinde aldığı yol(Geant4 ile oluşturulmuştur)	31
Şekil 4.1	63.1 MeV enerjili parçacıkların silikon dedektörden emilim miktarı (Geant4 ile oluşturulmuştur).	35
Şekil 4.2	10000 adet 12 MeV enerjili protonların çok katmanlı izolasyon ile SiPIN detektör içerisinde seyrettiği yol	36
Şekil 4.3	10000 adet 16.1 MeV enerjili alfa parçacığının silikon detektör içerisinde seyrettiği yol(çok katmanlı izolasyon olmadan)	36
Şekil 4.4	Simulasyon içerisinde kullanılan malzemelerin kesit olarak gösterimi	37
Şekil 4.5	10000 adet 10 MeV enerjili protonların çok katmanlı izolasyon olmadan SiPIN detektör içerisinde seyrettiği yol	37
Şekil 4.6	GOES uydusundan alınan bazı veriler mavi renkte, Güneş leke sayısı ise sarı renkte gösterilmiştir (Aylık). 2013-2020 aralığındaki değerleri kapsamaktadır	38
Şekil 5.1	MCT dedektörü için saçılım grafiklari	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Landsat-8 dedektörlerinde bulunan Materyallerin yer değiştirtirme hasarı eşik enerjileri ve atom yarıçapları (Konobeyev, Fischer, Korovin ve Simakov 2017)	12
Çizelge 3.1	GOES Uydusu EPEAD Veri özeti, Parçacık tipi, Kanal, Enerji aralığı (National Aeronautics and Space Administration)	24
Çizelge 3.2	GOES Uydusu HEPAD Veri özeti, Parçacık tipi, kanal, Enerji aralığı (National Aeronautics and Space Administration)	24
Çizelge 3.3	GOES-15 verileriyle üretilen alfa parçacıkları (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında	27
Çizelge 3.4	GOES-15 verileriyle üretilen protonlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında	27
Çizelge 3.5	STS-36 verileriyle üretilen nötronlar (Geant4 için kullanılmıştır).	28
Çizelge 3.6	GOES-15 verileriyle üretilen elektronlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında	28
Çizelge 3.7	GOES-15 verileriyle üretilen fotonlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında	28
Çizelge 4.1	Silikon dedektör için alfa parçacıkları ile elde edilen değerler	33
Çizelge 4.2	Silikon dedektör için nötronlar ile elde edilen değerler	34
Çizelge 4.3	Silikon dedektör için protonlar ile elde edilen değerler	34
Çizelge 4.4	Simulasyon sonucunda elde edilen değerler.	39
Çizelge 4.5	HgCdTe dedektör için protonlar ile elde edilen değerler	40
Çizelge 4.6	HgCdTe dedektör için nötronlar ile elde edilen değerler	40
Çizelge 4.7	HgCdTe dedektör için alfa parçacıkları ile elde edilen değerler	41

1. GİRİŞ

Evreni ve Dünyayı daha iyi anlamak için, atomdan galaksilere kadar uzanan bir evrende gözlem yapmak üzere çeşitli cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlar, görünmeyen ışınları tespit etmek, uzak galaksilerin derinliklerine bakmak ve gezegenlerin atmosferini incelemek gibi bir çok önemli görevi yerine getirir. Bu gözlem araçları arasında en gelişmiş ve etkili olanlardan biri de uydulardır. Uydular, gerek Dünya dışı objelere, diğer yıldız ve gezegenlere gerekse doğrudan Güneş'e veya Dünya'ya bakmamızı sağlayarak evren hakkındaki bilgilerimizi genişletir.

Diğer yıldızları inceleyerek, onların kimyasal bileşimlerini, yaşlarını, boyutlarını ve evrendeki konumlarını belirleyerek, kendi yıldızımız Güneş ve gezegenimiz Dünya hakkında daha derinlemesine bilgi edinmeyi amaçlarız. Gökadaların oluşumu, kara deliklerin doğası ve evrenin genişlemesi gibi büyük ölçekli kozmik olayları anlamak için yıldızlar ve gezegenler üzerinde yapılan gözlemler vazgeçilmezdir. Güneş'i gözlemleyerek, üzerinde meydana gelen patlamalar, Güneş lekeleri ve koronal kütle atımları gibi olayların Dünya'mızın manyetik alanı, iklimi ve iletişim sistemleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlarız.

Yer yüzüne bakan uydular, iklim değişikliği, şehirlerin büyümesi, ormansızlaşma, deniz seviyesinin yükselmesi gibi büyük ölçekli çevresel değişimleri ve tarım, ulaşım gibi ticari faaliyetleri yakından takip etmemizi sağlar. Uydulardan elde edilen veriler, meteorologların hava tahminlerini daha doğru yapmasına, jeologların deprem riskini değerlendirmesine ve acil durum ekiplerinin afet bölgelerine daha hızlı müdahale etmesine olanak tanır. Ayrıca GPS gibi konum belirleme sistemleri oluşturarak, navigasyon, arama kurtarma ve lojistik gibi bir çok alanda günlük hayatımızı kolaylaştırır. Uydular ayrıca, tarım, jeoloji ve oşinografi gibi çeşitli bilimsel ve endüstriyel faaliyetlerde de yaygın olarak kullanılır.

Bu sebeplerden dolayı, bilimsel araştırmalar yapmak, doğal afetleri izlemek, iletişimi sağlamak ve coğrafi bilgileri güncellemek gibi pek çok amaçla uzaya uydular gönderilir. Uyduların ömrünü bilmek ve ne kadar süreyle doğru bilgi taşıyabileceğini anlamak, uzay görevlerinin başarısı için kritik öneme sahiptir. Zira uzay ortamındaki radyasyon, meteoroid çarpmaları ve yörünge bozulmaları gibi faktörler, uyduların ömrünü etkileyebilmektedir. Uyduların üzerindeki dedektörler, uzaydan gelen verileri toplayan en önemli bileşenlerdir ve bu sayede bilim insanları evren ve Dünya hakkında daha fazla bilgi edinir.

Tüm elektronik sistemler gibi uzaydaki dedektörler de çeşitli nedenlerle bozulabilmekte veya hasar görebilmektedir. İnsan kaynaklı hataları ve büyük ölçekli sorunları bir kenara bırakırsak, dedektörlerin işlevsizleşmesinin en yaygın nedeni fiziksel hasarlardır. Meteoroid çarpmaları, termal döngüler, titreşimler ve mekanik gerilmeler gibi faktörler, dedektörlerin fiziksel bütünlüğünü bozarak performanslarını düşürebilir. Ayrıca dedektörler, hassas yapılarından dolayı elektromanyetik dalgaların yanı sıra, yüklü parçacıklar ve yüksek enerjili radyasyon gibi etkilere de zarar görebilir. Bu tür hasarlar, dedektörlerin sadece çalışmaz hale gelmesine değil, aynı zamanda toplanan verilerin kalitesinde de bozulmalara yol açabilmektedir.

Bu hasarları daha iyi anlayabilmek için radyasyon hasarı hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Radyasyon, enerji taşıyan dalgalar veya parçacıklar şeklinde yayılan bir süreçtir. Dedektörlerin uzayda ne kadar ömrü olduğu ve ne kadar güvenilir bilgi sağlayabildiği, maruz kaldıkları radyasyon hasarı gibi faktörlere bağlıdır. Radyasyon hasarını anlamak ve kontrol etmek, uyduların ömrünü uzatmak ve sağladıkları verinin doğruluğunu korumak için hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, uyduların fırlatılmasında ve kullanılmasında dedektörlerin dayanıklılığı ve performansı sürekli olarak değerlendirilmektedir.

Radyasyon, enerji taşıyan dalgalar veya parçacıklar şeklinde yayılan bir süreçtir. Uzaydaki dedektörler için hasar oluşturan en önemli etkenlerden biridir. İyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olarak iki farklı türü bulunur. Radyasyon, dedektörlerin hassasiyetini düşürerek, gürültü seviyesini artırarak ve yanlış veri üretimine yol açarak hem ömürlerini kısaltır hem de elde edilen verilerin doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle, dedektörlerin uzayda ne kadar süre çalışabileceği ve ne kadar güvenilir veri sağlayabileceği büyük ölçüde maruz kaldıkları radyasyon dozuna ve türüne bağlıdır. Uyduların fırlatılmadan önce ve görev süreleri boyunca radyasyon hasarına karşı dayanıklılıkları sürekli olarak test edilmekte ve değerlendirilmektedir. Radyasyon hasarını minimize etmek için kalkanlama malzemeleri kullanımı, radyasyona dayanıklı elektronik bileşenlerin tercih edilmesi gibi çeşitli koruma yöntemleri geliştirilmiştir.

Sonuç olarak uydular, evreni ve Dünyamızı anlamak, iletişimi sağlamak ve günlük hayatımızı kolaylaştırmak için vazgeçilmez araçlardır. Bu araçların etkin ve uzun süreli kullanımı, doğru ve güvenilir veri sağlama kapasitesine bağlıdır. Bu nedenle uyduların ömrünü ve performansını iyileştirmek için malzeme bilimi, elektronik ve yazılım teknolojilerinde sürekli olarak gelişmeler yaşanmaktadır. Gelecekte daha küçük, daha hafif ve daha gelişmiş dedektörlere sahip, daha uzun ömürlü ve daha karmaşık görevleri yerine getirebilen uydular geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Uzay araştırmaları, uluslararası bir öneme sahip olup, farklı ülkeler ve kurumlar arasında iş birliğine teşvik etmektedir. Bu sayede insanlık, evren hakkındaki bilgilerini daha da genişletecek ve karşılaştığı küresel sorunlara daha gelişmiş çözümler üretecektir.

Radyasyon hasarı, dedektörlerin ömrünü ve güvenilirliğini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu bilgi, uzay görevlerinin başarısı için kritik bir öneme sahiptir. Dedektörlerin radyasyon hasarından ne kadar etkilendiğini bilmek, uyduların güvenilir veri sağlama süresini tahmin edebilmemizi sağlamaktadır. Bu tür analizler için simülasyon yöntemleri kullanmak, deneysel yöntemlere göre bir çok avantaj sağlamaktadır. Özellikle GEANT4 gibi güçlü simülasyon araçları, radyasyon hasarının etkilerini modellemek ve anlamak için ideal çözümler sunmaktadır. Simülasyonların radyasyon hasarı çalışmalarındaki başlıca avantajları:

1. **Maliyet:** Somut bir deney düzeneği oluşturmak, özellikle dedektörler söz konusu olduğunda oldukça maliyetlidir. Yeni bir dedektörü sadece radyasyon etkilerini gözlemlemek amacıyla üretmek, toplam maliyeti önemli ölçüde arttırmaktadır. Simülasyonlar ise bu maliyeti önemli ölçüde azaltmaktadır. GEANT4 gibi güçlü araçlar, gerçek bir deney yapmadan önce radyasyonun dedektör üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelememize olanak tanır. Bu sayede hem zaman hem de maliyet açısından büyük tasarruf sağlanmaktadır. Sadece dedektör üretimi için değil,

deney yapımında kullanılan diğer ekipmanlar, özel laboratuvar ortamları ve deney sırasında görevlendirilen personel gibi faktörler de toplam maliyeti artıran diğer unsurlardır. Simülasyonlar, bu ek maliyetleri ortadan kaldırarak, araştırmacılara daha uygun maliyetli bir çalışma imkanı sunmaktadır.

2. **Güvenlik:** Somut radyasyon deneyleri, yüksek enerjili parçacıklar ve radyoaktif maddelerle çalışmayı gerektirdiğinden, ciddi güvenlik riskleri taşımaktadır. Özel korumalı alanlar, radyasyon dozimetreleri ve eğitilmiş personel gibi ek güvenlik önlemleri gerektirmektedir. Simülasyonlar ise bu riskleri ortadan kaldırarak, araştırmacılara güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Simülasyonlar sayesinde potansiyel radyasyon kazalarının sonuçlarını önceden tahmin edebilir ve gerekli güvenlik önlemlerini daha etkin bir şekilde planlayabiliriz. Bu sayede hem personel hem de çevre için daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturulur.
3. **Detaylı Analiz:** GEANT4 gibi simülasyon araçları, radyasyon etkileşimlerini atomik seviyede modelleyerek, radyasyonun dedektör malzemeleri üzerindeki mikroskobik etkilerini detaylı bir şekilde anlamamıza olanak tanır. Bu sayede radyasyon hasarının mekanizmalarını daha iyi kavrayabilir ve hasarın belirli bir malzeme veya dedektör geometrisi üzerindeki etkisini daha kesin bir şekilde tahmin edebiliriz. Bu detay seviyesi, somut deneylerle elde edilmesi zor olan verileri sunarak, malzeme seçiminde ve dedektör tasarımında daha bilinçli kararlar vermemizi sağlar.
4. **Zaman Verimliliği:** Somut deneyler dedektör kurulumu, veri toplama ve analiz gibi aşamaları içerdiğinden oldukça zaman alıcıdır. Simülasyonlar ise bu süreci önemli ölçüde kısaltmaktadır. Sadece bir kaç saat veya gün içerisinde farklı radyasyon enerjileri, parçacık türleri ve dedektör geometrileri gibi çok sayıda parametreyi değiştirerek binlerce farklı senaryoyu simüle edebilmekteyiz. Bu sayede radyasyon koşullarının dedektörler üzerindeki etkilerini hızla analiz edebilir ve tasarım optimizasyonunu daha kısa sürede gerçekleştirebilmekteyiz.
5. **Çeşitlilik:** Simülasyonlar, farklı radyasyon türleri (proton, elektron, iyon vb.), enerji seviyeleri ve dedektör geometrileri gibi çok sayıda parametreyi değiştirerek, geniş bir yelpazede olası koşulları ve etkileri incelememize olanak tanımaktadır. Bu sayede dedektörlerin farklı radyasyon ortamlarındaki davranışlarını daha iyi anlayabilir ve tasarımları bu ortamlara göre optimize edebiliriz. Ayrıca somut deneylerde elde edilmesi zor olan parçacıkların etkilerini de simüle edebiliriz.

Radyasyon hasarı, uzayda görev yapan dedektörlerin hassasiyetini azaltarak, veri toplama kalitesini düşürür ve ömrünü kısaltabilmektedir. Bu durum özellikle uzun süreli uzay görevlerinde bilimsel verilerin güvenilirliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. GEANT4 gibi simülasyon araçları, farklı enerji seviyelerindeki çeşitli radyasyon parçacıklarının dedektör malzemeleri ile etkileşimlerini atomik seviyede modelleyerek, radyasyon hasarının mekanizmalarını detaylı bir şekilde anlamamıza olanak tanımaktadır. Bu sayede farklı dedektör tasarımlarının radyasyon dayanıklılığını karşılaştırabilir, hasarı minimize etmek için yeni malzemeler ve geometriler geliştirebilir ve dedektörlerin ömrünü uzatacak stratejiler geliştirebilmektedir. Simülasyonların uygun maliyetli, hızlı ve güvenli olması,

uzay misyonlarının planlanması ve bütçelenmesi sürecinde büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca somut deneylerde erişilemeyen ekstrem koşulları simüle ederek, dedektörlerin uzay ortamındaki performansı daha iyi tahmin edilebilmektedir. Bu sayede uzay görevlerinin başarısı için kritik öneme sahip olan dedektörlerin güvenilirliği ve ömrü önemli ölçüde artırılabilir.



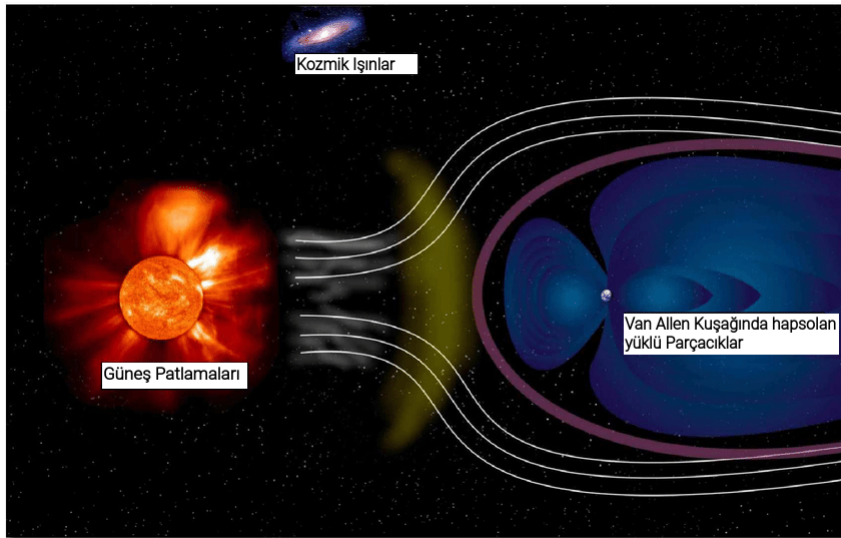
2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Radyasyon Kaynakları

Güneş sistemi içindeki en baskın radyasyon kaynağı, Güneş kaynaklı parçacıklardır. Diğer radyasyon kaynakları 3 ana başlık altında incelenebilir. En yakın kaynaktan en uzak olana göre sıralamak istenirse:

1. Van allen kuşağı kaynaklı
2. Güneş kaynaklı
3. Kozmik ışın kaynaklı

olarak sıralayabiliriz. Van allen kuşağındaki radyasyonda temelinde Güneş kaynaklıdır. Taşınan yüklü parçacıklar burada tuzaklanırlar ve radyasyon hasarına sebebiyet verebilmektedirler. Güneş önemli bir radyasyon kaynağıdır. Güneş patlamaları, güneş rüzgarları ve benzeri yollarla enerjik parçacıkların taşınımına yol açmaktadır. Güneş kaynaklı enerjik parçacıklar aynı zamanda "Solar energetic particles" olarak adlandırılır ve kısaca "SEPs" olarak bilinirler. Enerji düzeyleri değişmekle birlikte bir kaç 10 MeV(Mega Elektron Volt) seviyesindedir. Kozmik ışınlarda kendi arasında alt başlıklara ayrılır ancak bu tez kapsamında değinilmeyecektir. Kozmik ışınlar Güneş sistemi dışından gelen parçacıkları ifade etmek için kullanılmaktadır. Genellikle yüksek enerjili olan bu parçacıklar aynı zamanda ağır iyonları da barındırması ile bilinmektedir (Hanslmeier 2002).



Şekil 2.1. Radyasyon Kaynakları (Stabile, 2008)



Şekil 2.2. Güneş Leke sayıları ile Güneş çevrimi (Space Weather Prediction Center NOAA)

2.1.1. Van Allen Kuşağı

Dünya'nın manyetik alanı, Güneş rüzgarından gelen yüklü parçacıkları hapsederek Van Allen kuşaklarını oluşturmaktadır. Özellikle Güney Atlantik Anomalisi (GAA) gibi bölgelerde yoğun parçacık akışı görülmektedir. GAA, Dünya'nın manyetik alanındaki zayıflık nedeniyle oluşmaktadır ve uydular için yüksek bir radyasyon riski taşımaktadır. Uydular bu bölgeden geçiş yaparken elektronik sistemlerinde hasarlar, veri kayıpları ve ömürlerinin kısalması gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir. Radyasyon seviyesi, Güneş aktiviteleri ile yakından ilişkilidir. Güneş lekeleri, koronal kütle atımları gibi olaylar, Van Allen kuşaklarındaki parçacık yoğunluğunu artırarak radyasyon seviyesini yükseltmektedir. Van Allen kuşakları, iç ve dış olmak üzere iki ana bölgeden oluşur ve her bir bölgede farklı türde ve enerjide parçacıklar bulunmaktadır. Bu parçacıklar, uzay araçlarının elektronik sistemleri ve astronotların sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, uzay görevlerinde radyasyondan korunma yöntemleri büyük önem taşımaktadır (Hanslmeier 2002).

2.1.2. Güneş

Güneş, sürekli olarak yüklü parçacıklardan oluşan Güneş rüzgarlarını Dünya'ya doğru püskürtmektedir. Güneş patlamaları ve koronal kütle atımları gibi olaylar sırasında, Güneş rüzgarının yoğunluğu ve enerjisi artmaktadır. Bu enerjik parçacıklar, Dünya'nın manyetik alanı ile etkileşerek manyetik fırtınalara ve kutup ışıklarına neden olmaktadır. Güneş'in ortalama 11 yıllık çevrimi boyunca Güneş aktiviteleri düzenli olarak artıp azalmaktadır. Güneş leke sayısı ve Güneş patlamalarının sıklığı, Güneş çevrimiyle doğrudan ilişkilidir. Güneş'in maksimum dönemlerinde, Dünya'ya ulaşan radyasyon miktarı artar ve bu durum uydu iletişimi, elektrik şebekeleri ve uzay görevleri gibi bir çok alanda sorunlara yol açabilir. Dünya'nın manyetik alanı ve atmosferi, bizi bu zararlı radyasyondan kısmen korur ancak uzay araçları ve astronotlar, özellikle güneş fırtınaları sırasında yüksek radyasyon riskine maruz kalmaktadır (Hanslmeier 2002).

2.1.3. Kozmik Işınlr

Kozmik ışınlr tam olarak kaynağı bilinmeyen bir radyasyon tipidir. Güneş sistemi dışın- dan geldiğı bilinmektedir. Muhtemel kaynaklar olarak süpernova patlamaları, yıldız birleşmeleri, aktif galaksi çekirdekleri ve nötron yıldızları gösterilebilir. Enerji seviyeleri ise bir kaç MeV'den TeV seviyesine kadar çıkabilir. Daha yüksek enerjili olanları da mevcuttur. Bu enerji dağılımı kozmik ışınlr insan sağlığı açısından çok tehlikeli hale getirmektedir. Kozmik ışınlrın bir çoğı Güneş'in "Heliopause" tabakası tarafından engellenmektedir. Yinede yüksek enerjili olanları Dünya'ya kadar ulaşabilmektedir (Hanslmeier 2002).

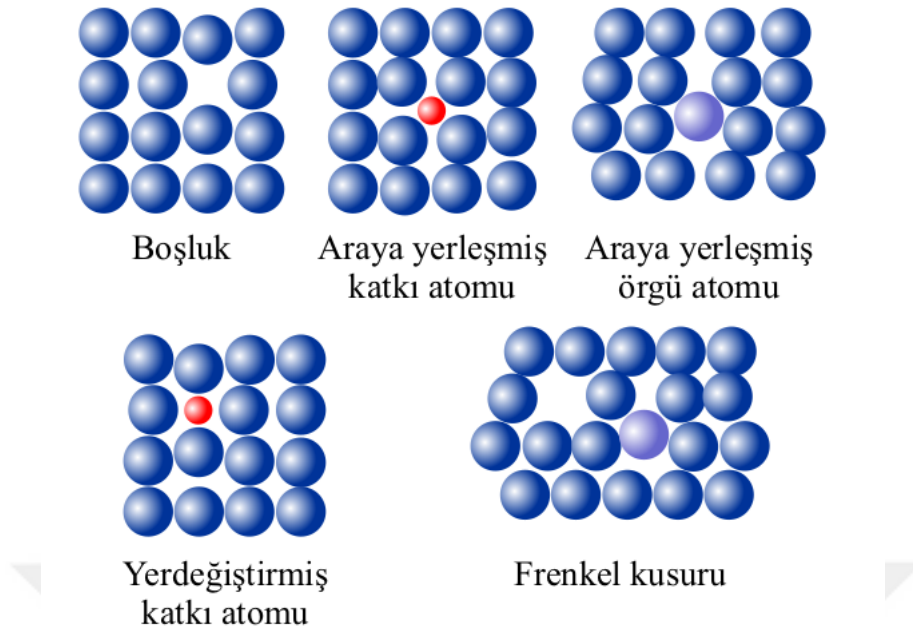
2.2. Dedektörlerde Radyasyon Hasarının Ölçütleri

Frenkel çiftleri ve DPA, malzemelerin radyasyon hasarını anlamak ve değerlendirmek için önemli kavramlardır. Frenkel çiftleri, radyasyonun malzemede yarattığı atomik düzeydeki kusurları tanımlarken, DPA, bu kusurların yaygınlığını ve ciddiyetini nicel olarak ifade etmektedir. Bu kavramlar, özellikle yüksek radyasyon ortamlarında çalışan malzemelerin performansını ve ömrünü optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Radyasyon dayanıklılığı çalışmaları, bu tür kusurların etkilerini azaltmak ve malzemelerin güvenliğini artırmak amacıyla sürekli olarak gelişmektedir. Frenkel çiftleri ve DPA, özellikle nükleer reaktörler, uzay araçları ve yüksek radyasyon ortamlarında kullanılan malzemelerin performansını ve ömrünü değerlendirmede kritik rol oynamaktadır. Frenkel çiftlerinin malzemede yarattığı kusurlar, malzemenin mekanik dayanıklılığını zayıflatabilir, elektriksel özelliklerini bozabilir ve termal iletkenliğini düşürebilir. Bu nedenle bu tür kusurların oluşumunu ve etkilerini anlamak, malzeme mühendisliği ve radyasyon dayanıklılığı çalışmalarında büyük önem taşımaktadır.

DPA, bir malzemenin radyasyon hasarına karşı dayanıklılığını nicel olarak değerlendirmek için kullanılır. DPA değerlerinin belirlenmesi, malzemelerin uzun vadeli performansını tahmin etmek ve uygun malzeme seçimleri yapmak için gereklidir. Özellikle uzay araştırmalarında ve nükleer enerji üretiminde kullanılan malzemelerin güvenilirliği ve verimliliği için DPA hesaplamaları büyük öneme sahiptir (Kılıç 2012).

2.2.1. Frenkel Çiftleri

Frenkel çiftleri, katı malzemelerdeki kristal yapının bozulması sonucu ortaya çıkan spesifik bir kusurdur. Bu kusur, bir atomun bulunduğu düzenli örgüyü terk ederek, kristal yapı içinde daha düzensiz bir konuma, yani atomlar arası bir bölgeye yerleşmesiyle oluşur. Atomun terk ettiği örgü noktasında bir boşluk (vacancy) meydana gelirken, yerinden çıkan atom ise örgü yapısının dışında, düzenli atom diziliminin haricinde bir konumda bulunur. Bu süreç hem boşluk oluştururken hem de birincil geri tepen atomun (Primary knocked-on atom - PKA) birlikte var olduğu bir kusur yapısı oluşturur ve bu yapıya "Frenkel çifti" adı verilir. Frenkel çiftleri, özellikle yüksek enerjili parçacıkların malzeme ile etkileşime girdiği durumlarda, malzemelerin mekanik ve elektriksel özelliklerini değiştirebilecek önemli bir kusur mekanizması olarak karşımıza çıkmaktadır (Kılıç 2012).



Şekil 2.3. Frenkel çifti oluşumunun illüstrasyonu (Kılıç, 2012)

Frenkel çiftlerinin oluşumu, yüksek enerjili parçacıkların (nötronlar, protonlar veya ağır iyonlar gibi) malzemeye çarpması sonucu meydana gelen bir süreçtir. Bu çarpışmalar, malzemenin kristal yapısını bozarak atomları yerlerinden oynatır. Yerinden oynayan atom, genellikle bir boşluk oluştururken, kendisi de kristal yapının başka bir bölgesinde ara bir konuma yerleşir. Bu atom-boşluk çifti, Frenkel çifti olarak adlandırılır. Frenkel çiftleri, malzemenin mekanik dayanımını zayıflatır, elektriksel iletkenliğini düşürür ve termal iletkenliğini azaltarak malzemenin genel performansını olumsuz etkiler.

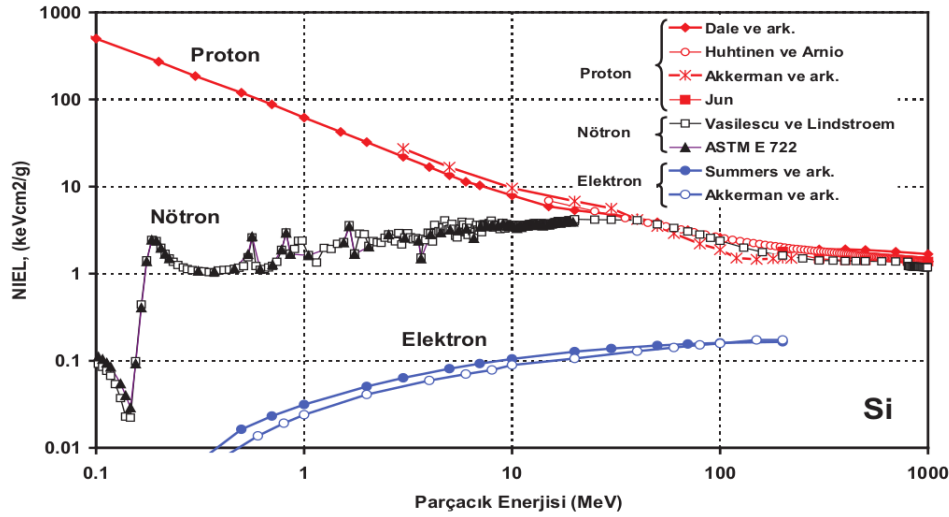
2.2.2. Atom Başına Yer Değiştirme (Displacement Per Atom-DPA)

DPA (Displacement Per Atom) "Atom başına yer değiştirme" olarak adlandırılır. Bir malzemedeki atomik düzenin ne kadarının bozulduğunu ölçmektedir. DPA, bir malzemedeki her atom başına ortalama olarak kaç atomun yerinden çıkarıldığını ifade eder. Bu ölçüm, özellikle radyasyon hasarını değerlendirmek için kullanılır ve bir malzemenin radyasyon dayanıklılığını belirlemede kritik öneme sahiptir (Nordlund ve diğ. 2015).

DPA değeri, malzemenin maruz kaldığı radyasyon akısı, enerjisi ve süresine bağlı olarak değişir. Yüksek DPA değerleri, malzemenin ciddi düzeyde radyasyon hasarına uğradığını ve atomik düzende önemli bozulmalar meydana geldiğini gösterir. DPA hesaplamaları, malzemenin radyasyonla etkileşimi sonucunda oluşan boşluk ve PKA sayısını dikkate alarak yapılır.

2.2.3. İyonize Olmayan Enerji Kaybı (NIEL)

Radyasyon hasarı hesaplamalarında, NIEL (Non-Ionizing Energy Loss) değeri önemli bir parametredir. NIEL, enerjisini iyonlaşma dışı süreçlerle kaybeden parçacıkların, mal-



Şekil 2.4. Nötron, proton ve elektron için silikon malzemesi içerisindeki NIEL değerleri (Kılıç, 2012)

zemde oluşturduğu hasarın bir ölçüsüdür. Bu hesaplamalar, parçacıkların enerjilerine ve türlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Protonlar, elektronlar ve elektromanyetik dalgalar gibi farklı parçacık türleri için NIEL değerleri farklılık göstermektedir (Akkerman, Barak, Chadwick, Levinson, Murat ve Lifshitz 2001).

Elektronlar için, enerjinin artmasıyla birlikte NIEL değerinin arttığı gözlemlenir. Bu durum, yüksek enerjili elektronların malzemede daha fazla yer değiştirme hasarına neden olmasıyla açıklanabilir. Elektronlar, yüksek enerjilerde daha fazla atomu kristal yapısındaki konumundan çıkararak Frenkel çiftlerinin oluşumuna katkıda bulunur. Bu nedenle, elektronlar için enerji arttıkça NIEL değeri de artar.

Ancak, protonlar ve alfa parçacıkları gibi ağır yüklü parçacıklar için durum farklıdır. Bu tür parçacıklar için enerji arttıkça NIEL değeri sabit kalma eğilimindedir ya da çok az bir artış gösterir. Protonlar ve alfa parçacıkları, enerjilerini daha çok iyonlaşma süreçleriyle kaybettikleri için, yüksek enerjili bu parçacıkların malzemede oluşturduğu yer değiştirme hasarı nispeten daha azdır. Bu nedenle, protonlar ve alfa parçacıkları için enerji değeri artarken NIEL değeri belirgin bir şekilde artmaz.

Elektron için iyonize olmayan enerji kaybı, diferansiyel tesir kesit ve maksimum enerji transferi ile hesaplanır. Elektron için elastik tesir kesiti $\frac{d\sigma}{d\Omega}$, Mott formülü ile verilir (Akkerman, Barak, Chadwick, Levinson, Murat ve Lifshitz 2001). NIEL için genel formül ise aşağıdaki gibidir.

$$NIEL(T_0) = \frac{N_A}{A} \int_{T_{min}}^{T_{max}} Q(T) T \frac{d\sigma}{d\Omega} dT \quad (2.1)$$

Burada:

1. T_0 elektronun başlangıçtaki kinetik enerjisi.
2. A Hedefin atomik kütle birimi cinsinden ağırlığı.
3. N_A Avogadro sayısı.
4. $Q(T)$ bölüm faktörü.
5. $\frac{d\sigma}{dT}$ T geri tepme enerjisi için diferansiyel tesir kesiti
6. T_{min} ve T_{max} , sırasıyla minimum ve maksimum enerji transferlerini temsil eder.

Elektronlar için T_{max} şöyle verilir.

$$T_{max} = \frac{2T_0(T_0 + 1.022)}{M_0c^2 A} \quad (2.2)$$

M_0c^2 bir atomik kütle birimi için eşdeğer enerjidir ve yaklaşık olarak 931.5 MeV dur.

Protonlar için NIEL hesaplaması hem elastik hem de elastik olmayan saçılma süreçlerini içerir. NIEL için genel denklem benzerdir (2.1) ancak proton etkileşimleri için ayarlanmıştır. Protonlar için enerji transferi ve tesir kesiti düşünüldüğünde, Coulomb saçılması ve nükleer reaksiyonlar dikkate alınır. Protonlar için elastik saçılma tesir kesiti şu şekildedir (Akkerman, Barak, Chadwick, Levinson, Murat ve Lifshitz 2001):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4 Z^2}{4T_0^2(1 - \cos(\theta))^2} \quad (2.3)$$

Burada:

1. e elementer yükü temsil eder.
2. Z hedef malzemenin atom numarasıdır.
3. T_0 protonun kinetik enerjisidir.
4. θ merkezi kütle çerçevesindeki saçılma açısıdır.

Gama ışınları için (bir tür elektromanyetik dalga), NIEL öncelikle Compton saçılma-dan kaynaklanır. Compton saçılma için diferansiyel kesit şu şekildedir (Akkerman, Barak, Chadwick, Levinson, Murat ve Lifshitz 2001):

$$\frac{d\sigma}{dT} = \pi r_0^2 \frac{m_0c^2 Z}{E_g^2} \left[2 - \frac{2T}{a(E_g - T)} + \frac{T^2}{a^2(E_g - T)^2} \right] \quad (2.4)$$

Burada:

1. r_0 klasik elektron yarıçapıdır.
2. m_0c^2 elektron durgun enerjisidir.
3. E_g gama fotonun enerjisidir.
4. $a = E_g/0.511MeV$.

2.2.4. Kinchin-Pease Modeli

Radyasyon hasarı çalışmaları, gelen parçacıkların enerjisinin malzemenin atomlarına nasıl aktarıldığını anlamak, ortaya çıkan hasarı tahmin etmek için önemlidir. Yüksek enerjili parçacıklar (örneğin, nötronlar veya protonlar) bir malzemenin atomlarıyla çarpıştığında, bu atomlara enerji aktarır. Bu atomlar, artık birincil geri tepen atom (Primary Knocked-on Atom - PKA) olarak bilinmektedir. Gelen parçacığın enerjisinin, atomları iyonlaştırmak yerine yerlerinden çıkarmak için kullanılan kısmına, İyonlaştırıcı Olmayan Enerji Kaybı (NIEL) denilmektedir. Bu enerji, atomların örgü pozisyonlarından çıkarılmasına ve Frenkel çiftleri olarak bilinen kusurların oluşmasına neden olur. Bu tür kusurların sayısını tahmin etmek için, Kinchin-Pease denklemi gibi modeller kullanılmaktadır. Bu denklem, malzemeye aktarılan enerji ile atomları yerinden çıkarmak için gereken minimum enerji (yer değiştirme enerjisi) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu şekilde, malzemeye aktarılan toplam iyonlaştırıcı olmayan enerji (NIEL), yer değiştirme hasarının boyutunu ve dolayısıyla malzemenin yapısal bütünlüğünün uzun vadede ne kadar bozulduğunu tahmin etmemizi sağlamaktadır (Kinchin ve Pease 1955).

$$N_d = \begin{cases} 0 & 0 < T < T_d \\ 1 & T_d \leq T < \frac{2T_d}{\kappa} \\ \frac{\kappa\nu(T)}{2T_d} & \frac{2T_d}{\kappa} \leq T < \infty \end{cases}$$

Burada, $\kappa < 1$ olup atomik etkileşmelere (etkileşim potansiyeline) bağlıdır. Hem analitik teori hem de bilgisayar simülasyonları sonucunda, κ 'nın yerdeğiştirme verimi için yaklaşık 0.8 olduğu önerilmiştir (Kılıç 2012) ve bu değer, PKA enerjisinden, hedef malzemenin türünden ve sıcaklığından bağımsızdır. $\nu(T)$, PKA enerjisinin elektronik uyarılmaya harcanmayan kısmını ifade eder. Başka bir ifade ile esnek çarpışmalar sonucu atomik yer değiştirmeler için harcanan enerjiyi ve genellikle hasar enerjisi olarak adlandırılan bu enerjiyi belirtir. Yukarıda verilen Norgett, Robinson ve Torrens 1975'in düzeltilmiş Kinchin ve Pease 1955 formülü T enerjisi PKA tarafından üretilebilecek frenkel çiftlerinin sayısını verir. Önemli noktalardan bir diğeri yukarıdaki denklemde elde edilen frenkel çiftlerinin, yer değiştiren her atomun bir frenkel çifti oluşturduğu varsayımına dayanmaktadır. Kısaca söylemek gerekirse örgüden ayrılan her bir atomun frenkel çifti oluşturduğu düşünülmektedir. Bunun yanında elimizdeki değeri toplam hacimdeki atom sayısına bölerek DPA değeri elde edilebilir. Bu birimsiz büyüklük bize radyasyon hasarı hakkında bilgi sağlamaktadır.

Dedektörlerde bulunan malzemeler için yer değiştirme hasarı eşik enerji değerleri (Konobeyev, Fischer, Korovin ve Simakov 2017):

Çizelge 2.1. Landsat-8 dedektörlerinde bulunan Materyallerin yer değiştirme hasarı eşik enerjileri ve atom yarıçapları (Konobeyev, Fischer, Korovin ve Simakov 2017)

Materyal	Enerji (eV)	Atom Yarıçapı (nm)
Silikon	13	0.110
Cıva	14	0.171
Kadmiyum	19	0.161
Tellür	15	0.140

Silikon dedektör için düzeltilmiş Kinchin-Pease formülü hesaplaması gayet kolaydır. Ancak MCT dedektöründe 3 farklı materyal bulunduğu için bunu ayrıca hesaplamak gerekmektedir (Chen, H. Liu, Gao ve Wei 2023).

$$N_d = \frac{0.4 \times E_{PKA}}{\frac{1}{a_1 + a_2 + a_3} (a_1 \times E_{d1} + a_2 \times E_{d2} + a_1 \times E_{d3})} \quad (2.5)$$

Burada a_1, a_2, a_3 kullanılan materyallerin atom yarıçaplarıdır (Chen, H. Liu, Gao ve Wei 2023).

Kinchin-Pease formülünde diğer önemli bir durum ise hasar enerjisi formülü olarak belirtilen $\nu(T)$ fonksiyonudur (Kılıç 2012).

$$\nu(T) = T - \eta(T) = \frac{T}{1 + k \times g(\epsilon)} \quad (2.6)$$

Burada;

1. $T = PKA$ Enerjisi (Transfer edilen enerji (NIEL enerjisi))
2. $\eta(T) =$ Esnek olmayan enerji kaybı
3. $k =$ Lindhard indirgenmiş enerji kaybı çarpanı
4. $g(\epsilon) =$ Lindhard teorisindeki bir parametredir

$$g(\epsilon) = 3.4008\epsilon^{1/6} + 0.40244\epsilon^{3/4} + \epsilon \quad (2.7)$$

$$k = 0.13737 Z_1^{1/6} (Z_1/A_1)^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\epsilon = [A_2 T / (A_1 + A_2)] [a / Z_1 Z_2 e^2] \quad (2.9)$$

$$a = (9\pi^2/128)^{1/3} a_0 [Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}]^{-1/2} \quad (2.10)$$

Burada a_0 Bohr yarıçapı, e elektronik yük, Z_1 ve Z_2 gelen parçacığın ve hedefin atom numaraları, ve A_1 ve A_2 iki atomun kütle numaralarıdır (Lindhard, Nielsen, Scharff ve Thomsen 1963).

2.3. Parçacık Etkileşimleri

2.3.1. Yüklü Ağır Parçacık Etkileşimleri

Ağır yüklü parçacıklar madde içinden geçerken enerjilerini çeşitli mekanizmalarla kaybederler ve sonucunda dururlar. Bu mekanizmalar arasında iyonizasyon, uyarılma, elastik ve inelastik çarpışmalar, Bremsstrahlung ve nükleer reaksiyonlar bulunur. Her bir mekanizma, parçacığın enerji kaybı sürecinde farklı rol oynar ve çeşitli etkiler yaratır.

İyonizasyon: Ağır yüklü parçacıklar, madde içinde hareket ederken atomik elektronlarla etkileşime girerler. Bu etkileşimler sırasında parçacıklar, elektronlara enerji aktarır ve bu enerji, elektronları atomlardan çıkaracak kadar büyük olabilir. Bu süreç, iyonizasyon olarak adlandırılır ve parçacık, her bir iyonizasyon olayı sırasında enerjisinin bir kısmını kaybeder. İyonizasyon, ağır yüklü parçacıkların enerji kaybının ana mekanizmasıdır ve Bethe-Bloch formülü ile tanımlanır (Turner 2007).

Uyarılma: Enerjinin aktarılması, bazen elektronları atomlardan çıkarmak yerine onları daha yüksek enerji seviyelerine uyarabilir. Bu süreç, uyarılma olarak adlandırılır. Uyarılmış atomlar, düşük enerji seviyelerine döndüklerinde enerji yayarak bu enerjiyi kaybederler (Turner 2007).

Elastik Olmayan Saçılma: İnelastik çarpışmalar, parçacığın bir atom çekirdeği veya elektron ile etkileşerek enerjisinin bir kısmını hedefe aktardığı çarpışmalardır. Bu çarpışmalar, atomun veya çekirdeğin uyarılmasına veya başka bir parçacık yaymasına neden olabilir. İnelastik çarpışmalar, ağır yüklü parçacıkların enerjilerini kademeli olarak kaybetmesine neden olur (Turner 2007).

Elastik Saçılma: Elastik çarpışmalar, ağır yüklü parçacığın bir atom çekirdeği veya elektron ile çarpışması sonucunda enerjisini kaybetmeden sadece yön değiştirdiği çarpışmalardır. Bu tür çarpışmalarda enerji korunur, ancak parçacık, madde içindeki yolunu değiştirir. Elastik çarpışmalar, özellikle düşük enerjili parçacıklar için önemlidir (Turner 2007).

Nükleer Reaksiyonlar: Yüklü ağır parçacıklar, yeterince yüksek enerjilere sahip olduklarında atom çekirdekleri ile nükleer reaksiyonlara girebilirler. Bu reaksiyonlar sırasında parçacık, çekirdeğe enerji aktarır ve bu enerji, çekirdeğin parçalanmasına veya yeni parçacıkların oluşmasına yol açabilir. Nükleer reaksiyonlar, enerjinin büyük miktarda kaybedildiği ve yeni parçacıkların yaratıldığı süreçlerdir (Turner 2007).

Ağır Yüklü Parçacıklarda Enerji Kaybı: Ağır yüklü parçacıklar, yukarıda belirtilen mekanizmalarla enerjilerini kaybederler ve sonunda madde içinde dururlar. Enerjilerinin büyük bir kısmını iyonizasyon ve uyarılma yoluyla kaybederken, geri kalanını elastik ve inelastik çarpışmalar, Bremsstrahlung ve nükleer reaksiyonlar gibi süreçlerle kaybederler. Parçacık enerjisi azaldıkça, bu mekanizmaların göreceli önemleri değişir, ancak sonuç olarak parçacık, madde içinde tamamen durana kadar enerji kaybetmeye devam eder (Turner 2007).

Ağır yüklü Parçacıklarda enerji kaybı genellikle Bethe-Bloch formulu ile verilir.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{m_e c^2 \beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 \beta^2}{I(1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right] \quad (2.11)$$

Burada:

1. $n = \frac{\rho N_A Z}{A}$
2. N_A Avogadro sayısı.
3. Z Hedef materyalin atom numarası
4. A Hedef materyalin atomik kütlesi
5. m_e Elektron kütlesi
6. c Işık hızı
7. $\beta = \frac{v}{c}$ ağır yüklü parçacığın ışık hızına göreli hızı
8. γ Lorentz faktörü ($\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$)
9. I hedef materyal için ortalama uyarılma enerjisi
10. e elementer yük
11. ρ hedef materyalin yoğunluğu
12. z ağır yüklü parçacığın yükü
13. $k_0 = 8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2 / \text{C}^2$

2.3.2. Elektromanyetik dalga Etkileşimleri

Compton saçılması: Compton saçılması fotonun hedef parçacıktan saçıldığı (genellikle elektron) bir olaydır. Bu etkileşim fotonun yönünde değişikliğe ve enerjisinde azalmaya neden olur. Bu etkileşim enerji ve momentum korunumu yoluyla anlaşılır. Foton durağan bir elektron ile çarpıştığında enerjisinin bir kısmını elektrona aktararak elektronun geri tepmesine sebep olur, kalan enerji ise saçılan foton tarafından taşınır. Fotonun transfer ettiği enerji, saçılma açısına bağlıdır. Dalga boyundaki değişme ve saçılma açısı Compton denklemi ile verilir.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (2.12)$$

Burada:

- λ fotonun başlangıçtaki dalga boyu
- λ' saçılan fotonun dalga boyu
- h planck sabiti
- m_e elektronun durağan kütlesi
- c ışık hızı
- θ saçılma açısıdır.

Foto-elektrik olay: Foto-elektrik olay her biri belli bir enerjide olan elektromanyetik dalganın, foton olarak adlandırılan parçacıklar gibi düşünülebileceğini gösterir. Foton bir malzemenin yüzeyine çarptığında enerjisini malzemede bulunan elektronlara transfer edebilir. Transfer edilen enerji iş fonksiyonundan büyükse o elektron yüzeyden fırlatılmaktadır.

Çift Oluşum: Yüksek enerjiye sahip fotonlar için genellikle baskın olan etkileşim tipi çift oluşumdur. Gama ışınının enerjisi elektronun durgun kütle enerjisinin iki katından büyükse, çift oluşum mümkün olur. Etkileşim sonucunda fotonun enerjisi oluşan elektron-pozitron çifti arasında dağılır. Pozitron çok hızlı şekilde enerjisini kaybedip yok olacağı için iki yok olma fotonu ikincil ürün olarak açığa çıkmaktadır.

2.3.3. Nötron Etkileşimleri

Nötronlar, yüksüz parçacıklar olduklarından, atom çekirdekleri etrafındaki elektriksel alanlardan etkilenmezler. Bu nedenle, madde içerisinde ilerlerken atom çekirdekleriyle etkileşime girmeden büyük mesafeler katedebilirler. Ancak, bir nötronun bir atom çekirdeğine yaklaşması durumunda, kısa menzilli ve güçlü nükleer kuvvetlerin etkisi altına

girmektedir. Bu etkileşim sonucunda, nötronun enerjisi ve çekirdeğin yapısına bağlı olarak çeşitli reaksiyonlar gerçekleşebilir. Bu reaksiyonlar elastik saçılma, inelastik saçılma, nükleer parçalanma, radyoaktif bozunma ve nötron yakalamadır (Kılıç 2012).

Esnek Saçılma (Elastic Scattering): Nötronların atom çekirdekleriyle gerçekleştirdikleri etkileşimler arasında, esnek saçılma en temel olanıdır. Bu süreçte, nötron çekirdekle etkileştikten sonra, çekirdeğin iç yapısı değişmeden, sadece enerji ve momentum transferi gerçekleşir. Esnek saçılma, potansiyel saçılma ve rezonans saçılma olmak üzere iki ana başlık altında incelenir. Potansiyel saçılmada, nötron çekirdeğin kısa menzilli nükleer kuvvet alanı ile etkileşerek yön değiştirir. Bu etkileşimde nötron, çekirdek içerisindeki nükleonlarla doğrudan temas etmeden saçılır. Rezonans saçılma ise, nötronun enerjisi çekirdeğin belirli bir enerji seviyesine eşit olduğunda gerçekleşir. Bu durumda, nötron geçici olarak çekirdek tarafından soğrulur ve daha sonra aynı veya farklı bir enerjide yeni bir nötronun yayılmasıyla süreç tamamlanır. Bu süreçte, enerji ve açısal momentum korunumu yasaları geçerlidir (Kılıç 2012).



Elastik Olmayan Saçılma (Inelastic Scattering): Elastik olmayan saçılma sürecinde, nötronun çekirdekle etkileşimi sonucu hedef çekirdek uyarılmış bir hale gelir. Bu durumda gelen nötron çekirdek tarafından soğrulur ve kararsız bir bileşik çekirdek oluşturur. Kısa bir süre sonra, bileşik çekirdek daha düşük enerjili bir nötron yayarak kararlı hale doğru gevşer. Bu gevşeme sürecinde, çekirdekteki fazla enerji bir veya daha fazla gama ışını (γ) yayımı ile dışarı atılır. Böylece çekirdek, en düşük enerjili kararlı durumuna ulaşır (Kılıç 2012).



Dönüşüm (Transmutation): Bir elementin başka bir elemente dönüştüğü nükleer reaksiyon türüne dönüşüm reaksiyonu denir. Bu reaksiyonlar, nötronun enerji seviyesine bağlı olmaksızın gerçekleşebilir. Örneğin, yavaş hareket eden bir nötronun Boron-10 çekirdeği tarafından yakalanmasıyla Lityum-7 çekirdeği ve bir alfa parçacığı oluşması bu tür reaksiyonlara örnek olarak verilebilir (Kılıç 2012).



Işınımsal Yakalama (Radiative Capture): Nötronlarla ilgili en yaygın reaksiyon türlerinden biri, bir atomik çekirdeğin nötronu soğurarak uyarılmış bir duruma geçmesi ve daha sonra kararlı hale dönmek için gama ışını (γ) yaymasıdır. Bu süreçte, elementin atom numarası değişmezken, nötron sayısı bir artar. Sonuç olarak, elementin farklı bir izotopu

oluşur. Bu tür reaksiyonlara nükleer fizikte ışımsal yakalama reaksiyonu denir (Kılıç 2012).



Parçalanma (Spallation): Yüksek enerjili bir nötronun bir atom çekirdeği ile çarpışması sonucu, çekirdeğin bir veya birkaç daha küçük parçacığa bölünmesi olayına nükleer parçalanma reaksiyonu denir. Bu süreç, ancak nötronun enerjisi 100 MeV veya daha yüksek olduğunda etkin bir şekilde gerçekleşir. Bu tür yüksek enerjili çarpışmalar, çekirdeği bir arada tutan kuvvetleri aşacak kadar güçlüdür ve böylece parçalanmaya neden olurlar.

Nötronların farklı enerji seviyelerindeki etkileşimleri oldukça farklı özellikler gösterdiğinden, bu parçacıklar enerjilerine göre çeşitli kategorilere ayrılır. 100 MeV ve üzerindeki enerjilere sahip nötronlar, yüksek enerjili nötronlar olarak adlandırılır ve genellikle çekirdeklerde hasarlara yol açmaktadır. Bir kaç keV ile bir kaç yüz MeV arasındaki enerji aralığında yer alan nötronlar ise hızlı nötronlar olarak bilinir ve nükleer reaktörlerde sıkça karşılaşılır. 100 keV ile 0.1 eV arasındaki enerji aralığındaki nötronlara epitermal nötronlar denir. Daha düşük enerjili, yani 0.1 eV'ın altında olan nötronlar ise termal veya yavaş nötronlar olarak adlandırılır ve çevre sıcaklığındaki maddelerle etkileşime girerek termal dengeye ulaşmışlardır. Enerjileri mili veya mikro eV'a kadar düşen nötronlar ise soğuk veya ultra-soğuk nötronlar olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, nötronların farklı alanlardaki uygulamalarını daha iyi anlamayı sağlamaktadır.

Söz konusu uydunun maruz kaldığı nötron akısı için en iyi yakınsama Cloudsley, Wilson, Shinn, Badavi, Heinbockel ve Atwell 2000 tarafından verilmiştir. Alçak Dünya yörüngesinde (Low Earth Orbit-LEO) dolanan iki uydunun (STS-31, STS-36) verilerine dayanarak elde edilen yaklaşımda STS-31 uydusu için dakikalık nötron akısı yaklaşık bir denklemle ifade edilmiştir. STS-31 uydusu 617 kilometrelik yerden yüksekliği ve 28.5° eğimi ile gerekli veriyi sağlamaktadır. Verilerin güvenilirliği 0-15 MeV aralığında geçerlidir.

$$Ak_1\left(\frac{n}{\text{cm}^2 \text{ MeV dk}}\right) = \frac{45.1 \pm (1.9)}{E^{0.765}} \quad (2.17)$$

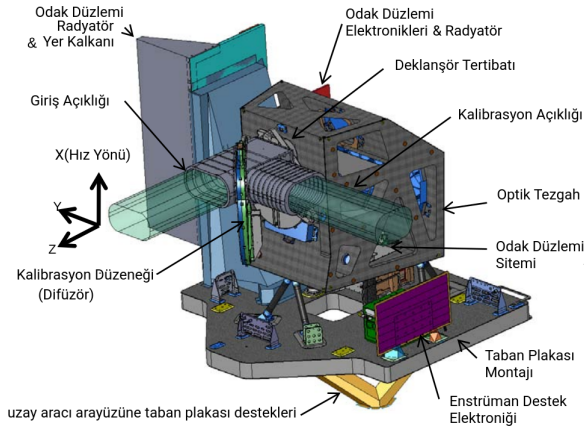
2.4. Yer Gözlem Uyduları

Yer gözlem uyduları, Dünya'nın yüzeyini, atmosferini ve okyanuslarını sürekli olarak izleyen ve veri toplayan uzay araçlarıdır. Bu uydular, çeşitli bilimsel, ticari ve askeri amaçlar için hayati öneme sahiptir. Yer gözlem uyduları, doğal afetlerin izlenmesinde ve erken uyarı sistemlerinin oluşturulmasında kritik bir rol oynar. Depremler, tsunamiler, volkanik patlamalar, kasırgalar ve sel gibi felaketlerin etkilerini hızlı bir şekilde gözlemleyerek, insan hayatını korumak için gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olurlar. Uydulardan alınan veriler, afet yönetimi ve acil durum müdahale ekiplerinin etkin çalışmasını sağla-

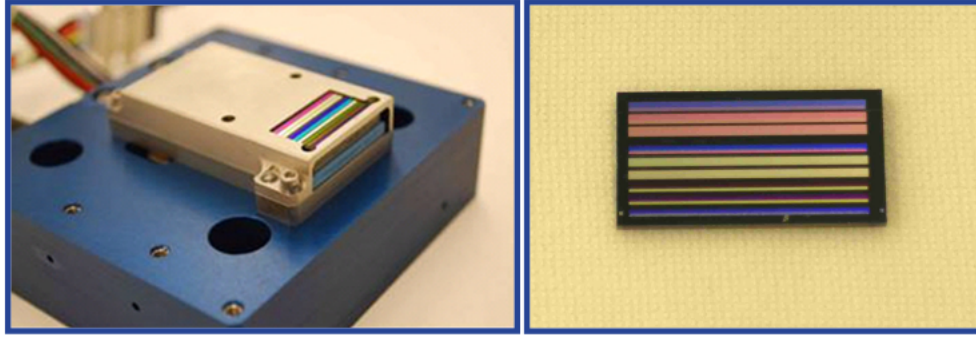
maktadır. Yer gözlem uyduları, çevresel değişikliklerin ve iklim değişikliğinin izlenmesinde vazgeçilmez araçlardır. Atmosferik gazların konsantrasyonları, deniz seviyesi değişiklikleri, ormansızlaşma ve buzulların erimesi gibi önemli çevresel veriler bu uydular aracılığıyla toplanır. Bu veriler, iklim modellerinin doğrulanması ve çevresel politikaların oluşturulmasında kullanılır. Tarımsal faaliyetlerin izlenmesi ve yönetimi için yer gözlem uyduları büyük önem taşımaktadır. Mahsul verimliliği, toprak nemi, bitki sağlığı ve sulama ihtiyaçları gibi tarımsal veriler, uydular aracılığıyla elde edilir. Bu bilgiler, çiftçilere ve tarım ile ilgilenenlere mahsul planlaması ve verimliliği artırma konusunda yardımcı olmaktadır. Ayrıca su kaynaklarının ve ormanların yönetimi gibi doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı için de kritik veriler sağlar. Yer gözlem uyduları, şehir planlaması ve arazi kullanımı yönetiminde önemli bir rol oynar. Uydulardan alınan yüksek çözünürlüklü görüntüler, şehirlerin genişlemesi, altyapı gelişimi ve doğal alanların korunması gibi konularda karar vericilere değerli bilgiler sunar. Bu veriler, kentleşme ve arazi kullanımının sürdürülebilir bir şekilde planlanmasına yardımcı olur. Yer gözlem uyduları, yeryüzünde meydana gelen mekansal ve zamansal değişimlerin izlenmesinde kritik öneme sahiptir. Toprak kaymaları, erozyon, volkanik aktiviteler ve tektonik hareketler gibi yer değişimlerini sürekli izleyerek, bilim insanlarına ve mühendislik projelerine önemli veriler sağlar. Ayrıca bu uydular zamansal değişimleri izleyerek, uzun vadeli çevresel ve iklimsel değişikliklerin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Yer gözlem uyduları, büyük ölçekli yapılar ve altyapı projelerinin izlenmesi ve incelenmesinde kullanılır. Barajlar, köprüler, yollar ve enerji santralleri gibi mühendislik projeleri, uydulardan alınan verilerle sürekli olarak izlenir. Bu sayede yapıların güvenliği ve performansı hakkında önemli bilgiler elde edilir ve gerektiğinde bakım ve onarım çalışmaları planlanır. Yer gözlem uyduları, hava durumu tahminleri ve meteorolojik gözlemler için de önem taşır. Atmosferik veriler, bulut örtüsü, yağış, rüzgar hızı ve yönü gibi meteorolojik parametreler, bu uydular aracılığıyla sürekli olarak izlenir. Bu bilgiler, hava tahminlerinin doğruluğunu artırmakta ve iklimsel olayların etkilerini anlamakta kullanılır. Aynı zamanda, fırtınalar, kasırgalar ve diğer ekstrem hava olaylarının izlenmesi ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi için kritik veriler sağlar. Yer gözlem uyduları, askeri ve ticari amaçlar için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Askeri alanda, düşman hareketlerinin izlenmesi, sınır güvenliğinin sağlanması ve istihbarat toplama gibi görevlerde önemli rol oynarlar. Ticari alanda ise, enerji, madencilik, taşımacılık ve sigortacılık gibi sektörlerde değerli veriler sağlamaktadırlar. Örneğin, petrol ve gaz arama faaliyetlerinde, uydulardan alınan veriler, kaynakların tespiti ve çıkarılması için kullanılmaktadır.

Landsat-8, NASA ve ABD Jeolojik Araştırma Merkezi (United States Geological Survey - USGS) işbirliği ile yürütülen Landsat Veri Devamlılık Misyonu (Landsat Data Continuity Mission - LDCM) kapsamında fırlatılan bir uydu olup, 11 Şubat 2013 tarihinde uza-ya gönderilmiştir. Landsat programının yeryüzü izleme rolünü devam ettiren Landsat-8, yaklaşık 705 km yükseklikte Güneş eş zamanlı bir yörüngede hareket eder. Bu yörünge, uydunun Dünya üzerindeki aynı bölgeyi her geçişinde yaklaşık olarak aynı yerel güneş zamanı ile görüntülemesini sağlar, böylece tutarlı aydınlatma koşulları sağlanır.(Irons vd. 2011) Landsat-8 iki ana enstrümana sahiptir:

1. Operasyonel Arazi Görüntüleyici(Operational Land Imager (OLI))
2. Termal Kızılötesi Sensör (Thermal Infrared Sensor (TIRS))



Şekil 2.5. Landsat-8 uydusunun OLI Ekipmanının illustrasyonu (Irons vd. 2011)



Şekil 2.6. Landsat-8 uydusunun 14 dedektöründen 1 tanesi (Knight ve Kvaran 2014)

OLI, görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi spektrumlarının görüntülenmesinden sorumlu ana enstrümandır.

2.4.1. Operasyonel Arazi Görüntüleyici

Landsat-8 üzerindeki OLI, Landsat serisinde Push-Broom tekniği kullanan ilk cihazdır. Bu teknik, önceki Landsat uydularında kullanılan Whisk-Broom tarayıcılarla karşılaştırıldığında veri kalitesini artırır ve hareketli parçaları azaltır. OLI, Ball Aerospace tarafından üretilmiştir. OLI, görünür ve yakın kızılötesi bantlar için SiPIN (Silikon Fotodiyot) dedektörleri ve kısa dalga kızılötesi bantlar için MCT (Cıva Kadmiyum Tellür) dedektörleri kullanır. Bu dedektörler, yüksek hassasiyetleri ve parlaklık verilerini doğru bir şekilde yakalama yetenekleri nedeniyle seçilmiştir (Frank Pesta, Bhatta, Helder ve Mishra 2015).

SiPIN Dedektör Silikon PIN fotodiyotlar, görünür ve yakın kızılötesi spektrumdaki verimlilikleri nedeniyle kullanılır. Bu dedektörler, fotonları emerek elektron-boşluk çiftleri oluşturur ve bu çiftler toplanarak gelen ışık yoğunluğuna orantılı bir akım üretir (Frank Pesta, Bhatta, Helder ve Mishra 2015).

MCT Dedektör Cıva Kadmiyum Tellür dedektörler, yakın kızılötesi aralıkta etkili oldukları için kullanılır. Bu dedektörler, kızılötesi radyasyona tepki olarak elektrik direncini değiştirir, bu da ölçülerek dijital sinyallere dönüştürülür (Frank Pesta, Bhatta, Helder ve Mishra 2015).

Piksel Boyutu Landsat-8'in yörünge yüksekliği ve optik özelliklerini kullanarak yer örneklem mesafesi (Ground Sample Distance - GSD) ve dedektör piksel boyutunu hesaplamak, uydu görüntülemenin temel parametrelerini belirlemekte kritik bir rol oynar. Uydu görüntülemesinde GSD, yeryüzünde bir pikselin kapsadığı alanı ifade eder. Bu görüntü çözünürlüğünün önemli bir göstergesidir. Bu hesaplamalar, uydu sensörlerinin performansını değerlendirmede ve elde edilen görüntülerin kalitesini anlamada önemli bir yer tutar.

OLI dedektörünün özel bir şirket tarafından yapılmasından dolayı dedektörün bazı özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak mümkün değildir. Bu çalışma için gerekli olan piksel boyutları dedektör büyüklüğü gibi değerler literatürde bulunamamıştır. Bu sebeple gerekli değerleri, bilinen özelliklerden türetme zorunluluğu doğmuştur. Valenzuela ve Reyesin çalışmasından yararlanılarak kullanılan GSD denklemi ile istenilen sonuca ulaşılabilmektedir (Valenzuela ve Reyes 2019).

$$GSD = \frac{H \times p}{f} \quad (2.18)$$

Burada:

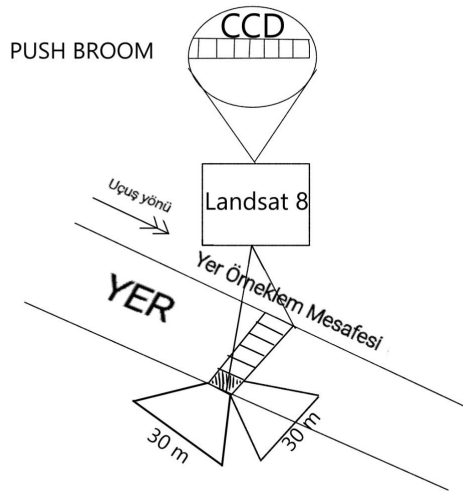
1. H = Uydu yüksekliği.
2. p = Dedektör piksel aralığı.
3. f = Uydu kamerasının odak uzaklığıdır.
4. GSD = Ground Sampling Distance (Yer Örneklem Mesafesi)

Landsat-8 de bulunan OLI dedektörü için bilinen değerler aşağıdaki gibidir.

1. GSD = 30 metre
2. f = 0.886 metre
3. H = 705 kilometre

Bir düzenleme yaparak denklem şu hale getirilir:

$$p = \frac{GSD \times f}{H} \quad (2.19)$$



Şekil 2.7. LandSat-8 için Push-Broom metodunu gösteren bir illüstrasyon. Yer Örnekleme mesafesi gösterilmiştir (Pankromatik band hariç)

Bilinenleri metre cinsinden yerine yazıldığında:

$$p = \frac{30 \times 0.886}{705000} \quad (2.20)$$

$$p = 3.770 \times 10^{-5} \text{m} \quad (2.21)$$

olarak bulunur.

2.5. Çok Katmanlı izolasyon

Uydularda kullanılan Çok Katmanlı İzolasyon (Multi Layered Insulation - MLI), uzayın termal ortamından korunmak için kritik bir bileşendir. MLI, ısı değişimini en aza indirerek uyduyu korur ve termal kontrol sağlar. MLI, radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferini minimize eder, kızılötesi radyasyonu yansıtarak ve katmanlar arasında havayı hapsederek ısıyı izole etmektedir. MLI, ince, yansıtıcı malzemelerden yapılmış bir çok katmandan oluşur. Bu katmanlar arasına yerleştirilen boşluklar, yalıtım sağlar. Genellikle alüminyum kaplı plastik filmler, gelen radyasyon enerjisini yansıtarak ısıyı uzaklaştırır. Boşluk katmanları (genellikle Dacron ağ veya benzeri malzemelerden yapılır) yansıtıcı katmanları ayırarak termal iletimi önler ve çoklu yansımaları mümkün kılar (Finckenor ve Dooling 1999). Bunların Yanında Landsat-8 de 2.5 'de görüldüğü gibi dedektör ortamının etrafında kalın bir alüminyum tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka MLI (MLI bu tabakanın üstüne geçirilir) ile bir araya geldiğinde belli enerjilere kadar radyasyon etiklerini engellemektedir.



Şekil 2.8. LandSat-8 için çok katmanlı izolasyon uygulanırken

3. MATERYAL VE METOT

3.1. GOES Görevi ve Verileri

GOES-NOP uydularında bulunan Space Environment Monitor (SEM), çeşitli enerji seviyelerinde Güneş kaynaklı protonlar, alfa parçacıkları, elektronlar ve kozmik ışınları tespit eden bir dizi cihazdan oluşmaktadır. Bu cihazlar, jeosenkron yörüngede Güneş'ten gelen X-ışını ve aşırı ultraviyole (EUV) radyasyonu ile Dünya'nın manyetik alanını ve enerjik parçacık ortamını ölçerek NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Uzay Hava Tahmin Merkezi (Space Weather Prediction Center - SWPC)'ne gerçek zamanlı veri sağlar (National Aeronautics and Space Administration 2009).

Bu çalışma, GOES uydu verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GOES uyduları, enerjik parçacıkların Dünya'ya ulaşmadan önce tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, bu uydular genellikle oldukça yüksek yörüngelerde bulunurlar. Bu tez kapsamında benzetimi yapılan uydu ise bunun tersine, Dünya'yı gözlemlemek amacıyla daha düşük bir irtifada (≈ 705 km) konumlanmıştır. GOES verilerinin Van Allen kuşağı üzerinde toplanması sebebiyle, normalde Van Allen kuşağının içine giremeyecek parçacıklar da verilerde yer alabilmektedir. Ancak, benzetimini yaptığımız uydu, Van Allen kuşağının içinde konumlanmıştır.

SEM 5 ana bileşenden oluşmaktadır:

1. **X-ray Sensörü (XRS):** Güneş'ten gelen X-ışını akısını iki bantta ölçer: 0.05-0.3 nm ve 0.1-0.8 nm. İyon odası tasarımı kullanır ve gelen elektronları saptırmak için süpürücü mıknatıslar içerir böylece sadece X-ışınları algılanır.
2. **EUV Enstrümanı:** Güneş'ten gelen aşırı ultraviyole akısını beş dalga boyu bandında (10 nm, 30 nm, 60 nm, 80 nm ve 126 nm) ölçmektedir. Bu enstrüman, iletim ızgaraları, filtreler ve katı hal dedektörleri kullanmaktadır.
3. **Energetic Particle Sensor (EPS):** Enerjik protonları, elektronları ve alfa parçacıklarını algılar. Bu sensörler, geniş bir enerji yelpazesinde parçacıkları ölçer ve iki EPEAD (Energetic Proton Electron Alpha Detector) seti içerir.
4. **High Energy Proton and Alpha Particle Detector (HEPAD):** Yüksek enerjili protonlar ve alfa parçacıklarını tespit eder. HEPAD, Zenith yönünde bakacak şekilde yerleştirilmiştir ve geniş bir enerji aralığını kapsar.
5. **Manyetometreler:** Dünya'nın manyetik alanını ölçer ve manyetik alanın varyasyonlarını izler. İki adet üç eksenli manyetometre, uzay aracının yakınında manyetik etkileri azaltmak için 8.5 metre uzunluğunda bir boma monte edilmiştir.

SEM cihazları, uzay hava tahminleri ve uyarıları vermek için kullanılır. Bu veriler, askeri ve sivil radyo iletişimi, uydu iletişimi ve navigasyon sistemleri, elektrik güç şebekele-ri ve bilimsel araştırmalar gibi bir çok alanda kritik öneme sahiptir (National Aeronautics and Space Administration 2009).

Çizelge 3.1. GOES Uydusu EPEAD Veri özeti, Parçacık tipi, Kanal, Enerji aralığı (National Aeronautics and Space Administration)

Parçacık	Kanal	Enerji Aralığı (MeV)
Proton	P1	0.74-4.2
Proton	P2	4.2-8.7
Proton	P3	8.7-14.5
Alfa	A1	3.8-9.9
Alfa	A2	9.9-20.5
Alfa	A3	20.5-618.2
Proton	P4	15-40
Proton	P5	38-82
Proton	P6	84-200
Proton	P7	110-900
Alfa	A4	60-160
Alfa	A5	160-260
Alfa	A6	330-500
Elektron	E1	>0.8
Elektron	E2	>2
Elektron	E3	>4

Çizelge 3.2. GOES Uydusu HEPAD Veri özeti, Parçacık tipi, kanal, Enerji aralığı (National Aeronautics and Space Administration)

Parçacık	Kanal	Aralık (MeV)
Proton	P8	320-420
Proton	P9	420-510
Proton	P10	510-700
Proton	P11	>700
Alfa	A7	2560-3400
Alfa	A8	>3400

3.2. Verilerin İşlenmesi

XRS enstrümanı, 2 ayrı dedektörü barındırmaktadır. Bunlar A ve B dedektörleri olarak adlandırılmaktadır. A dedektörü 0.05–0.40 nm dalga boyları arasında ölçüm yapmaktadır. B dedektörü ise 0.1–0.8 nm dalga boyları arasında ölçüm yapmaktadır. Her dalga boyu için ayrı ayrı kaç foton geldiğini hesaplamak mümkün olmadığı için bu aralıkların ortalaması ile işlem yaparak gelen foton sayısını buradan hesaplamak mümkündür. A dedektörü için 0.225 nm ve B dedektörü için ise 0.45 nm orta değerleri alınmıştır. Bunun yanında, alınan veriler $\frac{W}{m^2}$ olarak verilmiştir. Dedektöre ulaşan foton sayısını bulmak için aşağıdaki işlemler yapılmalıdır. Ayrıca, önemli olduğu için belirtmekte yarar var ki 2017'nin Eylül ayında gerçekleşen bir güneş fırtınası sebebiyle veride olağandışı hareketler görülmüştür. Olağandışı hareketler tez kapsamında olmadığı için göz ardı edilmiştir.¹

¹G3 Watch 6 and 7 September 2017 Due to CME Arrival 2017.

Öncelikli olarak;

$$\text{Güç} \frac{W}{m^2} = \Phi(A_k) \times E(\text{Enerji}) \quad (3.1)$$

Verilerden elde edilen metrekaire başına gelen güçtür, bu sebepten dolayı öncelikli olarak bunu kullanılacak olan dedektör yüzeyine göre normalize etmek gerekir. Dedektörün yüzey alanı hesaplanmalıdır. Daha önce Bölüm 2.4'te piksel boyutları hesaplanmıştır. Konu olan dedektörler 494 x 14 piksel boyutundadır.

0.0182 metre uzunluk ve 0.000518 metre eninde olan dedektörün yüzey alanı $9.4276 \times 10^{-6} m^2$ olarak bulunur.

Daha iyi anlaşılması bakımından, örnek bir hesaplama aşağıda yapılmıştır.

7 yılda B dedektörüne gelen toplam güç değeri $9.405 \frac{W}{m^2}$ 'dir.

Bu değer eldeki yüzey alanı ile çarpıldığında:

$$9.405 \frac{W}{m^2} \times 9,4276 \times 10^{-6} m^2 = 8.866 \times 10^{-5} W \quad (3.2)$$

olarak bulunur.

Foton için enerji formülü aşağıdaki gibi verilir;

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (3.3)$$

Burada $h \times c = 1.986 \times 10^{-25} J.m$ ve $\lambda = 0.225 nm$

Birimler dönüştürülecek olursa 3.1 denklemi:

$$\text{Güç}(W) = \Phi \times \frac{1.986 \times 10^{-10} \mu J \text{ nm}}{0.225 nm} \quad (3.4)$$

$$\text{Güç}(W) = \Phi \times 8.828 \times 10^{-10} \mu J \quad (3.5)$$

Denklem 3.2'de Güç hesaplanmıştır. birim çevrimini yapılarak yerine yazılırsa.

$$88.6585355918 \mu W = \Phi \times 8.828 \times 10^{-10} \mu J \quad (3.6)$$

$\Phi = \frac{\text{foton}}{s}$ olduğundan ve $Watt = \frac{J}{s}$ olduğundan denklemin iki tarafıda dengeye ulaşır. Buradan foton sayısını elde etmek için:

$$\Phi = \frac{88.66 \mu W}{8.828 \times 10^{-10} \mu J} \quad (3.7)$$

zaman birimini de 7 yıllık aldığımız için

$$\Phi = 1.00 \times 10^{11} \frac{\text{foton}}{7 \text{ yıl}} \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Aynı işlem XRS enstrümanındaki A dedektörü içinde tekrar yapılır. Benzer bir şekilde parçacık akısı da verilmiştir. Ağır yüklü parçacıklar için $\frac{\text{parçacık}}{\text{s.sr.cm}^2 \text{ MeV}}$ ve elektronlar için ise $\frac{\text{Elektron}}{\text{cm}^2 \text{ s.sr}}$ olarak verilmiştir. Öncelikli olarak dakikalık toplamı elde etme için verilen değer 60 ile çarpılır. Sonrasında veri hangi enerjiden alınmışsa örnek olarak 11.6 MeV enerjili olan parçacıklardan alınan bir veri o zaman 11.6 ile çarpılır. Dedektörün yüzey alanı ile çarpıldıktan sonra birim katı açısına gelen parçacık miktarı bulunur ancak istenen tüm yönden gelen parçacık miktarı olduğu için ve kürede toplam 4π kadar katı açısı olduğu için elde edilen değer tekrar 4π ile çarpılır ve tüm yönlerden gelen parçacık miktarı bulunmuş olur. Aşağıda buna bir örnek verilmiştir.

11.6 MeV protonlar için dakikalık toplam miktarı 7 yıl için 6.422×10^7 elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi birimlerdir. $\frac{\text{parçacık}}{\text{s.sr.cm}^2 \text{ MeV}}$ 60 ile çarpıldığında bölümdeki saniye birimini götürmektedir. $6.422 \times 10^7 \frac{\text{parçacık}}{\text{sr.cm}^2 \text{ MeV}}$ olarak bulunur.

Daha sonrasında bu sayı karşılık gelen enerji ile çarpılır.

$$6.422 \times 10^7 \times 11.6 = 7.049 \times 10^8 \frac{\text{parçacık}}{\text{sr.cm}^2} \quad (3.9)$$

Dedektör alanı da hesaba katıldığında;

$$7.049 \times 10^8 \frac{\text{parçacık}}{\text{sr.cm}^2} \times 0.094276 \text{ cm}^2 = 7.023 \times 10^7 \frac{\text{parçacık}}{\text{sr}} \quad (3.10)$$

olarak birim katı açısına gelen parçacık miktarı bulunmuştur.

Çalışma için her yönden gelen parçacık akısı gerektiği için ve küre alanında toplamda 4π adet katı açısı olduğu için;

$$7.023 \times 10^7 \frac{\text{parçacık}}{\text{sr}} \times 4\pi = 8.825 \times 10^8 \text{ parçacık} \quad (3.11)$$

olarak 11.6 MeV enerjili kaç adet parçacığın dedektöre geleceği bulunmuş olur. Bu hesaplama 7 yılda gelen parçacıkların toplamı içindir. çalışmanın ilerleyen kısımlarında 7 yıldan uzun sürede parçacık göndermek istenirse, elde edilen değer 7'ye bölünmüş hali yıllık değer olarak kullanılacaktır. Yıllık değer için kaba bir yakınsama da böylelikle elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen işlemlerin tümü kullanılan diğer parçacıklar için de

uygulanmıştır.

Çizelge 3.3. GOES-15 verileriyle üretilen alfa parçacıkları (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında

Alfa	
Enerji (MeV)	7 yıl içerisinde toplam adet
6.9	3.587×10^8
16.1	1.520×10^8
41.2	1.013×10^8
120	5.083×10^7
210	6.671×10^7
435	2.810×10^7
2980	3.080×10^7
3400>	2.335×10^{10}

Çizelge 3.4. GOES-15 verileriyle üretilen protonlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında

Proton	
Enerji(MeV)	7 yıl içerisinde toplam adet
11.6	8.825×10^8
30.6	7.104×10^8
63.1	5.265×10^8
165	3.979×10^8
375	2.611×10^9
433	5.470×10^8
465	1.504×10^8
605	8.786×10^7
700>	3.326×10^7

3.3. Geant4

GEANT4 (Geometry and Tracking) simülasyon yazılımı, yüksek enerji fiziği, nükleer deneyler, tıp fiziği ve uzay bilimleri gibi bir çok alanda radyasyon etkilerini simüle etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. GEANT4, CERN tarafından geliştirilen ve nesne yönelimli C++ dilinde yazılmış bir yazılım kütüphanesidir. Bu yazılım, kullanıcıların karmaşık dedektör geometrileri oluşturmalarına, parçacıkların madde ile etkileşimlerini modellemelerine ve enerji kaybı, saçılma, sekme gibi fiziksel süreçleri detaylı bir şekilde simüle etmelerine olanak tanır.

GEANT4 esnek ve modüler yapısı sayesinde kullanıcıların çeşitli fizik modellerini seçmelerine ve ihtiyaçlarına uygun simülasyonlar oluşturmalarına izin verir. Yazılım, gerçek dünyadaki deneysel düzeneklerin sanal kopyalarını oluşturarak, parçacıkların madde ile nasıl etkileşime girdiğini incelemeye olanak tanır. GEANT4, dedektör tasarımından

Çizelge 3.5. STS-36 verileriyle üretilen nötronlar (Geant4 için kullanılmıştır).

Nötron	
Enerji(MeV)	7 yıl içerisinde toplam adet
1	1.660×10^9
2	9.764×10^7
3	7.160×10^7
4	5.745×10^7
5	4.844×10^7
6	4.213×10^7
7	3.744×10^7
8	3.381×10^7
9	3.089×10^7
10	2.850×10^7
11	2.650×10^7
12	2.479×10^7
13	2.332×10^7
14	2.203×10^7
15	2.090×10^7

Çizelge 3.6. GOES-15 verileriyle üretilen elektronlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında

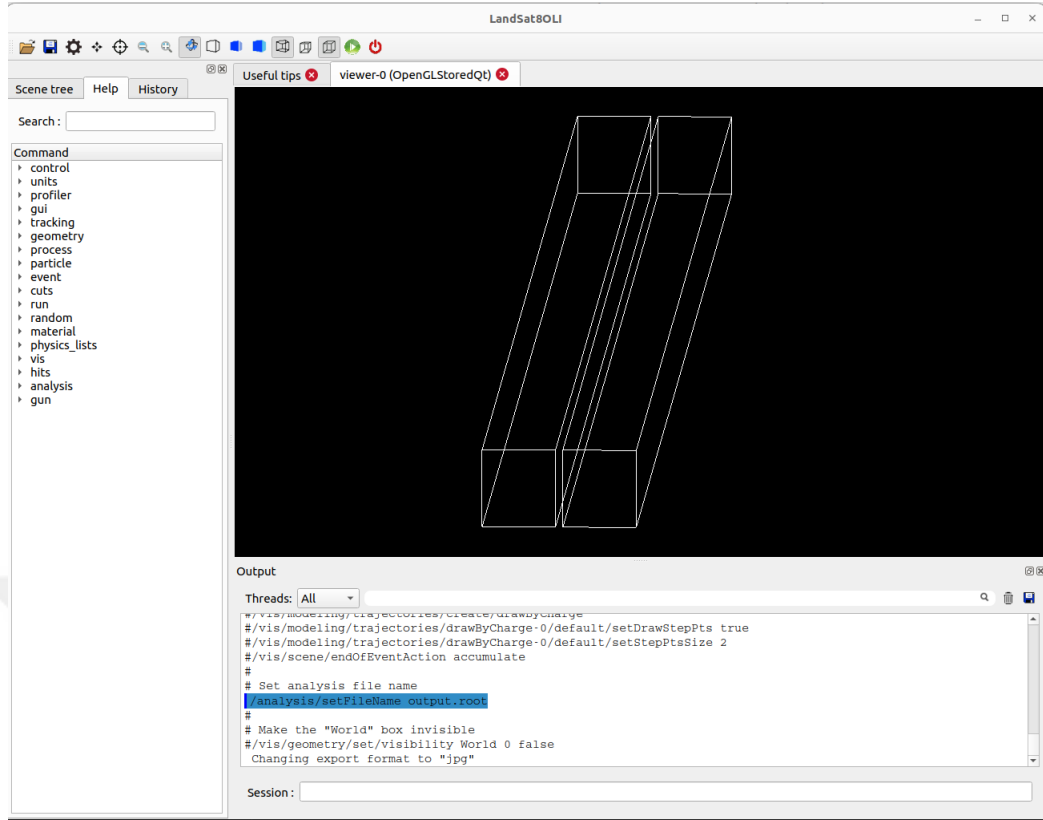
Elektron	
Enerji(MeV)	Adet
0.8	2.542×10^{12}
2	2.136×10^{11}
4	1.672×10^9

Çizelge 3.7. GOES-15 verileriyle üretilen fotonlar (Geant4 için kullanılmıştır). 03-2013 - 03-2020 tarihleri aralığında

Foton	
Enerji(eV)	7 yıl içerisinde toplam adet
5510.4	1.00×10^{11}
2755.2	2.605×10^{11}

analiz aşamasına kadar tüm süreci kapsayarak, kullanıcıların deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde etmelerini sağlar.

Bu çalışmada, GSD (Ground Sample Distance) denklemi kullanılarak elde edilen değerlerle dedektör boyutu belirlenmiştir. Bu işlem, hem SiPIN (Silicon PIN) dedektörü hem de MCT (Mercury Cadmium Telluride) dedektörü için gerçekleştirilmiştir. Dedektör boyutu, 494x14 piksel olarak literatürde mevcuttur. GSD denklemi ile elde edilen veri ile bu piksel boyutlarını çarparak dedektör hacmi bulunmuştur. Bu hesaplamalar, GEANT4 yazılımında dedektör oluşturulmasında tanımlanmıştır.



Şekil 3.1. Geant4 içerisinde dedektörlerin konumlanmaları

Simülasyon sürecinde, dedektör boyutları ve geometrisi GEANT4 içinde tanımlanmıştır. Bu adımda, dedektör hacmi, piksel boyutları ve malzemeleri belirlenmiştir. Ardından GEANT4 simülasyonunun çalıştırılması ve gerekli işlemlerin başlatılması için Run Manager ve Action Initialization sınıflarını tanımlanmıştır. Olayların işlenmesi ve dedektör duyarlılığının belirlenmesi için Event Action ve Sensitive Detector sınıfları oluşturulmuştur. Simülasyon sırasında kullanılacak fizik modellerini belirlemek için Physics List sınıfı tanımlanmıştır. Bu sınıf, parçacıkların madde ile etkileşimlerini modellemek için gerekli fizik süreçlerini içermektedir. Simülasyonun her adımında yapılacak işlemleri tanımlamak için Run Action ve Stepping Action sınıflarını oluşturulmuştur. Bu sınıflar, parçacıkların dedektördeki hareketlerini ve etkileşimlerini izlemek için kullanılmaktadır.

GEANT4 simülasyonunda kullanılan parçacıkları tanımlamak için Primary Generator sınıfı oluşturulmuştur. Bu çalışmada, GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) uydusundan elde edilen veriler kullanılarak parçacık tipi, enerjisi ve sayısı belirlenmiştir. GOES uydusundan elde edilen veriler CSV formatına dönüştürülüp GEANT4 simülasyonuna aktarılmıştır. CSV dosyasında, parçacık türü, enerjisi ve parçacık sayısı gibi bilgiler mevcuttur. Bu verileri okunarak, Primary Generator sınıfında tanımlanmıştır ve simülasyon sırasında parçacıkların dedektöre çarpmasını sağlanmıştır.

NIEL değerleri, belirli bir enerji aralığında parçacıkların malzemede oluşturduğu yer değiştirme hasarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Frenkel çiftleri, bir atomun yerinden çıkarılmasıyla oluşan boşluk (vacancy) ve bu boşluktan çıkarılan atomun ara konuma

yerleşmesiyle oluşan yapılardır. DPA (displacement per atom), malzemenin birim hacmi başına düşen yer değiştirme hasarının bir ölçüsüdür ve radyasyon hasarının derecesini belirlemede kullanılır.

Bu çalışmada, simülasyon sonuçlarının işlenmesi ve analiz edilmesi sürecinde, özellikle Frenkel çiftlerinin ve DPA değerlerinin hesaplanmasında NIEL (Non-Ionizing Energy Loss) değerlerinden faydalanılmıştır. Simülasyon verileri, GEANT4 simülasyon yazılımı kullanılarak elde edilmiş ve ROOT analiz yazılımı ile detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Öncelikle, belirli bir enerjiye sahip parçacıklar için NIEL değeri hesaplanır. Bu değer, parçacıkların malzeme içindeki enerjisini iyonlaşma dışı süreçlerle kaybetme oranını ifade eder. NIEL değerlerinin nasıl hesaplandığı 2. bölümde anlatılmıştır. Frenkel çiftlerinin sayısı, NIEL değerlerine ve malzemenin yer değiştirme enerjisi(displacement energy) eşğine bağlı olarak hesaplanır. Yer değiştirme enerjisi, bir atomun örgü atomları arasındaki yerinden çıkarılması için gereken minimum enerjidir.

$$\text{Frenkel çiftleri} = \frac{NIEL}{E_d} \quad (3.12)$$

NIEL buarada belli bir enerji aralığı için olan değeri temsil eder. E_d ise malzemenin yer değiştirme eşği enerjisi olup eV cinsinden verilir.

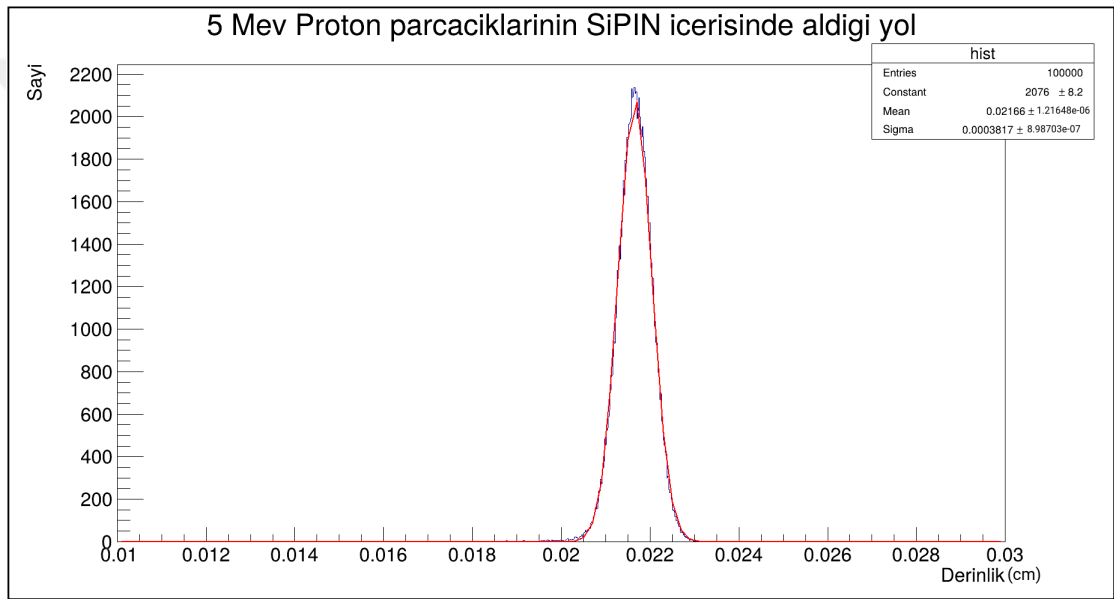
3.3.1. Simülasyonun Güvenilirlik Analizi

Yapılan çalışmanın güvenilirliğini doğrulamak için NIST kütüphanesinin içinde bulunan pstar, astar ve estar tablolarındaki verilerden faydalanılmıştır. Burada pstar proton için gerekli durdurma gücü tablolarını tutarken, estar elektron ve astar ise alfa parçacıkları için gerekli tabloları tutmaktadır. NIST veritabanı da bu hesaplamaları yaparken 0.5 MeV ve daha düşük enerjideki protonlar için deneysel verileri kullanırken daha yüksek enerjilerdeki protonlar için Bethe-Bloch formülünü kullanmaktadır. Aynı ayırım alfa parçacıkları için 2 MeV olarak belirtilmiştir. Aşağıda pstar web sitesinden alınan bir tablo örneği bulunmaktadır (Berger, Coursey, Zucker ve Chang 2017).

Yukarıdaki tabloda kinetik enerji (Kinetic Energy), gönderilen parçacığın enerjisini temsil etmektedir. Durdurma gücü (Stopping Power) $\frac{\text{MeV cm}^2}{\text{gr}}$ cinsinden verilmiştir. Durdurma gücünün alt başlıklarında ise elektronik (Electronic) nükleer (Nuclear) ve toplam (Total) olarak ayrılmıştır. Elektronik durdurma gücü, gönderilen parçacık ile hedef malzemenin yüklü parçacıkları arasındaki etkileşimler sonucu oluşan enerji kaybını temsil etmektedir. Nükleer durdurma gücü ise gönderilen ağır yüklü parçacığın hedef malzemenin atom çekirdekleri ile elastik çarpışması sonucu kaybettiği enerjiyi temsil etmektedir. toplam değeri ise elektronik ve nükleer durdurma gücünün toplamı olarak ifade edilmektedir. Menzil (Range) gönderilen parçacığın hedef malzeme içerisinde aldığı yolu göstermektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken gönderilen parçacığın hedef malzeme içerisinde doğrusal bir yol izlemediğidir. Menzilin alt başlıklarında ise Sürekli yavaşlama yaklaşımı menzili (Continuous Slowing Down Approximation Range - CSDA) gönderilen parçacığın doğrusal bir yol izlediği ve kademeli olarak enerji kaybettiği varsayımı ile

(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	1.050E+02	1.188E+01	1.169E+02	1.340E-05	3.558E-06	0.2655
1.500E-03	1.286E+02	1.072E+01	1.393E+02	1.728E-05	5.242E-06	0.3034
2.000E-03	1.485E+02	9.792E+00	1.583E+02	2.064E-05	6.906E-06	0.3346
2.500E-03	1.660E+02	9.040E+00	1.750E+02	2.364E-05	8.532E-06	0.3609
3.000E-03	1.818E+02	8.416E+00	1.903E+02	2.638E-05	1.012E-05	0.3837
4.000E-03	2.100E+02	7.436E+00	2.174E+02	3.128E-05	1.319E-05	0.4217
5.000E-03	2.348E+02	6.695E+00	2.414E+02	3.564E-05	1.613E-05	0.4526
6.000E-03	2.572E+02	6.111E+00	2.633E+02	3.961E-05	1.895E-05	0.4785
7.000E-03	2.778E+02	5.636E+00	2.834E+02	4.326E-05	2.166E-05	0.5007
8.000E-03	2.969E+02	5.240E+00	3.022E+02	4.668E-05	2.427E-05	0.5200
9.000E-03	3.150E+02	4.905E+00	3.199E+02	4.989E-05	2.680E-05	0.5371
1.000E-02	3.320E+02	4.615E+00	3.366E+02	5.294E-05	2.924E-05	0.5523
1.250E-02	3.646E+02	4.039E+00	3.686E+02	6.002E-05	3.508E-05	0.5845
1.500E-02	3.925E+02	3.607E+00	3.961E+02	6.656E-05	4.065E-05	0.6108
1.750E-02	4.167E+02	3.267E+00	4.199E+02	7.268E-05	4.598E-05	0.6327
2.000E-02	4.378E+02	2.993E+00	4.408E+02	7.849E-05	5.113E-05	0.6514
2.250E-02	4.563E+02	2.767E+00	4.591E+02	8.404E-05	5.611E-05	0.6677

Şekil 3.2. Pstar'dan alınmış bir tablo örneği



Şekil 3.3. 5 MeV proton parçacıklarının SiPIN içerisinde aldığı yol(Geant4 ile oluşturulmuştur)

hesaplanmaktadır. Öngörülen (Projected) menzil ise gönderilen parçacığın malzeme içerisindeki başlangıç konumu ile son konumu arasındaki mesafeyi göstermektedir. Yoldan sapma faktörü (Detour factor) ise idealize edilmiş CSDA menziline öngörülen doğrusal menzilden ne kadar sapıldığını göstermektedir.

Aşağıdaki histogram Geant4 simülasyonu ile elde edilen verilerden oluşturulmuştur. Histogramı oluşturmak için 5 MeV enerjili 100.000 parçacık gönderilmiştir. Gönderilen parçacıkların hacim içerisinde Z pozisyonunda aldığı yol görülmektedir.

Şekilde görüldüğü üzere gönderilen parçacıkların Z düzleminde aldığı yolun ortalama değerinin (Mean) 0.02166 cm olduğu görülmektedir. Bu değer doğruluğunu kontrol etmek için pstar'dan aldığımız yine silikon malzeme içerisinde 5 MeV enerjili parçacık için üretilmiş öngörülen menzil değerinden faydalanılmıştır. Simülasyondan aldığımız değer santimetre (cm) cinsinden verilmektedir ancak pstar'dan alınan öngörülen menzil değeri

$\frac{g}{cm^2}$ olarak verilmiştir. Öngörülen değerden yine cm değeri elde edebilmek için öngörülen menzil değerini hedef malzemenin yoğunluğuna böleriz. Aşağıda 3.3 daki ortalama değer için örnek hesaplama verilmiştir.

Pstar'dan alınan 5 MeV enerjili protonun, silikon içerisinde öngörülen menzil değeri: $5.041 \times 10^{-2} \frac{g}{cm^2}$ Geant4 içerisinde silikonun yoğunluk değeri : $2.33 \frac{g}{cm^3}$

$$\frac{5.041 \times 10^{-02}}{2.33} = 0.02163cm$$

olarak bulunur. Bu değeri Geant4'ten aldığımız değerle karşılaştırdığımızda uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da bize yapılan simulasyonun güvenilirliği hakkında bilgi sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

GEANT4 simülasyon yazılımı kullanılarak SiPIN ve MCT dedektörlerinin radyasyon hasarına karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, dedektörlerde radyasyon hasarının olup olmadığını ve varsa bunun anlamlı olup olmadığını değerlendirmektedir. Ayrıca, bu veriler 7 yıllık radyasyon maruziyetine dayandığı için, dedektörlerin 7 yıl boyunca ne kadar hasara uğrayacağını bir tahminini de sunmaktadır. Geant4 ile simülasyon oluşturmak bilgisayar üzerinde ciddi anlamda kaynak kullanımı gerektirmektedir. Kaynak kullanıma bağlı sıkıntılar sebebi ile karmaşık sistemleri çalıştırmak zordur. Bu zorluklardan ötürü simülasyon üzerinde çalışırken bazı basitleştirmelere gitme gerekliliği doğar. Normalde dedektör hacmi bir çok dedektörden ve buna bağlı piksellerden oluşan bir yapı iken bu çalışmada iki tipten de birer dedektör hacmi kullanılmış ve pikseller bir bütün olarak düşünülmüştür. Geant4 güçlü bir yazılım olması dolayı ile her bir pikseli ayrı ayrı ele almak ona göre düzenlemeler yapmak mümkündür ancak ciddi anlamda bir kaynak kullanımı gerektirir. Bu sebeble basitleştirmelere gitmek hem kaynak kullanımını azaltır hemde gereken bilgiyi bize sağlamış olur. Foton ve elektron için alınan verilerdeki enerji aralıklarında simülasyon sonucunda çok katmanlı izolasyonu geçebilen bir parçacık olmadığı için dedektöre isabet etmemiştir. Bu sebepten dolayı o değerler için ayrı tablolar oluşturulmamış sadece alfa parçacıklarından 16.1 MeV enerjili olanı dedektöre gelen veri olmadığını göstermek adına konulmuştur.

Çizelge 4.1. Silikon dedektör için alfa parçacıkları ile elde edilen değerler

Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi (MeV)
16.1	0.00	0.00	0.00
41.2	1,649	0.0648	1,047.07
120	3.333×10^8	19,729.73	2.251×10^8
210	2.536×10^8	10,286.87	2.583×10^8
435	1.220×10^8	7,217.45	7.198×10^7
2980	9.561×10^7	5,716.03	2.722×10^7
3400	4.946×10^{10}	3.418×10^6	1.931×10^{10}

Gelen parçacıkların ne kadar frenkel çifti oluşturduğu, iyonize ve iyonize olmayan enerji emilimleri ve gray cinsinden dedektörün aldığı toplam doz değeri hesaplanmıştır. Önceden bahsedildiği üzere silikonunun kristal yapısını bozacak olan asıl bileşen iyonize olmayan enerji emilimine bağlıdır. Silikon dedektör için daha önceki çalışmalarda hasar mekanizması ve ne kadar hasarın kusura yol açacağı ile ilgili bilgiler vardır. Ancak HgCdTe (MCT) dedektörü için bu değerler belirli değildir. Ayrıca silikon dedektörü tek atomlu bir sistem olarak varsayılabilir (Katkı atomlarının miktarı yoksayılabilir). HgCdTe dedektörü ise 3 farklı atomdan oluştuğu için benzer hesaplamaları yapmak daha zordur. Bu çalışma altında frenkel çiftlerinin hesaplaması HgCdTe dedektör içinde yapılmıştır. Ancak 1 MeV nötron eşdeğer akısı hesaplanamamıştır. Gerekli veriler bulunduğu takdirde 1 MeV nötron eşdeğer akısı da hesaplanabilir.

Toplam enerji emilim değerleri kullanılarak dedektörün aldığı Gray dozu hesaplanabilir. Joule birimine çevrilen MeV değerleri dedektör kütlesine bölünerek aldığı doz Gray

Çizelge 4.2. Silikon dedektör için nötronlar ile elde edilen değerler

Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi (MeV)
1	826,161	45.13	66,929.95
2	60,667	3.66	5,647.94
3	125,404	7.36	5,360.17
4	75,857	4.40	3,029.53
5	148,482	8.48	4,609.19
6	602,703	35.92	4,350.24
7	1.446×10^6	85.66	4,366.83
8	2.412×10^6	143.79	5,170.22
9	2.734×10^6	162.43	6,316.74
10	3.707×10^6	224.35	70,89.91
11	4.381×10^6	209.66	7,817.69
12	5.839×10^6	348.66	14,366.64
13	6.688×10^6	407.49	71,556.95
14	7.157×10^6	434.63	96,891.68
15	8.175×10^6	491.67	107,787.61

cinsinden bulunmuş olur.

$$\text{Doz (Gy)} = \frac{\text{Enerji emilimi (J)}}{\text{Dedektör kütlesi (kg)}} \quad (4.1)$$

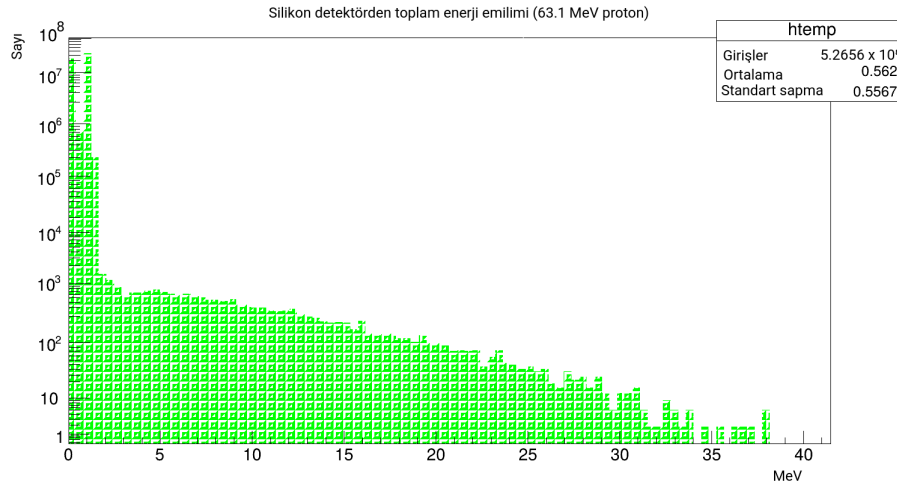
$$1\text{MeV} = 1.6021810^{-13}\text{Joule} \quad (4.2)$$

Her farklı parçacık tipi ve farklı enerji için simülasyon çalıştırılmış olup alınan veriler Şekil 4.1'daki gibi görselleştirilebilmektedir veya istenirse gerekli veriler alınıp diğer yazılım araçları ile görselleştirme yapılabilir.

Çizelge 4.3. Silikon dedektör için protonlar ile elde edilen değerler

Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi (MeV)
11.6	855,955	74.71	66,612.06
30.6	6.715×10^8	39,415.63	3.794×10^8
63.1	2.314×10^9	133,750.55	2.959×10^8
165	1.385×10^9	68,528.82	1.806×10^8
375	2.214×10^8	14,915.24	7.691×10^7
433	8.073×10^8	47,979.57	1.506×10^8
465	2.285×10^8	13,562.16	4.017×10^7
605	1.377×10^8	8,225.57	2.113×10^7
700	5.333×10^7	3,163.27	7.650×10^6

Dedektörlerin ara ara ısı değişimlerine maruz kaldığını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Isı değişimleri, dedektörlerde oluşan Frenkel kusurlarını giderebilir ve ka-



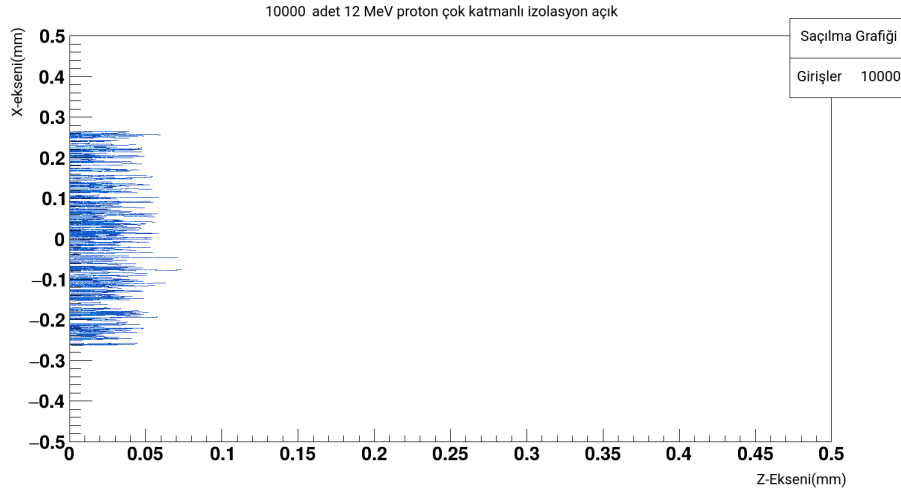
Şekil 4.1. 63.1 MeV enerjili parçacıkların silikon dedektörden emilim miktarı (Geant4 ile oluşturulmuştur).

rarlı kusurların sayısını azaltabilir (Hartmann 2017). Bu durum, dedektörlerin radyasyon hasarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Aynı zamanda burada bulunan frenkel değerlerinin kalıcı kusur oluşturacağına yönelik kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Frenkel kusurları olduğu gibi bir sebeple rekombinasyona maruz kalabilir. Bu sebeple kusurların kalıcı kusur olması önem arz eder.

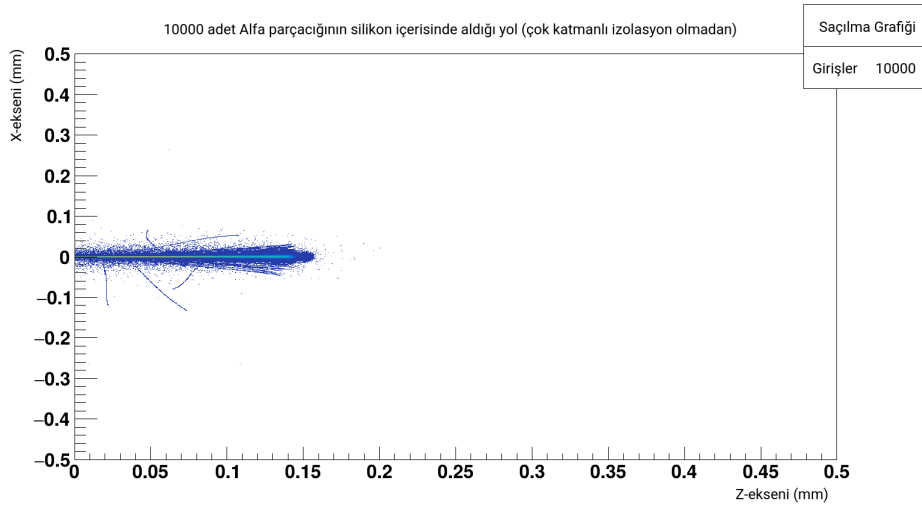
Şekil 4.2 da görüldüğü gibi 12 MeV altındaki enerjilerde bulunan protonların geçişi çok katmanlı izolasyon tarafından engellenebilmektedir. Farklı parçacık tipleri için farklı enerjilere kadar koruma sağlamaktadır. Alfa parçacıkları için 40 MeV'a kadar olan enerjideki parçacıklardan bir geçiş gözlenmemiştir. Aynı şekilde verilerde bulunan enerjilerdeki foton ve elektron içinde geçiş gözlenmemiştir.

Multi Layer Insulation (MLI), mevcut dedektörler için ek bir koruma sağlayarak daha güvende olmalarını sağlar. MLI gibi koruyucu katmanlar, uyduların radyasyondan daha az etkilenmesine yardımcı olabilir. MLI, genellikle uzay araçlarında ve uydularda kullanılır, birden fazla katmandan oluşan bir yalıtım malzemesidir. Bu katmanlar, termal kontrol sağlamakla birlikte, radyasyonun malzemelere nüfuz etmesini de engelleyerek dedektörlerin ve uydunun genel performansını ve dayanıklılığını artırır. Bu nedenle, uyduların MLI ile kaplanması, uzun vadeli uzay görevlerinde ve yüksek radyasyon ortamlarında daha az hasar görmelerini sağlayarak, genel performanslarını ve güvenilirliklerini artırır.

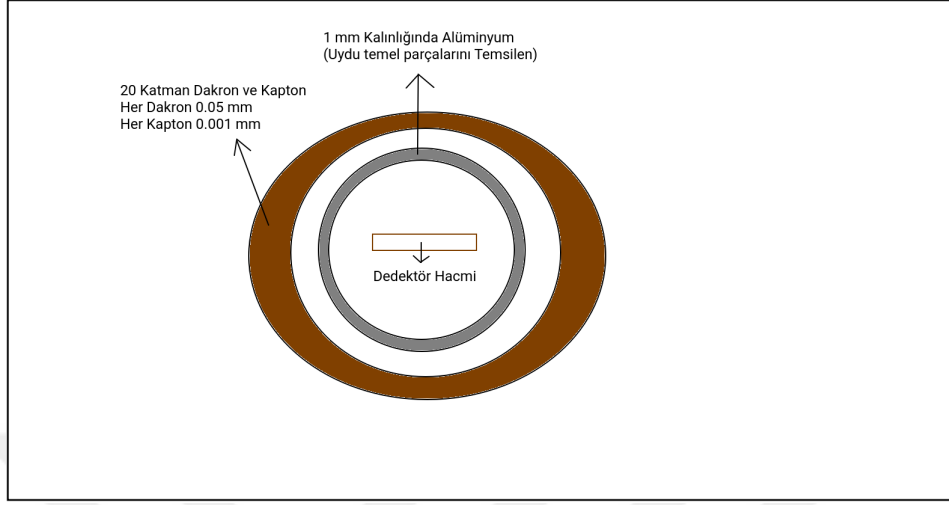
GOES ve Landsat-8 yörüngeleri ele alındığında GOES yere yöre daha yüksekte olduğundan güneşten gelen daha fazla parçacık tarafından etkilenir. Kullanılan verilerin 7 yıllık bir toplam olması nedeniyle uydu ömrü konusunda bize bir fikir verebilir. Bununla birlikte başka sebeplerden ötürü emekliye ayrılması ise gayet olası bir sebeptir. Sonuçta radyasyondan etkilenen tek ekipman dedektörler değildir. Bu çalışma gerçek uydu verileri kullanılması yönünden özgündür. Gerçek radyasyon koşullarının simüle edilerek dedektördeki değişiklikleri görmek ve ne kadar radyasyon hasarına maruz kaldığını bilmek gelecekte gönderilecek uydular için önem arz eder.



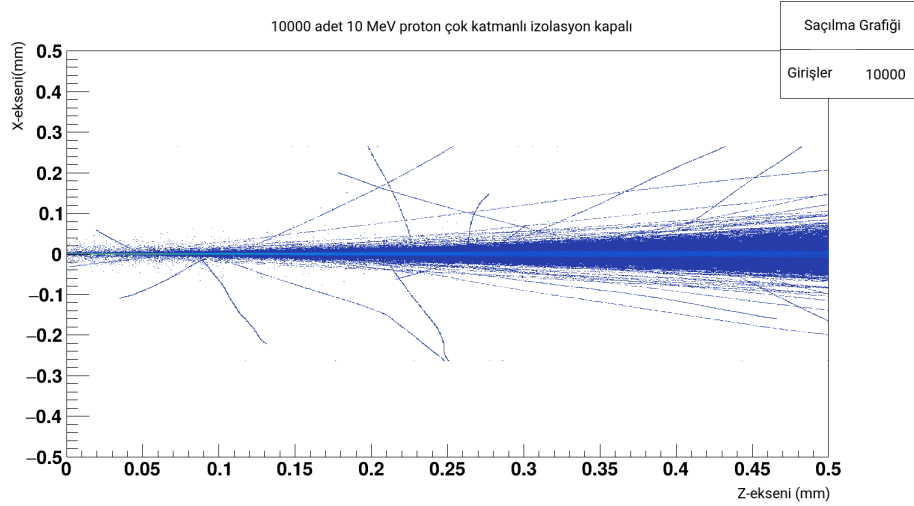
Şekil 4.2. 10000 adet 12 MeV enerjili protonların çok katmanlı izolasyon ile SiPIN detektör içerisinde seyrettiği yol



Şekil 4.3. 10000 adet 16.1 MeV enerjili alfa parçacığının silikon detektör içerisinde seyrettiği yol (çok katmanlı izolasyon olmadan)



Şekil 4.4. Simulasyon içerisinde kullanılan malzemelerin kesit olarak gösterimi

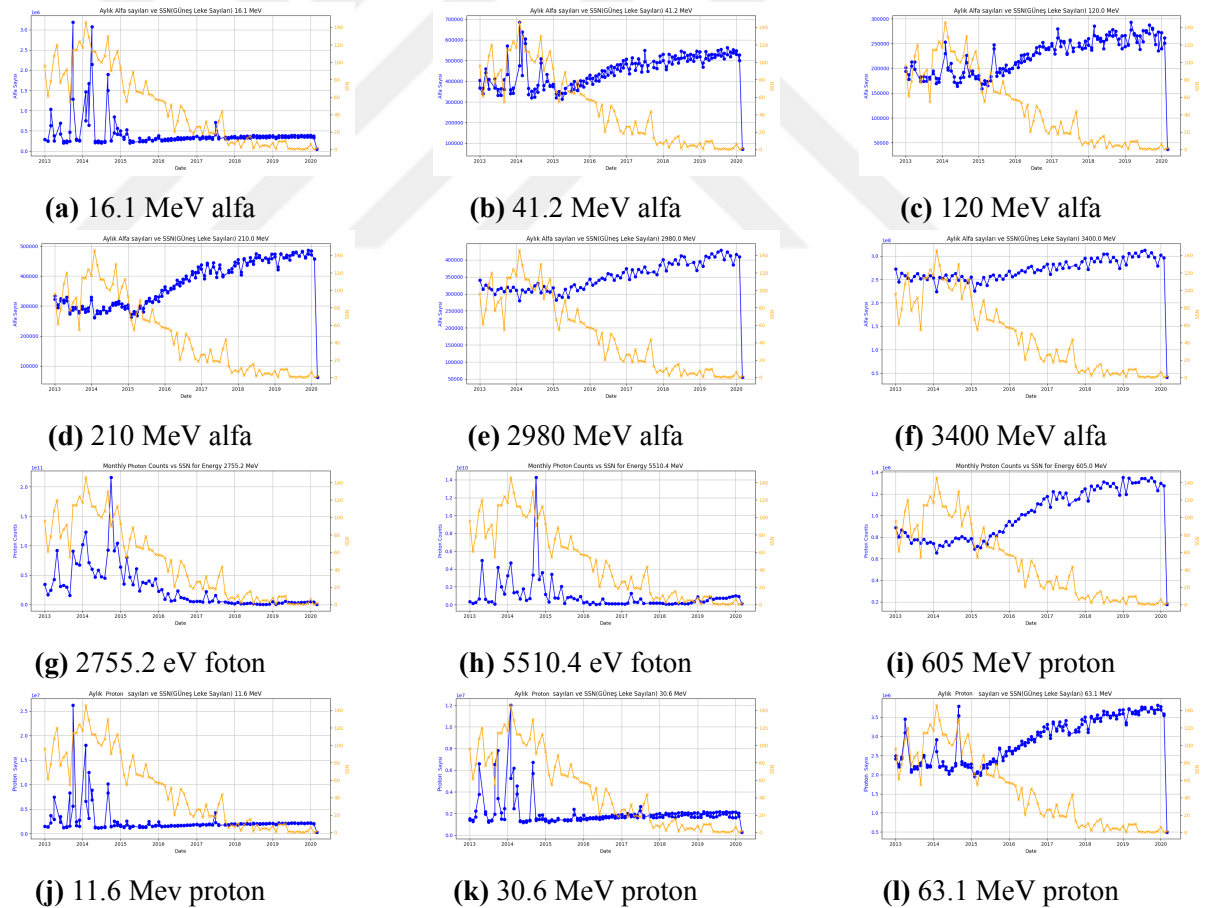


Şekil 4.5. 10000 adet 10 MeV enerjili protonların çok katmanlı izolasyon olmadan SiPIN detektör içerisinde seyrettiği yol

Landsat-8'in fırlatılmasından yaklaşık 2 yıl sonra yapılan bir çalışmada Morfitt, J. Barsi, Levy, B. Markham, Micijevic, Ong, Scaramuzza ve Vanderwerff 2015 OLI dedektörünün yörüngedeki performansını değerlendiren bir grup şunları yazmıştır.

1. OLI'den elde edilen dedektörden gelen örnekler 12 bit çözünürlüğündedir. Bu yüksek bit çözünürlüğü, verinin yansımadaki çok ince farklılıkları yakalayabilmesini sağlar, bu da düşük gürültü seviyesi ve yüksek dinamik aralık (dedektörün yakalayabileceği en karanlık ve en parlak sinyal aralığı) anlamına gelir.
2. Yüksek ve dinamik aralık, düşük gürültü seviyeleri, yüksek bir SNR(Signal Noise Ratio) ile sonuçlanır. Bu, OLI'nin daha net ve daha kesin görüntüler yakalayabileceği anlamına gelir.

Landsat-8'de Kullanılan OLI ve TIRS ekipmanı performanslarından dolayı bir kaç ufak değişiklikle birlikte (OLI-2 ve TIRS-2) Landsat-9 görevinde kullanılmak üzere tekrar üretilmiş ve yörüngeye gönderilmiştir.



Şekil 4.6. GOES uydusundan alınan bazı veriler mavi renkte, Güneş leke sayısı ise sarı renkte gösterilmiştir (Aylık). 2013-2020 aralığındaki değerleri kapsamaktadır

4.1. Nötron Akısı Eşdeğeri

Yüksek enerjili parçacıkların bir malzemenin hacminde yol açtığı hasar etkileri, genellikle yer değiştirme hasarı kesiti (displacement damage cross section) olarak adlandırılan bir büyüklükle orantılı olarak tanımlanabilmektedir. Bu büyüklük, iyonize olmayan enerji kaybı (NIEL) ile eşdeğer kabul edilmektedir. Dolayısıyla, NIEL değeri ile hasar etkileri arasındaki bu orantı, literatürde NIEL-ölçekleme hipotezi (NIEL scaling hypothesis) olarak geçmektedir. Ancak, bu hipotezde sapmalar olabileceği de unutulmamalıdır. Yer değiştirme hasarı kesiti, genellikle MeVmb cinsinden ölçülürken, NIEL değeri keVcm²/g biriminde ifade edilmektedir (Vasilescu ve Lindstroem 2000). Özellikle silikon için ($A = 28.086$ g/mol) yer değiştirme kesiti ile NIEL arasında şu ilişki bulunmaktadır: $100\text{MeVmb} = 2.144\text{keVcm}^2/\text{g}$ NIEL veya yer değiştirme kesiti, parçacığın tipine ve enerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Hartmann 2017'nin yazdığına göre 1 MeV nötronun yer değiştirme hasarı tesir kesiti silikon için 95MeV mb/cm^2 olarak verilmektedir. Aynı makalede Hartmann 2017 ne kadarlık bir nötron akısının nasıl bir hasar vereceğini belirtmiştir. Buna göre:

1. $10^{14}\text{n}_{1\text{MeV/cm}^2}$ Asıl sorun sızıntı akımındaki artıştır.
2. $10^{15}\text{n}_{1\text{MeV/cm}^2}$ Tükenim voltajı yükselmektedir.
3. $10^{16}\text{n}_{1\text{MeV/cm}^2}$ ana problem yük toplama verimliliğidir.

Buradan $95\text{MeVmb} = 2.0368\text{keV cm}^2/\text{g}$ olarak bulunur.

Önceki bölümlerde dedektör yüzey alanı hesaplaması yapılmıştır. dedektör kalınlığında 0.5 mm olduğu göz önüne alındığında dedektör hacmi 0.0047138cm^3 ve dedektör ağırlığı 0.010983154gram olarak bulunur. Geant4 benzetimi ile dedektör içerisindeki iyonize olmayan enerji Emilimi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Simulasyon sonucunda elde edilen değerler.

Dedektör	Frenkel çiftleri(adet)	İyonize olmayan enerji Emilimi(NIEL)	Doz(Gray)
SiPIN	5.613×10^{10}	3.793×10^6	307.1
MCT	1.781×10^{12}	1.122×10^8	228.4

Buradan yola çıkılarak 1 MeV nötron akısı cinsinden toplam akı hesaplanmak istenirse (Silikon dedektör için):

$$\text{Kütle başına NIEL} = \frac{\text{Toplam NIEL}}{\text{Kütle}} = 3.454 \times 10^{13}\text{keV/g} \quad (4.3)$$

$$\phi_{eq} = \frac{3.454 \times 10^{13}\text{keV/g}}{2.0368\text{keV cm}^2/\text{g}} = 3.454 \times 10^{11}\text{nötron1MeV/cm}^2 \quad (4.4)$$

Yukarıdaki sonuç kaba bir yaklaşım sunmaktadır. Detaylı bir sonuç istenirse her farklı parçacık için her enerjide o parçacık için olan ağırlık faktörü kullanılarak işlem tekrar yapılabilir.

$$k_{\text{ağırlık faktörü}} = \frac{D_{\text{parçacık}}}{Dn(1\text{MeVnötron})} \quad (4.5)$$

Sonrasında ise ağırlık faktörü parçacık akısı ile çarpılarak 1 MeV nötron eşdeğer akısı elde edilir.

Çizelge 4.5. HgCdTe dedektör için protonlar ile elde edilen değerler

Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi(MeV)
11.6	3.357×10^6	151.08	67,641.02
30.6	7.142×10^8	44,879.6	6.626×10^8
63.1	4.282×10^9	265,814.74	5.268×10^8
165	9.958×10^9	627,306.7	3.361×10^8
375	8.640×10^9	546,596.71	1.481×10^8
433	1.891×10^{10}	1.194×10^6	2.917×10^8
465	5.395×10^9	341,762.41	7.993×10^7
605	3.533×10^9	223,428.78	4.156×10^7
700	1.384×10^9	87,743.93	1.511×10^7

Çizelge 4.6. HgCdTe dedektör için nötronlar ile elde edilen değerler

Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi(MeV)
1	993,342	57.22	22,881.78
2	121,900	7	1,581.48
3	101,887	5.85	1,236.4
4	91,248	5.25	981.95
5	122,141	7.06	1,047.02
6	116,334	6.75	1,033.75
7	179,203	10.54	1,057.75
8	340,570	20.25	1,123.15
9	449,496	26.83	1,184.76
10	607,130	36.36	1,253.27
11	663,166	39.79	1,479.04
12	1.196×10^6	71.21	7,577.62
13	2.143×10^6	127.82	60,992.04
14	2.712×10^6	161.75	86,459.33
15	3.193×10^6	191.36	99,173.31

Çizelge 4.7. HgCdTe dedektör için alfa parçacıkları ile elde edilen değerler

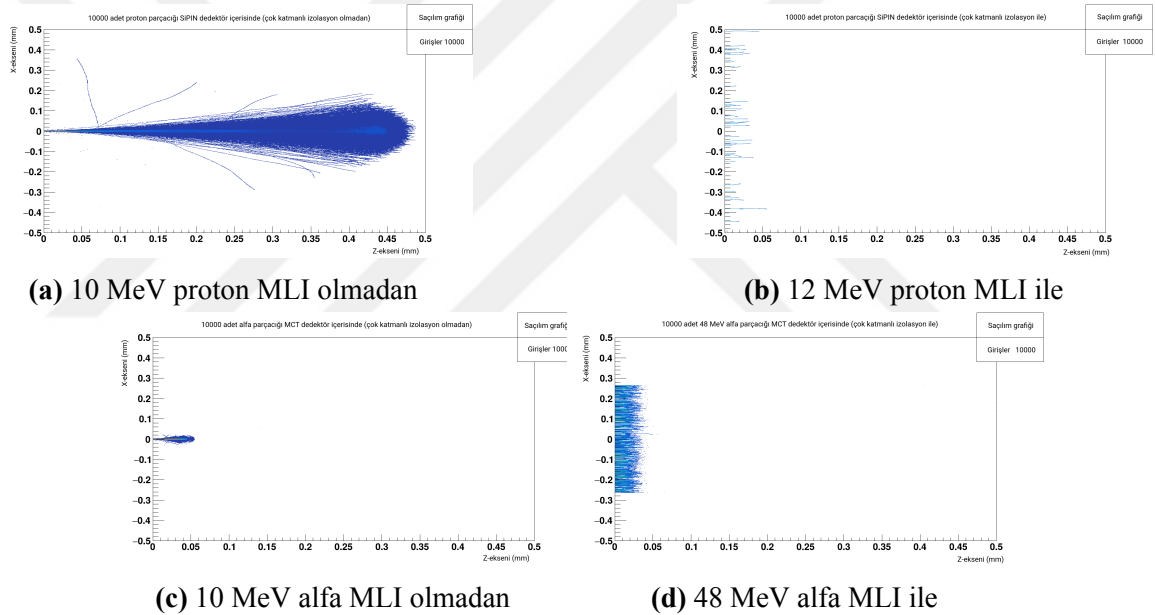
Enerji (MeV)	Frenkel	NIEL (MeV)	Toplam enerji emilimi(MeV)
16.1	0.00	0.00	0.00
41.2	0.00	0.00	0.00
120	2.722×10^9	173,486.58	3.320×10^8
210	5.490×10^9	350,103.7	4.652×10^8
435	2.536×10^9	161,319.98	1.317×10^8
2980	2.296×10^9	144,607.13	5.518×10^7
3400	1.715×10^{12}	1.080×10^8	4.055×10^{10}

MCT detektörü için ise Sun, Abshire, Laurnstein, Sullivan, Beck ve Hubbs 2018 'de belirtildiği gibi 100 krad'lık bir doz değerine ulaşılmamış olduğu için dedektörde kusur olmadığı varsayılabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada GEANT4 simülasyonları kullanılarak SiPIN ve MCT dedektörlerinin radyasyon hasarına karşı dayanıklılığı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, dedektör performansını optimize etmek ve radyasyon dayanıklılığını artırmak için önemli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca bu sonuçların 7 yıllık bir radyasyon maruziyetine dayanması, dedektörlerin uzun vadeli dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Atom başına yer değiştirme (DPA) ile elde edilen frenkel sayılarının toplam hacimdeki atom sayısına bölünmesi ile elde edilir. Bu değerde malzemelerin radyasyon dayanıklılığı hakkında bilgi sağlamaktadır. Söz konusu dedektörlerin hacimleri ve yoğunlukları bilindiği için (silikon = 2.33g/cm^3 , MCT = 6.5g/cm^3) Avogadro sayısı ile çarpımı sonucunda toplam atom sayısı miktarı kolaylıkla bulunabilmektedir. Böylelikle radyasyon dayanıklılığı konusunda başka bir perspektiften de yararlanılabilir.



Şekil 5.1. MCT dedektörü için saçılım grafikleri

Silikon dedektörü için elde edilen 1 MeV nötron akısı eşdeğerine göre, Hartmann 2017’de belirtilen nötron akısı eşiğine ulaşılmamış olup, bu dedektörde kusur olmadığı varsayılabilir. Belirtilen nötron akısı eşiği 10^{14} ’ten başlamakta olup, yapılan çalışma sonucu elde edilen değer 3×10^{11} seviyesindedir. Aşırı (ekstrem) durumlar göz ardı edildiğinde (Güneş patlamaları, solar fırtınalar vb.), dedektörün sadece radyasyon kaynaklı olarak hasar alması için geçmesi gereken süre yaklaşık olarak ≈ 2333 yıldır.

MCT dedektörü için ise akı değerleri verilmediğinden dolayı, aynı varsayım kabul edilemez. Bununla birlikte, Sun, Abshire, Laurnstein, Sullivan, Beck ve Hubbs 2018’de, 100 krad’a kadar MCT dedektöründe bir kusura rastlanmadığı ifade edilmiştir. Bu çalışma içerisinde MCT dedektörü için hesaplanan toplam doz 228.4 gray olup, 22,840 rad’a ve dolayısıyla ≈ 22.8 krad’a karşılık gelir. Yine aşırı durumlar göz ardı edildiğinde, dedektörün

törün sadece radyasyon kaynaklı hasar alması için geçmesi gereken süre yaklaşık olarak ≈ 30 yıldır.

Frenkel çiftlerinin oluşumu kadar rekombinasyon ile kusurların kaybolması da incelemesi gereken bir konudur. Hangi şartlar altında, ne hızla kusurların düzeldiğini bilmek, anlık dedektör sağlığı hakkında bilgi sağlayacaktır.

Gelecek çalışmalarda, daha farklı enerji aralıkları, parçacık türleri ve farklı tipteki dedektörler ile simülasyonlar yapılarak sonuçların genel geçerliliği artırılabilir. Ayrıca deneysel verilerle simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması, model doğruluğunu ve güvenilirliğini arttırmak için önemlidir. Bu tür çalışmalar, dedektörlerin radyasyon dayanıklılığını arttırmak ve performanslarını optimize etmek için yol gösterici olacaktır. Kullanılacak verilerin Simule edilen uydunun yörüngesine yakın olması bu konuda daha iyi fikir verecektir. Sonuç olarak dünya manyetosferi enerjik parçacıkları etkilemektedir. Kullanılacak verilerin de bu seviyeye yakın veriler olması doğruluğu daha da arttıracaktır. Bunun yanı sıra deneylerle kolay karşılaştırma yapılabilmesi için simülasyonda elektrik alan oluşturulması ve bu alandaki sızıntı akımı gibi değerlerinde takip edilmesi, karşılaştırmaları kolaylaştıracak ve önemli bilgiler sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Akkerman, A., J. Barak, M. B. Chadwick, J. Levinson, M. Murat ve Y. Lifshitz (2001). *Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and gamma-rays in Si and GaAs*. DOI: 10.1016/S0168-583X(00)00794-7.
- Berger, M. J., J. S. Coursey, M. A. Zucker ve J. Chang (2017). *Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*. NIST Standard Reference Database 124. Updated by: S. M. Seltzer and P. M. Bergstrom, NIST, Physics Laboratory. National Institute of Standards ve Technology (NIST). URL: <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>.
- Chen, Yaolin, Hongxia Liu, Tianzhi Gao ve Hao Wei (2023). ?Simulation of the Irradiation Cascade Effect of 6H-SiC Based on Molecular Dynamics Principles? İçinde: *Micro-machines* 14.2. Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/>), s. 455. DOI: 10.3390/mi14020455. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14020455>.
- Cloudsley, M. S., J. W. Wilson, J. L. Shinn, F. F. Badavi, J. H. Heinbockel ve W. Atwell (2000). ?Neutron Environment Calculations for Low Earth Orbit? İçinde: Paper Number 01ICES-2327.
- Finckenor, M. M. ve D. Dooling (Nis. 1999). *Multilayer Insulation Material Guidelines*. NASA Technical Report 19990047691. Marshall Space Flight Center, Alabama: National Aeronautics ve Space Administration (NASA), Marshall Space Flight Center. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990047691/downloads/19990047691.pdf>.
- G3 Watch 6 and 7 September 2017 Due to CME Arrival* (2017). Son erişim: 18.08.2024. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/news/g3-watch-6-and-7-september-2017-due-cme-arrival>.
- Geant4 Collaboration, Book for Application Developers, Release 11.1 Rev7.0* (2022).
- GOES Space Environment Monitor* (2024). son erişim: 08 Sep 2024. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>.
- GOES-N Series Data Book (Rev. D)* (2009). Maryland, USA: NASA Goddard Space Flight Center.
- Hanslmeier, A. (2002). *The Sun and Space Weather*. Ed. W. B. Burton, J. M. E. Kuijpers ve E. P. J. Van Den Heuvel. C. 277. Astrophysics and Space Science Library. Springer.
- Hartmann, Frank (2017). *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Second Edition. C. 271. Springer Tracts in Modern Physics. Library of Congress Control Number: 2017949127. Karlsruhe, Germany: Springer International Publishing AG. ISBN: 978-3-319-64434-9. DOI: 10.1007/978-3-319-64436-3.
- Irons, J. R., J. L. Dwyer ve J. A. Barsi (2012). *The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission*.
- Kılçık, A. ve B. Dönmez (2024). *Kişisel iletişim*.
- Kılıç, A. (2012). *Radyasyonun Yüksek Enerji Dedektörlerine Etkisi*. Doktora Tezi, Prof. Dr. Emin N. Özmutlu (Danışman). Uludağ üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Bursa.
- Kinchin, G. H. ve R. S. Pease (1955). ?The Displacement of Atoms in Solids by Radiation? İçinde: *Reports on Progress in Physics* 18. Downloaded from IOPscience on 28 April

- 2013, ss. 1–29. DOI: 10.1088/0034-4885/18/1/301. URL: <http://iopscience.iop.org/0034-4885/18/1/301>.
- Knight, E. J. ve G. Kvaran (2014). *Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance*. DOI: 10.3390/rs61110286.
- Konobeyev, A.Yu., U. Fischer, Yu.A. Korovin ve S.P. Simakov (2017). ?Evaluation of effective threshold displacement energies and other data required for the calculation of advanced atomic displacement cross-sections? İçinde: *Nuclear Energy and Technology* 000. Available online at www.sciencedirect.com, ss. 1–7. URL: www.elsevier.com/locate/nucet.
- Levy, R., J. Barsi, B. Markham, P. Dabney, P. Scaramuzza, E. Micijevic ve F. Pesta (2014). *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) detector-to-detector uniformity challenge and performance*. DOI: 10.1117/12.2063164.
- Lindhard, J., V. Nielsen, M. Scharff ve P. V. Thomsen (1963). ?Integral Equations Governing Radiation Effects? İçinde: *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 33.10.
- Liu, Yang, Tengfei Zhu, Jianxi Yao ve Xiaoping Ouyang (2019). ?Simulation of Radiation Damage for Silicon Drift Detector? İçinde: *Sensors* 19.8. Published: 13 April 2019, Accessed: 13-Oct-2024, s. 1783. DOI: 10.3390/s19081783. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1783>.
- Markham, B. L., E. J. Knight, B. Canova, E. Donley, G. Kvaran, K. Lee, J. A. Barsi, J. A. Pedelty, P. W. Dabney ve J. R. Irons (2012). *The Landsat Data Continuity Mission Operational Land Imager (OLI) Sensor*.
- Morfitt, R., J. Barsi, R. Levy, B. Markham, E. Micijevic, L. Ong, P. Scaramuzza ve K. Vanderwerff (2015). *Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Radiometric Performance On-Orbit*. DOI: 10.3390/rs70202208.
- National Institute of Standards and Technology (2024). *PSTAR: Stopping Power and Range Tables for Protons*. Son erişim: 2024-09-08. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>.
- Nordlund, Kai ve diğ. (2015). *Primary Radiation Damage in Materials: Review of Current Understanding and Proposed New Standard Displacement Damage Model to Incorporate in Cascade Defect Production Efficiency and Mixing Effects*. Paris, France: Organisation for Economic Co-Operation ve Development (OECD), Nuclear Energy Agency (NEA).
- Norgett, M. I., M. T. Robinson ve I. M. Torrens (1975). *A proposed method of calculating displacement dose rates*.
- Pesta, Frank, Suman Bhatta, Dennis Helder ve Nischal Mishra (2015). *Radiometric Non-Uniformity Characterization and Correction of Landsat 8 OLI Using Earth Imagery-Based Techniques*. DOI: 10.3390/rs70100430.
- Stabile, A. (2008). *Design methodologies for radiation-hardened memories in CMOS technology*. Doktora Tezi., Università degli Studi di Milano, Milano, Italy.
- Sun, Xiaoli, James B. Abshire, Jean-Marie Larnstein, William III Sullivan, Jeff Beck ve John E. Hubbs (2018). *Evaluation of Space Radiation Effects on HgCdTe Avalanche Photodiode Arrays for Lidar Applications*. Presented at NASA Goddard Space Flight Center, Codes 698, 690, and 561, Greenbelt MD 20771 USA; Leonardo DRS Electro-Optical Infrared Systems, Dallas, TX 75374 USA; Ball Aerospace & Technologies Corp./Air Force Research Lab., Albuquerque, NM 87185 USA.

- Turner, J.E. (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN: 978-3-527-40606-7.
- Valenzuela, A. Q. ve J. C. G. Reyes (2019). *Basic spatial resolution metrics for satellite imagers*. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2902512.
- Vasilescu, A. ve G. Lindstroem (2000). *Displacement damage in silicon, on-line compilation*. RD50 Collaboration. Accessed: 13-Oct-2024. URL: <https://rd50.web.cern.ch/niel/>.



ÖZGEÇMİŞ

Ömerali YAĞCIOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans (2021-2024)	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans (2017-2021)	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya