

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE ATMOSFERDE VE YER YÜZEYİNDE DOZ
HESAPLAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice DOĞRU

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

ARALIK 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE ATMOSFERDE VE YER YÜZEYİNDE DOZ
HESAPLAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hatice DOĞRU
(302161004)**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İskender A. REYHANCAN

ARALIK 2019

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302161004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hatice DOĞRU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE ATMOSFERDE VE YER YÜZEYİNDE DOZ HESAPLAMALARI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İskender A. REYHANCAN

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cenap ÖZBEN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. M. Nizamettin ERDURAN

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 9 Aralık 2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans tez çalışması T.C. Kalkınma Bakanlığı'nın desteklediği "2017K121620" no.lu "Radyasyon Algılama Ölçme Sistemlerinin ve Yazılımlarının Geliştirilmesi" projesi kapsamında ortaya çıkmıştır. Proje yürütücüleri olan Prof. Dr. Altuğ ŞİŞMAN ve Doç. Dr. Fatih ÖZTÜRK'e,

Deneyim ve tecrübelerinden çokça yararlandığım doktora öğrencisi, arkadaşım Alborz EBRAHİMİ'ye,

Her zaman gösterdiği ilgisi ve sabrıyla, en büyük destekçilerimden, motivasyon kaynaklarımdan olan dostum Eda KALAYCI ÖZTÜRK'e,

Maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman arkamda olan aileme,

Yüksek lisans eğitimimin başından itibaren beni destekleyen ve mesleki olarak ilerlememi sağlayan, minnet duyduğum, danışman hocam sayın Prof. Dr. İskender Atilla REYHANCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2019

Hatice DOĞRU
(Fizikçi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez	4
2. KOZMİK IŞINLAR.....	5
2.1 Kozmik Işınlara Tarihçesi.....	5
2.2 Kozmik Işın Kaynakları	6
2.2.1 Galaktik kozmik ışınlar	7
2.2.2 Güneş kozmik ışınları.....	7
2.2.3 Anormal kozmik ışınlar	7
2.3 Birincil Kozmik Işınlara.....	8
2.4 İkincil Kozmik Işınlara	9
2.5 Dünya Atmosferi ve Katmanları	10
2.6 Dünya Atmosferinde İyonlaştırıcı Radyasyon	12
2.6.1 İyonlaştırıcı radyasyonun doz terminolojisi	13
2.6.1.1 Lineer enerji transferi.....	13
2.6.1.2 Radyasyon pozu	14
2.6.1.3 Soğurulan radyasyon dozu	15
2.6.1.4 Radyasyon doz eşdeğeri (Biyolojik doz)	15
2.6.2 Atmosferdeki yüklü parçacıkların etkileşimleri	16
2.6.2.1 Gama ışını etkileşimleri	16
2.6.2.2 Nötron etkileşimleri	19
2.7 Atmosferdeki Hava Duşu	21
2.7.1 Elektromanyetik duş	21
2.7.2 Hadronik duş.....	21
3. RADYASYON TAŞINIMINDA MONTE CARLO TEKNİKLERİ.....	25
4. GEANT4 SİMÜLASYON PROGRAMI	29
4.1 GEANT4 Tasarımı	29
4.1.1 Geometri ve malzemeler.....	31
4.1.2 Parçacığın madde ile etkileşimi	32
4.1.3 Fizik süreçleri	32

4.1.4 Event ve tracking yönetimi	34
4.1.5 Dijitalleştirme ve hit(vuruş) yönetimi	35
4.1.6 Event ve tracking yönetimi	36
4.2 ROOT Analiz Programı.....	36
5. DÜNYA ATMOSFERİNİN MODELLENMESİ VE DOZ HESAPLAMALARI	39
5.1 Atmosferin Modellenip İkincil Parçacıkların Oluşturulması	39
5.1.1 Fizik süreçlerinin belirlenmesi	39
5.1.2 Geometri tasarımı ve materyallerin belirlenmesi	41
5.2 Doz Hesaplamalarının Yapılması	47
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	51
6.1 Farklı Seviyelerde İkincil Parçacıkların, Simülasyonda Elde Edilen Akıları ..	51
6.1.1 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki gama ışınları	52
6.1.2 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki nötronlar	53
6.1.3 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki protonlar.....	54
6.2 Deniz Seviyesi ve Atmosferde Doz Hesaplamaları	56
6.2.1 Deniz seviyesinde kozmik radyasyon dozu	56
6.2.2 Atmosferde kozmik radyasyon dozu	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR

CERN	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
ENDF	: Evaluated Nuclear Data File
GEANT	: Geometry And Tracking
KEK	: Japon Ulusal Hızlandırıcı Merkezi
LET	: Lineer Enerji Transferi
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
SSB	: Standart Sıcaklık ve Basınç
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu
UUI	: Uluslararası Uzay İstasyonu
UV	: Ultraviyole



SEMBOLLER

A	: Kütle Numarası
D	: Absorblanmış doz
H	: Doz eşdeğeri
He	: Helyum çekirdeği
J	: Joule
mGy	: Miligray
mSv	: Milisievert
NaI	: Sodyum İyodür
Q	: Kalite Faktörü
R	: Röntgen
w	: Ağırlık faktörü
Z	: Atom numarası
α	: Alfa parçacığı
γ	: Gama sembolü
λ	: Ortalama serbest yol
ν	: Nötrino
$\bar{\nu}$: Antinötrino
Π	: Pion
μSv	: Mikrosievert



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yer seviyesindeki bir insanın yıllık olarak aldığı, doğal kaynaklardan gelen iyonlaştırıcı radyasyon dozları.....	6
Çizelge 2.2 : SSB altında atmosfer bileşenleri	10
Çizelge 2.3 : Çeşitli radyasyonların tipik LET değerleri.....	14
Çizelge 2.4 : Radyasyon tipine göre kalite faktörü.....	16
Çizelge 4.1 : Elektromanyetik, hadronik ve diğer önemli etkileşimler.	33
Çizelge 5.1 : GEANT4 fizik modelleri	40
Çizelge 5.2 : Deniz seviyesinden itibaren irtifaya bağlı olarak sıcaklık, basınç ve yoğunluk değişimi.....	43
Çizelge 5.3 : Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları	45
Çizelge 5.4 : Atmosferin üst kısmına ulaşan alfa akıları	46
Çizelge 5.5 : Doz hesabı için gönderilecek ortalama enerjinin temsili olarak hesaplanması	48
Çizelge 6.1 : İkincil parçacıklar için doz hesabı.....	57
Çizelge A.1 : Atmosferden birincil parçacık olarak gönderilen protonun enerji ve parçacık sayısı ilişkisi.	79
Çizelge A.2 : Atmosferden birincil parçacık olarak gönderilen alfanın enerji ve parçacık sayısı ilişkisi.	79



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Enerjinin bir fonksiyonu olarak birincil kozmik ışınların ana bileşenleri..	8
Şekil 2.2 : Atmosferik kozmik ışınların birkaç olası ikincil parçacık dallarının şemati gösterimi	9
Şekil 2.3 : Atmosfer katmanları.....	11
Şekil 2.4 : Fotoelektrik etki	17
Şekil 2.5 : Compton saçılması	18
Şekil 2.6 : Çift oluşumu	18
Şekil 2.7 : Nötronun esnek saçılması	19
Şekil 2.8 : Nötronun esnek olmayan saçılması.....	19
Şekil 2.9 : Atmosferdeki çekirdeklerle kozmik ışın etkileşiminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.10 : Gama ışını (solda) ve proton (sağda) kaynaklı hava duşunun karşılaştırılması.	23
Şekil 2.11 : Proton tek çekirdekli (a) ve ağır hadron çok çekirdekli (b) duşların merkezi bölgesinde parçacık yoğunluğunun dağılımı	24
Şekil 4.1 : GEANT4'ün hiyerarjik yapısı	30
Şekil 5.1 : GEANT4'te oluşturulan kübik atmosfer modeli.....	42
Şekil 5.2 : Simülasyonda kullanılan birincil proton akısı.	44
Şekil 5.3 : Simülasyonda kullanılan birincil alfa akısı.	44
Şekil 5.4 : GEANT4'te simülasyon örneği.....	47
Şekil 5.5 : GEANT4 'te tasarlanan insan vücudu ve gönderilen parçacıkların temsili gösterimi.....	50
Şekil 5.6 : GEANT4 'te doz hesabı için yapılan geometri ve simülasyon örneği.....	50
Şekil 6.1 : Deniz seviyesindeki gamaların enerjiye göre akısı	52
Şekil 6.2 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki gamaların enerjiye göre akısı.	52
Şekil 6.3 : Deniz seviyesindeki nötronların enerjiye göre akısı	53
Şekil 6.4 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki nötronların enerjiye göre akısı.	54
Şekil 6.5 : Deniz seviyesindeki protonların enerjiye göre akısı	55
Şekil 6.6 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki protonların enerjiye göre akısı	55



MONTE CARLO YÖNTEMİ İLE ATMOSFERDE VE YER YÜZEYİNDE DOZ HESAPLAMALARI

ÖZET

Günlük hayatımıza devam ederken, çevrede çeşitli radyasyon formlarına maruz kalmaktayız. Bu radyasyonun yer seviyesindeki ana kaynaklarından biri kozmik ışınlardır. Yüksek enerjili bu kozmik ışınların kökeni, astrofizikte çözülememiş önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Birincil kozmik ışınların çoğunluğunu proton ve alfa oluştururken ikincil kozmik ışınlar; pion, kaon, müon, proton, gama, nötron, eletron, pozitron, nötrino ve antinötrinolardır. Zırh görevi gören Dünya atmosferi sayesinde, yüksek enerjili kozmik ışınların büyük çoğunluğu yer yüzüne ulaşamaz ve böylece deniz seviyesine inildikçe ikincil parçacıkların yoğunluğu ve doz miktarında azalma görülür. Bu sebeple uçak personelleri ve kutuplara yakın yaşayanlar, deniz seviyesinde olanlara göre daha fazla kozmik radyasyona maruz kalmaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında GEANT4 simülasyon programından yararlanılmıştır. GEANT4 simülasyon programı, parçacıkların madde içerisinden geçişinin ve madde ile etkileşiminin simülasyonunun yapılmasını sağlayan yazılım paketidir ve Monte Carlo yöntemini kullanır. Monte Carlo yöntemi ise, rastgele sayılar kullanarak bir soruna makroskopik bir çözüm elde etmenin, istatistiksel bir yaklaşımdır. Bu tez çalışmasında simülasyonlar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Dünya atmosferi modellenip deniz seviyesinde ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda ikincil parçacıklardan gama, proton ve nötron akıları incelenmiştir. Simülasyon çalışmasının bu kısmında, yeryüzünden itibaren atmosferin, taban kenarları ve yüksekliği 80 km olan küp biçimindeki bölümü ele alınmış ve Dünya'nın yüzeyi düz kabul edilerek modellenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Dünya'nın elektrik ve manyetik alanı hesaba katılmamıştır. Standartlara uygun bir şekilde, basınç, sıcaklık ve yoğunlukları ayrı ayrı belirtilerek atmosferin katmanları oluşturulmuştur. Atmosferin en üst tabakasından birincil parçacıklar gönderilmiş ve 2 farklı irtifada, ROOT analiz programıyla elde edilen verilere göre ikincil parçacıkların akısı incelenmiştir. Bu sonuçlara göre kozmik ışınların yoğunluğunun irtifa ile değiştiği, deniz seviyesinden yukarılara çıkıldıkça arttığı gözlemlenmiştir.

Simülasyon çalışmasının ikinci kısmında ise, 2 farklı irtifada elde edilen ikincil kozmik parçacıkların ortalama enerjileri kullanılarak, insan dokusu üzerindeki doz değerleri hesaplanmıştır. Bunun için GEANT4'te insan vücudu modellenmiş, bir önceki çalışmada elde edilen ortalama enerjideki nötron, gama ve protonlar, insanın belli bir mesafe yukarısından ayrı ayrı gönderilmiş, her biri için doz değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen kozmik radyasyon dozu değerlerinin, deniz seviyesinden 10 km yukarıda çok daha fazla olduğu görülmüştür.



DOSE CALCULATIONS ON THE ATMOSPHERE AND GROUND SURFACE BY MONTE CARLO METHOD

SUMMARY

In our daily lives, we are exposed to various forms of radiation from the environment. One of the main sources of this radiation at ground level is cosmic rays. The origin of the cosmic rays is still not totally known. The majority of the primary cosmic rays are proton and alpha, while the secondary cosmic rays; pion, kaon, muon, proton, gamma, neutron, electron, positron, neutrino and antineutrinos. By means of Earth's atmosphere, which acts as shield, the majority of high-energy cosmic rays cannot reach the surface, reducing the flux and dose of secondary particles. Therefore, aircraft personnel and those living close to the poles are exposed to more cosmic radiation than those living at sea level.

Cosmic rays are basically divided into three main groups: Galactic Cosmic Rays, Solar Cosmic Rays and Abnormal Cosmic Rays. The Galactic Cosmic Rays are charged particles coming out of our solar system. While these rays are mainly composed of proton and helium nuclei, about 1% are made up of heavier nuclei. They move in a wide speed range close to the speed of light in the galaxy. Since the energy of particles in the solar wind caused by the expansion of the solar corona is relatively small, the Solar Cosmic Rays are easily deflected by the Earth's magnetic field and do not affect the Earth's atmosphere. In some cases, however, the surface of the Sun emits sudden bursts of energy in the form of gamma rays, X-rays and radio waves. Abnormal cosmic rays, on the other hand, are most likely produced by neutral atoms in interstellar space. Each of the cosmic rays classified above is divided into two main groups, primary cosmic rays and secondary cosmic rays. Primary cosmic rays are stable charged particles accelerated with great energies by astrophysical sources somewhere in our universe. Primary high energy cosmic ray particles, mostly protons, interact with the atmospheric substance primarily through strong interaction and form a large number of particles called secondary cosmic rays. Secondary cosmic ray components can be divided into three groups: muonic, hadronic, electromagnetic.

The atmosphere consists of approximately 78% nitrogen, 21% oxygen, 0.93% argon, 0.034% (average) carbon dioxide and trace amounts of other gases. Atmospheric layers, from bottom to top; it is in the form of troposphere, stratosphere, mesosphere, and exosphere and is defined according to temperature-density changes. Troposphere; It contains about 80% of the mass of the atmosphere and is where most of the daily air observed from the ground takes place. It is the layer where the gases are most intense. Stratosphere; It extends up to about 50 km from the troposphere. The ozone layer is in this layer. Ozone and oxygen in the stratosphere absorb most of the UV rays from the Sun. Mesosphere is the layer of the atmosphere between 50 km and 80 km elevation above sea level. The mesosphere layer protects the earth from

meteorites from space, and when meteors enter this layer, they burn. The exosphere is the highest atmospheric layer. This is where the earth's atmosphere meets the interplanetary space.

Upon entering the atmosphere, primary cosmic radiation is exposed to the electrons and nuclei of the atoms and molecules that make up the air, and as a result, the radiation composition changes as it diffuses through the atmosphere. All particles lose energy through hadronic and/or electromagnetic processes. Electromagnetic showers can be started by gamma rays, electrons or positrons. When a high-energy hadron, mostly proton, interacts with atmospheric nuclei with strong force, a hadronic shower occurs. Energetic protons and neutrons often lose energy with strong interactions, heavy nuclei are broken down in collisions with the nuclei of the air molecules, and electrons and photons are exposed to electromagnetic energy processes. In addition, all charged particles are subject to ionization losses.

GEANT4 simulation program was used in this master thesis study. GEANT4 simulation toolkit is a software package that allows the simulation of the passage of particles through the substance and its interaction with the substance using Monte Carlo method. The Monte Carlo method is a statistical approach to obtaining a macroscopic solution to a problem using random numbers.

In the Monte Carlo simulation, radiation transport occurs by moving the particles in different steps and interacting with various particles along the way. The fact that the radiation transport is a random process by definition is an excellent example of the Monte Carlo technique.

GEANT4 provides a comprehensive array of particles, detector geometry, material, tracking method, detector response, visualization and user interface. It also provides physics processes such as electromagnetic, hadronic, and optics to describe the interaction of particles with matter over a wide range of energy. GEANT4 has the ability to create a geometric model with components in a number of different shapes and materials and identify sensitive parts that record the information needed to simulate detector responses. Particle interaction in matter is related to particle types and energies. After the primary particles start with appropriate physics processes, they are monitored in the system until they hit another particle, transfer all their energy and stop, decay or go out of the world volume, this is called track. The production of primary particles can be done using the event generator or the particle shooter class, which can form a beam of particles combined with the type, location, direction of movement and kinetic energy of the particle. In order for the particles to move between the two interaction points, their energies must be updated as well as the space and time coordinates. For this reason, it would be useful to distinguish a certain initial and final state in a particle interaction or decay.

Event management is the main unit in the simulation. Event provides event producers with an abstract interface. The event generator provides the primary particles that define a physics event. This event class avoids hiding temporary information that is not required after an event has completed the process. Includes primary vertices and primary particles before event processing. After processing, it has hits and digitizations created by the simulation and can optionally store the trajectories of simulated particles.

In the simulation, each particle is moved from the environment step by step. G4Step class coordinates store changes in track properties between start and end points, including volume, energy, and momentum. In the physics process, process properties

are shown by following three monitoring actions: particle decay when stopped, energy loss or secondary particle production during the step, and post-step decay, or secondary particle production by interaction.

In the GEANT4 simulation program, a hit is an image of a physical interaction, or accumulation of traces (or traces) interactions, in a sensitive detector component. On the other hand, the term “digit” represents a detector output, for example an ADC or TDC count or a trigger signal. A digit is created from one or more hits and / or other digits. GEANT4 provides only abstract classes for both detector sensitivity and hit or digit. A sensitive detector creates hit using the information provided in the current step. There are three main visualization drivers integrated into the GEANT4 toolkit, such as OpenGL 37, DAWN 38 and HepRep (High Energy Physics Can Be Represented). In this thesis, OpenGL interface was used.

In this master's thesis, simulations were carried out in two stages. In the first, the Earth's atmosphere is modeled and gamma, proton and neutron fluxes from secondary particles are investigated at sea level and 10 km above sea level. In this part of the simulation study, the surface of the atmosphere from the earth and the cube-shaped part of the ground, whose height is 80 km, is handled and modeled by considering the surface of the Earth as flat. Also in this study, the electric and magnetic fields of the Earth are not taken into account. Firstly, the physical processes, which are the most important part of the simulation, were determined and included in the program. While the standard electromagnetic package included in GEANT4 is used for electromagnetic interactions, different models of GEANT4 are used for hadronic interactions depending on the energy range. For high energies (> 10 GeV), the quark-gluon string model was chosen, and the binary intranuclear cascade model for nucleons with energies less than 10 GeV. For neutrons with energy less than 20 MeV, the G4NeutronHP model based on the ENDF database was used. In simulation G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP contains all packages for hadronic interactions. In addition, G4RadioactiveDecayPhysics has been used for decay interactions of radioactive ions.

Atmosphere geometry was created by overlapping 19 cubic geometry layers, separated by 1 km between sea level and 10 km, 5 km between 10-30 km, and 10 km between 30-80 km. Temperature, pressure and density values of each atmospheric layer were calculated based on “U.S Standard Atmosphere 1976”. 99% of the primary cosmic rays reaching the earth's atmosphere constitute the nucleus of the proton and helium atom. With the help of balloons, proton and helium fluxes with different energy values were obtained in the measurements obtained in the upper atmosphere. Using these fluxes, proton and alpha particles were sent separately from the top layer of the atmosphere, 80 km above the ground, perpendicular to the earth's atmosphere. In this study, the flux of only secondary gamma, neutrons and protons formed at two different levels as sea level and 10 km from sea level were analyzed with ROOT analysis program, and Origin drawing program graphics were obtained.

In the second part of the simulation, the average energy and count values obtained in the first stage of the simulation study were used for dose calculations. For this, a new simulation study was made and a new geometry was designed. These dose calculations have been studied on human tissue, and an average human body is designed for this (G4_A-150_TISSUE material used for tissue sample was used in GEANT4), and the average energy and count values of the secondary particles

obtained were sent randomly from an area of 1 m^2 , about 1 m above the human body for two different altitudes.

The absorbed dose obtained in GEANT4 was converted into equivalent doses according to the recommendation of the International Radiological Protection Council, because for different types of radiation, although the absorbed energy is the same, the biological effects it generates are different. According to the results, it has been observed that the intensity of the cosmic rays varies with altitude, and increases as it rises above sea level and also it has been observed that the obtained cosmic radiation dose values are higher than the standards because of sending directly from one direction directly above the human body from 1 m above and the electric and magnetic fields are not taken into account.

The maximum flux of particles occurs at a height of 15 km or just above aircraft altitudes. Flying at high altitudes exposes aircraft personnel and those who travel frequently to higher doses of cosmic radiation than ground-level ones, since the energy of particles decreases as they approach the ground surface. Both primary high-energy particles and secondary particles can have negative health effects on humans. Cosmic radiation can break down DNA and produce free radicals that can alter cell functions.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Günlük hayatımıza devam ederken, çevrede çeşitli radyasyon formlarına maruz kalmaktayız. Doğal radyasyon kaynaklarından olan kozmik radyasyon, bu katkının yaklaşık %17'lik kısmını oluşturmaktadır. Uzaydan dünya atmosferine gelen yüksek enerjili kozmik ışınların yoğunluğu ekvatorдан kutuplara gidildikçe artar. Dünya atmosferi, bu yüklü parçacıkların büyük çoğunluğunun yer yüzüne geçmesini engelleyerek bir zırh görevi görür. Bundan dolayı, deniz seviyesine yaklaşıldıkça kozmik ışınların yoğunluğu ve doz miktarı azalmaktadır. Deniz seviyesinden itibaren yaklaşık 10 km yukarıda olan uçuş irtifasında, bu yoğunluk daha fazla olduğundan, uçuş ekibi ve sık sık uçakta seyahat eden yolcular kozmik ışına, yer seviyesindekilere oranla daha fazla maruz kalmaktadırlar. (TAEK, 2019)

Bu yüksek lisans tez çalışması, T.C. Kalkınma Bakanlığı'nın desteklediği "Radyasyon Algılama Ölçme Sistemlerinin ve Yazılımlarının Geliştirilmesi" projesi sırasında ortaya çıkmıştır. Tasarımı ve imalatı yapılan prototip panel dedektörünün algıladığı arkaplan radyasyonunun testleri sırasında, yer yüzeyinde ve atmosferde kozmik ışının etkisini anlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu panel dedektörleri 100 cm uzunluğunda, 40 cm eninde ve 5 cm kalınlığında olup, gümrük kapılarında giriş çıkışlarda radyoaktif maddenin varlığını tespit etmede kullanılabilir.

Bu çalışmada ilk olarak, GEANT4 simülasyon programı kullanılarak modellenen Dünya atmosferinin en, boy ve yüksekliği 80 km olan küp biçimindeki kısmı ele alınmıştır. Standartlara uygun bir şekilde, basınç, sıcaklık ve yoğunlukları ayrı ayrı belirtilerek atmosferin katmanları oluşturulmuştur. %90'dan fazlası alfa ve protondan oluşan birincil kozmik ışınların atmosfere girmesiyle, atmosferin atomlarıyla olan elektromanyetik ve hadronik etkileşimlerinde ikincil kozmik ışınlar oluşmaktadır. Atmosferin en üst tabakasından birincil kozmik ışınlar gönderilmiş, deniz seviyesi ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere iki farklı irtifada, ROOT analiz programıyla elde edilen verilere göre ikincil parçacıkların akışı incelenmiştir.

Simülasyon çalışmasının ikinci kısmında ise, iki farklı irtifada elde edilen ikincil kozmik parçacıkların ortalama enerjileri kullanılarak, insan dokusu üzerindeki doz değerleri hesaplanmıştır. Bunun için GEANT4'te insan vücudu modellenmiş, bir önceki çalışmada elde edilen ortalama enerjideki nötron, gama ve protonlar, insanın belli bir mesafe yukarısından gönderilmiştir. Elde edilen kozmik radyasyon dozu değerlerinin, deniz seviyesinden 10 km yukarıda çok daha fazla görülmüştür.

1.2 Literatür Araştırması

Hakan Ergi (2014), yapılan çalışmada ikincil kozmik parçacıkların %60'ını oluşturan nötron akısının çeşitli yüksekliklerdeki dağılımı incelenmiştir, CARI kodu ile farklı irtifalarda uçuş yapan mürettebatın ve yolcunun maruz kaldığı efektif dozlar hesaplanmıştır. Farklı enlem ve boylamlarda yükseklik değıştikçe ikincil kozmik ışınların yoğunluğun da değışim gösterdiği gözlemlenmiş, dolayısı ile yükseklik arttıkça maruz kalınan kozmik radyasyonun azaldığı görülmüştür.

Ümran Alpboğan (2014), yapılan çalışmada, kozmik ışın kaynaklı müonların tespiti konusunda yapılan bazı deneyler hakkında ön bilgiler verilerek, bu müonların tespiti için kullanılan sintilasyon dedektörlerinin çalışma prensipleri anlatılmış ve bir dedektör sistemi simüle edilerek daha önce yapılmış bazı deneylerin sonuçları ile karşılaştırmalı analize dayalı bilgiler sunulmuştur.

Serkan Akkoyun (2006), yapılan çalışmada, gama ışınlarının madde ile etkileşme özellikleri incelenmiş ve uzayda gözlenen gama ışın patlamalarının olduğu bölgeyi belirlemek üzere gama ışınları için yön belirleme çalışmaları GEANT simülasyon programı ile yapılmış ve üç adet NaI dedektörü birbirlerine dik olacak şekilde bir uzay ortamına yerleştirilmiştir. Bu dedektörlerin her birine çarpan gama ışın sayılarının birbirlerine oranlarına bakılarak, yön tayini için bir model geliştirilmiştir.

Mehtap Atakan (2014), Dünya'ya çeşitli açılarla gelen kozmik ışınları incelemek ve ölçmek amacıyla Kafkas Üniversitesi'nde kozmik ışın ölçme dedektör sistemi tasarlanmış ve bu kapsamda düzenekler kurulmuştur. Bu düzenekler belirli mesafe ile ayrılmış sintilatör karoları, fotoçoğaltıcı tüpler, gelen sinyallerin kayıt altına alınmasını sağlayan DRS4 (Domino Ring Sampler Chip Version 4) ve bir bilgisayardan oluşmaktadır. Yapılan analizlerden bir parçacığın uçuş süresi ve buna bağlı olarak da dedektörlerden geçen parçacıkların akı oranı hesaplanmıştır.

Ersin Yahşi (2011), yapılan çalışmada Ulusal Lawrence Berkeley Laboratuvarı'nda tasarlanan ve Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde inşa edilen kozmik ışın dedektöründen yararlanılarak, kozmik müonların deniz seviyesindeki akısının düşeyle olan açığa bağımlılığı yüksek lisans tezi olarak incelenmiştir.

Halil Arslan (2011), yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının deniz seviyesindeki kozmik müonlar üzerindeki etkileri Geant4 simülasyon programından yararlanılarak incelenmiştir. Dünya'nın elektrik ve manyetik alanlarının var olduğu ve olmadığı durumlar için müon enerji spektrumları elde edilmiş, düşük enerjili müonların manyetik alandan yüksek enerjili müonlara oranla daha fazla etkilendikleri, elektrik alanın ise müonlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Melike Kunduracı (2011), yapılan çalışmada deniz seviyesindeki müon sayısının müonların düşeyle yaptığı açığa göre değişimi Geant4 simülasyon programı kullanılarak incelenmiştir. Düşeyle yapılan açı arttıkça müon sayısının azaldığı görülmüştür.

Halil Arslan (2015), yapılan doktora tez çalışmasında, deniz seviyesi, Dünya atmosferinin farklı yükselteleri ve yer altındaki kozmik müonlara ait akı, yük oranı ve açıl bağıllık gibi özellikler Geant4 simülasyon programından yararlanılarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarının, benzer koşullarda elde edilmiş olan deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Namık Özdemir (2016), yapılan yüksek lisans tez çalışmasında CORSIKA simülasyon programıyla kozmik duş yağmurlarıyla üretilen parçacıkların arasındaki momentum ilişkisi ve çekirdekten uzaklığı incelenmiş ayrıca simülasyonda her bir parçacık için farklı değerlerde enerji kesimlerinin etkisi tartışılmıştır.

Ahmet Yıldız (2008), bu yüksek lisans çalışmasında, deniz seviyesinde kozmik ışınların akı oranı ve uçuş zamanı bir simülasyon dedektörü kullanılarak tespit edilmiştir. Roma'da yapılan deneyde, deniz seviyesinde çoğunlukla kozmik müonlar ölçülmüştür. Uçuş zamanı, akı oranı ve zaman kararlılığı ölçümleri üzerine değişik materyallerin etkisi gözlemlenmiştir.

Tuğba Şaşmaz (2011), yapılan yüksek lisans çalışmasında atmosfer taban kenarı 100 km, yüksekliği 50 km olan kare prizma şeklinde GEANT4 simülasyon programıyla

modellenecek, deniz seviyesine ulaşan bazı kozmik ışınların dağılımları incelenmiştir.

1.3 Hipotez

GEANT4 simülasyon programı ile atmosfer modellenip iki farklı irtifada ikincil kozmik ışınların akısı incelenerek, bu seviyelerdeki kozmik radyasyon dozu hesaplanmıştır. Bu çalışmaya göre, deniz seviyesinden atmosferin üst katmanlarına çıktıkça kozmik radyasyon dozu artmaktadır.



2. KOZMİK IŞINLAR

Günlük hayatımıza devam ederken, çevrede çeşitli radyasyon formlarına maruz kalmaktayız. Bu radyasyonun yer seviyesindeki ana kaynakları radon, tıbbi işlemler (X-ışınları vb.) ve bunun yaklaşık yüzde on ila on beşi ise Dünya atmosferindeki kozmik ışın etkileşimlerinin yan ürünleridir. Atmosferde, bu kaynaklardan ilk ikisi yoktur ve kozmik radyasyon tek radyasyon kaynağı olmaktadır. Avusturyalı fizikçi Victor Hess, bu radyasyonu 90 yıldan uzun bir süre önce, yer seviyesinden 5 km yüksekliğe kadar çıkan insanlı balon uçuşlarını kullanarak keşfetmiştir.

Kozmik ışınların yirminci yüzyılın başlarında keşfedilmesinden bu yana, kozmik ışın radyasyonunu incelemek için birçok deney geliştirilmiştir. Kozmik ışınların yayılımını, hızlanmasını ve elektromanyetik radyasyon ve yıldızlararası maddeyle etkileşimlerini incelemek için büyük çaba sarf edilmiştir. Ancak yüksek enerjili kozmik ışınların kökeni, astrofizikte hala çözülmemiş önemli bir sorundur. Olası kaynaklar ise Güneş, diğer yıldızlar ve süpernovalar ve kalıntıları gibi daha egzotik nesnelere, nötron yıldızları ve kara deliklerin yanı sıra aktif galaktik çekirdekler ve radyo galaksileridir.

2.1 Kozmik Işınların Tarihçesi

1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen, bir yüksek vakumlu katod ışını tüpü olan Crookes tüpü ile deney yaparken X ışını adını verdiği iyonlaştırıcı radyasyon türünü keşfetti. Böyle bir tüpte üretilen parıldamayı anlamaya çalışan Röntgen, tüpü opak bir kağıtla kapattı. Tüpteki parlamayı daha iyi görebilmek için laboratuvarını karanlık hale getirmişti ve düşük ışın altında baryum platinosiyanyür ile kaplanmış bir kağıt plakasının hemen yakınında parıltı oluştuğunu gördü. Siyah kağıtla kaplanmış tüp opak olduğundan, tüpte yayınlanan ışığı görmemesi gerektiğini, ekrandaki parıldamaların tüpte yayınlanan ışıklardan kaynaklandığını düşündü çünkü elektrik potansiyel kesildiğinde parıldamalar da duruyordu. Röntgen; manyetik alanla da sapmayan bu ışınları, bilinmeyen doğasına işaret ederek X ışınları diye adlandırdı.

Bu ışınların yoğun nesnelere içinden de geçerek fotoğraf plakası üzerinde görüntü oluşturduğunu gördü.

Antoine-Henri Becquerel, 1896'da fosforesansı araştırırken doğal bir iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı keşfetti. Uranil potasyum sülfatın (bir uranyum tuzu) yanına yerleştirildiğinde opak bir kağıtla kaplı bir fotografik plakanın buğulandığını gözlemledi. Becquerel, X ışınlarından farklı olarak, uranyumdan yayılan radyasyonun bir manyetik alan tarafından sapabileceğini ve bu nedenle yüklü parçacıklardan oluşabileceğini gösterdi.

Theodore Wulf, Eyfel Kulesi'nin altında ve üstünde (300 m yüksekliğinde) bir elektroskopla iyonlaştırıcı radyasyon seviyelerini ölçtü ve kulenin tepesindeki radyasyon seviyelerinin yer seviyesinden yüksek olduğunu buldu.

1912'de Victor F. Hess, balon uçuşları sırasında elektroskopla iyonlaşma oranlarını ölçtü. İyonlaşma oranının 5 km yükseklikte yer seviyesindeki oranın birkaç katı olduğunu buldu. Hess, bu nüfuz edici radyasyonun dünya dışı bir kökeni olduğu sonucuna vardı.

Çizelge 2.1'de dünyadaki doğal kaynaklardan, insanlar tarafından alınan ortalama radyasyon dozu seviyeleridir.

Çizelge 2.1 : Yer seviyesindeki bir insanın yıllık olarak aldığı, doğal kaynaklardan gelen iyonlaştırıcı radyasyon dozları (Friedberg, 2011).

Radyasyon Kaynağı	Efektif Doz (mSv)
Galaktik Kozmik Işın	0,39
Karasal Gama ışını	0,46
Vücuttaki radyonüklidler (radon hariç)	0,23
Radon ve diğer bozunum ürünleri	1,3
Toplam	2,38

2.2 Kozmik Işın Kaynakları

Yüksek enerjili kozmik ışınların kökeni, astrofizikte çözülmemiş önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Olası kaynaklar Güneş, yıldızlar ve süpernovalar ve kalıntıları gibi daha egzotik nesnelere, nötron yıldızları ve kara deliklerin yanı sıra

aktif galaktik çekirdekler ve radyo galaksileridir. Kozmik ışınlar başlıca üç ana gruba ayrılır.

2.2.1 Galaktik kozmik ışınlar

Galaktik kozmik ışınlar, güneş sistemimizin dışından çıkan yüklü parçacıklardır. Bu ışınlar esas olarak proton ve helyum çekirdeğinden oluşurken, yaklaşık %1'i daha ağır çekirdeklerden oluşur. Galaksideki ışık hızına yakın geniş bir hız aralığında hareket ederler. Son zamanlarda yapılan deneyler düşük ila orta enerjili kozmik ışınların Galaktik kökenli olduğunu göstermiştir. Galaktik kozmik ışınların orijini için hâlihazırda tercih edilen teori, süpernova kalıntılarının sınırında meydana gelen güçlü şoklarda özel bir ivme tarafından üretilmeleridir.

Parçacıklar yüklü olduklarından, yıldızlararası uzayda düzensiz manyetik alanlarla etkileşime girerler, böylece Dünya'ya vardıklarında, kaynaklarının yönüyle ilgili tüm bilgiler kaybedilir. Sonuç olarak kozmik ışınların yıldızlararası uzayda ve Dünyaya yakın dağılımı her yöne (izotropik) benzerdir. Galaktik kozmik radyasyonun yoğunluğu, son birkaç milyon yılda önemli ölçüde değişmemiştir (Sullivan ve diğ., 2004).

2.2.2 Güneş kozmik ışınları

Güneşimiz sürekli olarak güneş rüzgarı olarak bilinen, günden güne hız ve yoğunlukta değişen bir parçacık akısı yaymaktadır. Güneş rüzgârı, güneş koronasının genişlemesinden kaynaklanır. Güneş rüzgârındaki parçacıkların enerjisi göreceli olarak küçük olduğu için, Dünya'nın manyetik alanı tarafından kolayca saptırılırlar ve Dünya'nın atmosferini etkilemezler. Bununla birlikte, bazı durumlarda, Güneş'in yüzeyi gama ışınları, X-ışınları ve radyo dalgaları şeklinde ani enerji patlamaları yayar. Bu aktivite, en fazla yükseldiği ve daha sonra tekrar durgunlaştığı onbir yıllık bir döngüye tabidir. Bu enerji patlama olaylarının sıklığı ve kuvveti, güneş maksimum döneminde genellikle en yüksektir.

2.2.3 Anormal kozmik ışınlar

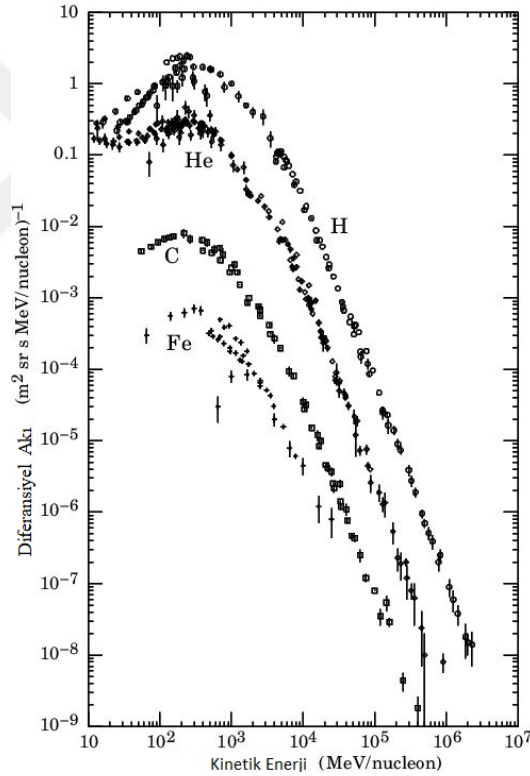
Büyük olasılıkla yıldızlararası uzaydaki nötr atomlar tarafından üretilir. Bunlar UV ışınımı veya güneş rüzgârıyla yük değişimi ile iyonize edilir. Daha sonra toplanırlar ve dış heliosfere geri taşınırlar.

Yukarıda sınıflandırılan kozmik ışınların her biri, birincil kozmik ışınlar ve ikincil kozmik ışınlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

2.3 Birincil Kozmik Işınlar

Birincil kozmik ışınlar, evrenimizin bir yerinde astrofiziksel kaynaklar tarafından büyük enerjilerle hızlandırılmış kararlı yüklü parçacıklardır. Uydulardaki parçacık dedektörleri ve daha kesin ölçümlerin önemli bir kısmı, birincil kozmik ışın parçacıklarının % 92 proton ve % 6 alfa parçacıklarından oluştuğunu ve geri kalanın ise ağır çekirdekler olduğunu belirlemiştir (Witharana, 2007).

Aşağıdaki Şekil 2.1 enerjinin bir fonksiyonu olarak birincil kozmik ışınların ana bileşenlerini gösterir.



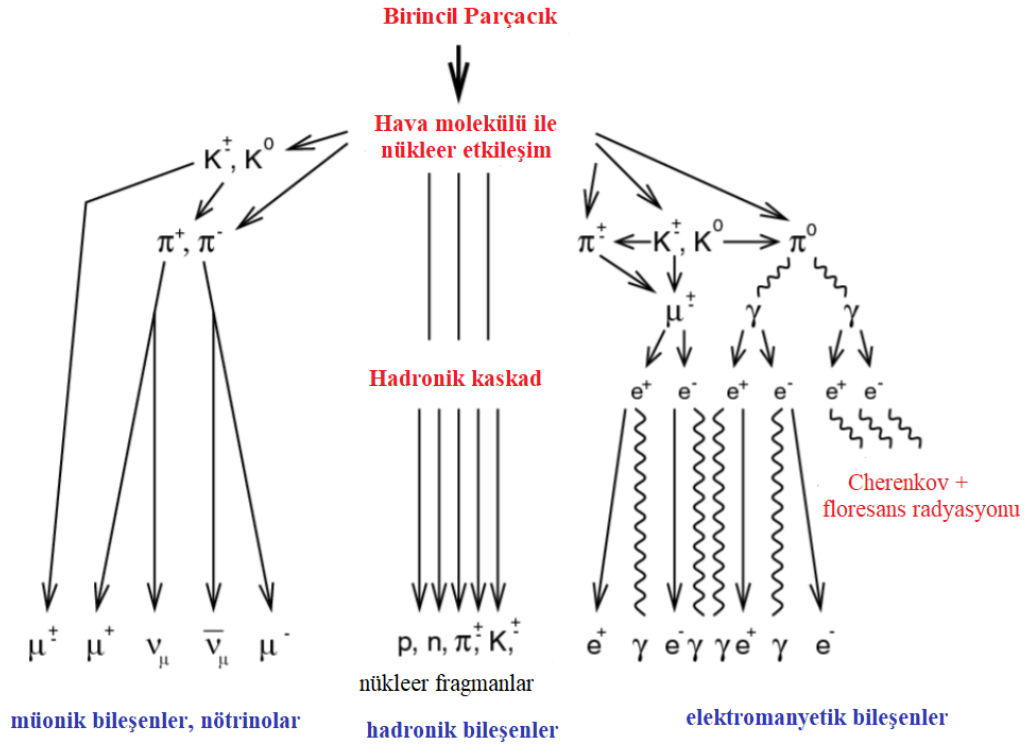
Şekil 2.1 : Enerjinin bir fonksiyonu olarak birincil kozmik ışınların ana bileşenleri (Witharana, 2007).

Birincil parçacıkların spektrumları, uydulardaki parçacık dedektörleri, balon kaynaklı dedektörler, Dünya yüzeyindeki nötronların ve müonların akısını ve parçacık dedektörlerinin geniş alan dizileriyle daha yüksek enerjileri izleyen sayaçları içeren çeşitli şekillerde ölçülmüştür.

2.4 İkincil Kozmik Işımlar

Birincil yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları, çoğunlukla protonlar, atmosferik maddenin atomlarıyla etkileşime girer ve ikincil kozmik ışınlar olarak adlandırılan çok sayıda parçacık oluştururlar. Şekil 2.2 atmosferdeki olası ikincil kozmik ışın parçacık bileşenlerini ve dallarını gösterir. İkincil kozmik ışın bileşenleri üç gruba ayrılabilir: muonik, hadronik, elektromanyetik.

Yüksek enerjili birincil parçacıklar, üst atmosferdeki hava atomlarının çekirdekleri ile etkileştiğinde, pionlar ve kaonlar üretilir. Mezonlar hadronik bozunmada üretilir ve muonik bileşene yol açar. Çoğunlukla, yüklü pionlar nispeten kısa bir mesafede (metre) müon ve nötrinolara dönüşür. Nötr pionlar iki gama ışınına dönüşür. Bir müon iyonlaşma dışında madde ile başka bir etkileşime yapmamaktadır. Bu nedenle, müonlar uzak mesafelere gidebilir ve genellikle Dünya'nın yüzeyine ulaşabilir.



Şekil 2.2 : Atmosferik kozmik ışınların birkaç olası ikincil parçacık dallarının şematik gösterimi (Witharana, 2007).

Elektromanyetik bileşen, nötr ve yüklü mezonların bozunmasıyla başlayan elektronlardan ve pozitronlardan oluşur. Müon bozunması, deniz seviyesinde düşük enerjili elektronların baskın kaynağıdır.

Nötr pionlardan gelen gama ışınları, çift üretim işlemiyle yeni parçacıklar, elektronlar ve pozitronlar oluşturabilir. Elektronlar ve pozitronlar bremsstrahlung radyasyonu ile daha fazla gama ışını üretebilir. İkincil fotonlar daha sonra çift üretimine maruz kalır veya Compton elektronları üretir. İkincil elektronlar ve pozitronlar, çok işlemlili bir süreçte daha fazla foton yayabilir. Bu çarpma, iyonlaşma kayıpları radyasyon kayıplarına baskın olmaya başlayana kadar devam eder ve tüm enerjilerini atomların uyarılması ve iyonlaşmasında dağıtır. Knock-out elektronları ayrıca düşük enerjide duş gelişimine küçük bir katkı sağlar.

2.5 Dünya Atmosferi ve Katmanları

Dünya'nın atmosferi, deniz seviyesinde cm^3 başına yaklaşık 10^{19} parçacık yoğunluğuna sahip büyük bir gaz hacmidir. Artan irtifa ile havanın yoğunluğu azalır ve bununla birlikte birim hacim başına molekül ve çekirdek sayısı da düşer.

Atmosfer, yaklaşık % 78 azot, % 21 oksijen, % 0,93 argon, % 0,034 (ortalama) karbondioksit ve eser miktarda diğer gazlardan oluşur (Friedberg ve diğ., 2011). Termal difüzyonun baskın olduğu bölge olan homosferde atmosferik kompozisyon oldukça sabit kalır. Bu bölge, termal koşullara bağlı olarak deniz seviyesinden itibaren 85 km ile 115 km arasındaki irtifalara kadar uzanır. Bu sınırın ötesinde moleküler difüzyon hakimdir.

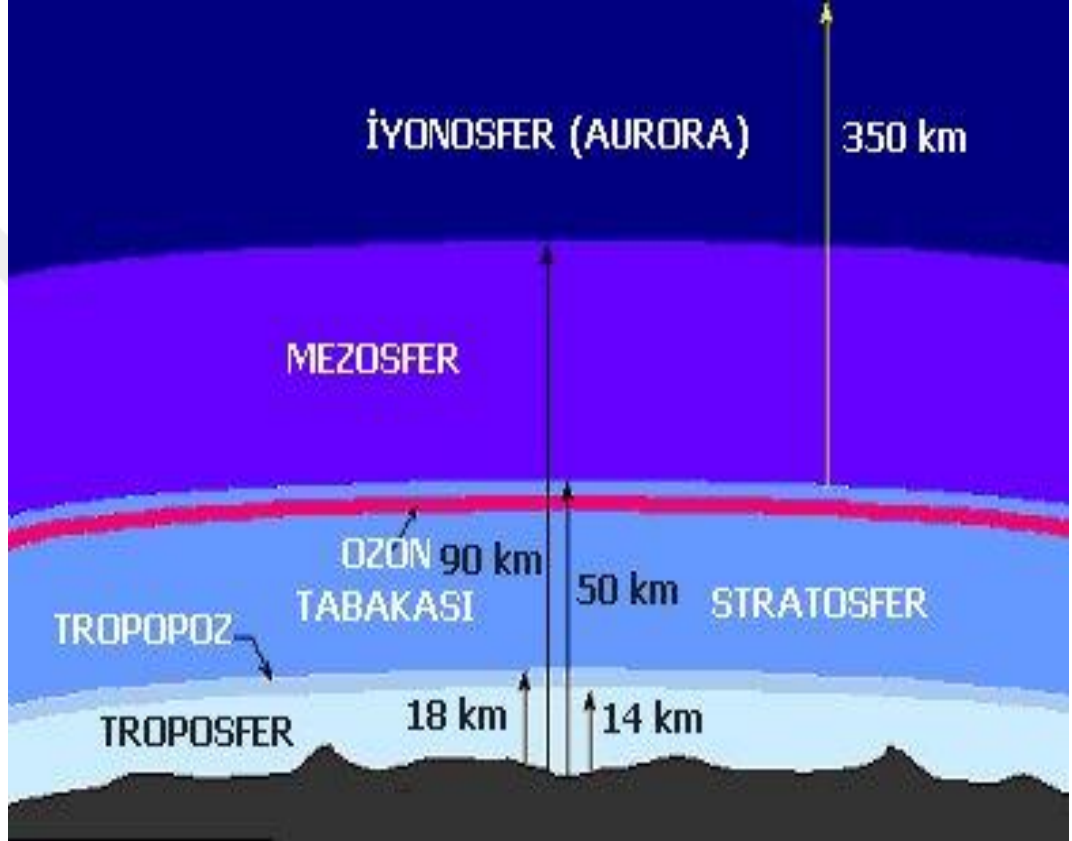
Çizelge 2.2, Standart Sıcaklık ve Basınç (SSB) altında (Sıcaklık 273,16 K, basınç 760 mmHg) atmosfer bileşenlerini göstermektedir. Burada; n_i , cm^3 başına molekül sayısını, q_i ise bileşenlerin bağıl yüzdesini vermektedir.

Çizelge 2.2 : SSB altında atmosfer bileşenleri (Grieder, 2001).

Molekül	$n_i [\text{cm}^{-3}]$	$q_i = n_i / n_{\text{hava}} [\%]$
hava	$2,687 \times 10^{19}$	100
N_2	$2,098 \times 10^{19}$	78,1
O_2	$5,629 \times 10^{18}$	20,9
Ar	$2,510 \times 10^{17}$	0,9
CO_2	$8,87 \times 10^{15}$	0,03
He	$1,41 \times 10^{14}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Ne	$4,89 \times 10^{14}$	$1,8 \times 10^{-3}$
Kr	$3,06 \times 10^{13}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Xe	$2,34 \times 10^{12}$	$9,0 \times 10^{-6}$

Atmosferik Katmanlar

Atmosferik katmanlar, aşağıdan yukarıya doğru; troposfer, stratosfer, mezosfer, ve ekzosfer şeklindedir ve sıcaklık değişimlerine göre tanımlanır. Yükseklik arttıkça, troposferde sıcaklıklar düşer, stratosferde artar, mezosferde azalır ve termosferde artar.



Şekil 2.3 : Atmosfer katmanları (MGM, 2018).

- **Troposfer:** Hava koşulları nedeniyle bir miktar değişiklik gösterir. Dünyanın yüzeyinden kutuplara yakın 8-10 km, tropik bölgelerde ise 16-18 km arasındadır. Atmosferin kütlelerinin yaklaşık %80' ini içerir ve yerden gözlemlenen günlük havanın çoğunun gerçekleştiği yerdir.
- **Tropopoz:** Troposfer ve stratosfer arasındaki sınırdır. Tropopoz, havanın yükseklikle soğumasını kestiği ve neredeyse tamamen kuru olduğu yerdir.
- **Stratosfer:** Troposferden yaklaşık 50 km'ye kadar uzanır. Stratosferdeki ozon ve oksijen, Güneşten gelen UV ışınlarının çoğunu emer. UV radyasyonu canlı dokulara çok zararlı olabilir.

- **Mezosfer:** 50 km'den 80-85 km'ye kadardır. Her gün milyonlarca dünya atmosferine giren meteorların çoğu Dünya'nın yaklaşık 65 ila 120 km arasında görünür hale gelir ve 50-95 km yükseklikte ise parçalanır.
- **Termosfer:** 80-85 km'den 500 km'ye kadar uzanır. Uluslararası Uzay İstasyonu, termosfer katmanında, 30-400 km yükseklikte yörüngede durmaktadır.
- **Egzosfer:** En yüksek atmosferik tabakadır. Dünya atmosferinin gezegenler arası boşluk ile birleştiği yer burasıdır. Bu bölgede, atomlararası çarpışma olasılığı o kadar düşüktür ki, yukarı doğru hareket eden bazı atomlar Dünya'nın yerçekiminden kaçmak için yeterli hıza sahiptir.
- **İyonosfer:** Hem iyonları hem de yüksüz molekülleri içerir ve yaklaşık 80 km ila 480 km arasına kadar uzanır. İyonosfer tipik olarak termosfer ve egzosfer ile örtüşür ve manyetosferin iç kenarındır. Manyetosfer, Dünya'nın manyetik alanından (jeomanyetik alan) etkilenen Dünya etrafındaki bölgedir. Bu bölge, radyo sinyallerini uzun mesafelere yansıtmak için kullanılır ve auroral görüntülerin gerçekleştiği yerdir.

2.6 Dünya Atmosferinde İyonlaştırıcı Radyasyon

Hava ve uzay yolcuları sürekli olarak iyonlaştırıcı radyasyon olan galaktik kozmik radyasyona ve Güneşten gelen kozmik radyasyona radyasyona maruz kalırlar.

Radyasyon geçiş halindeki enerjidir. Enerji, elektromanyetik enerji paketleri (örneğin, görünür ışık, ultraviyole ışık, radyo dalgaları, mikrodalgalar, gama ışınımı, X ışınımı) olan atomaltı madde parçacıkları (örneğin, elektronlar, nötronlar, protonlar, alfa parçacıkları, iyonlar) ve fotonlar olarak hareket eder.

İyonlaştırıcı radyasyon, bir atomdan bir orbital elektronu doğrudan veya dolaylı olarak koparmak için yeterli enerjiye sahip bir atom altı parçacık veya fotondur. Fotonlar ve elektrik yüklü parçacıklar elektromanyetizma yoluyla doğrudan iyonlaşırlar. Nötronlar ise dolaylı yoldan iyonlaştırma yapabilirler. Bir nötron bir atomun çekirdeğini (örneğin, atmosferik azot veya oksijen) etkilediğinde, nükleer uyarma yoluyla bir gama ışınımı foton salınımına ve çekirdeği parçalanmasına ve protonları (doğrudan iyonize olabilen), nötronları (protonlara ve elektronlara bozunabilen) ve pionları serbest bırakmaya neden olabilir.

Canlı madde, elektron bağlarıyla bir arada tutulan atomlardan oluşan moleküllerden oluşur. Yörüngesel elektronların fırlaması, atomları molekül olarak birleştiren bağların kırılmasına neden olabilir. Biyolojik sisteme özellikle zararlı olan, deoksiribonükleik asit (DNA) moleküllerinin parçalanmasıdır. DNA, bir organizmanın işlevi ve çoğalması için gereken bilgileri taşır. İyonlaştırıcı radyasyondan ya da iyonlaştırıcı radyasyondan üretilen serbest radikallerden zarar görmüş DNA'nın hatalı onarımı kansere neden olabilir.

Serbest bir radikal, değerlik kabuğunda bir veya daha fazla eşleştirilmemiş elektron içeren elektriksel olarak nötr bir atom veya moleküldür ve bu onu reaktif hale getirir. İyonlaştırıcı radyasyon parçacıkları, hücrelerdeki su ile ve bazı hücresel bileşenlerle reaksiyona girdiklerinde serbest radikaller meydana getirir.

Görünür ışık, UV ışık, radyo dalgaları ve mikrodalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyonlardır. Bir orbital elektronu çıkarmak için yeterince enerjik olmayan iyonlaştırıcı olmayan radyasyon veya atomaltı bir parçacık, elektron uyarımı ile bir atomla etkileşime girebilir. Bu işlem bir yörüngesel elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine zorlar. Bu şekilde etkilenen bir elektron kararsız bir enerji seviyesindedir ve kısa sürede iyonize olmayan fotonlar şeklinde enerji açığa çıkarak daha kararlı bir seviyeye düşer. Serbest bırakılan fotonlar termal fotonları ve farklı dalga boylarındaki fotonları içerir.

2.6.1 İyonlaştırıcı radyasyonun doz terminolojisi

Radyasyon dozu, bir ortam tarafından emilen enerji miktarıdır. Emilen dozu ve biyolojik etkisini ölçmek için çeşitli terimler kullanılır.

2.6.1.1 Lineer enerji transferi

Lineer Enerji Transferi (LET), kısa bir mesafeye nüfuz ederken, belirli bir enerjinin iyonlaştırıcı radyasyonu ile ortama aktarılan, ortalama enerji miktarıdır.

Ortama verilen enerji, yüksek enerjili bir nötrondan etkilenen bir çekirdekten salınan nükleer parçacıklar gibi herhangi bir ikincil radyasyondan gelen enerjiyi içerir.

LET genellikle keV/μm birimlerinde ifade edilir. LET < 10 keV/μm olan bir radyasyonun genellikle düşük LET'li olduğu kabul edilir. Çizelge 2.3'te radyasyon türüne göre LET değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Çeşitli radyasyonların tipik LET değerleri (Friedberg, 2011).

Radyasyon Tipi	LET(keV/μm)
kobalt-60 gama radyasyonu	0,3
250 kVp X-ışını	2
10 MeV proton	4,7
150 MeV proton	0,5
fisyon nötronlarından saçılan protonlar	45
14 MeV nötron	12
2.5 MeV alfa parçacığı	166
2 GeV demir çekirdeği	1000

2.6.1.2 Radyasyon pozu

Işınlama birimi olarak da kullanılan poz terimi; elektrik yükünün birikmesiyle doğrudan ölçülebildiğinden X ve gama ışınlarının hava içerisinde oluşturdukları iyonizasyon miktarını tanımlamada kullanılır.

Radyasyon demetindeki foton sayısını ve enerji miktarını veremediğinden, ışınlamaya uğrayan bir maddedeki soğurma dozunu ifade etmez. Röntgen (R) radyasyon ışınlama birimidir ve sadece X ışınları ile 3 MeV civarındaki gama ışınları için geçerlidir. Röntgen; 0,001293 g havada (atmosfer basıncı ve 0 °C'deki havanın 1 cm³'ü) $3,336 \times 10^{-10}$ C yük üreten X veya gama radyasyon miktarıdır.

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C / kg} \quad (2.1)$$

Yani bir Röntgen, havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ C'luk yük üreten X veya gama radyasyonudur. Ancak ışınlamanın SI birimi olarak 1 kg'lık havada 1 C yük üreten radyasyon miktarı olarak tanımlanan X (C/kg) kullanılır. X birimi 1 kg havada 33,97 J'lük enerji depolanmasına karşılık gelir ve bu da 3876 R'e eşittir.

2.6.1.3 Soğurulan radyasyon dozu

İyonlaştırıcı radyasyonun soğurulan dozu, birim kütle başına maddede depolanan enerji miktarıdır.

Soğurulan dozun geleneksel birimi *rad*'dir (radiation absorbed dose) ve ışınlanan maddenin 1 kg'ında 10^{-2} joule'lük enerji veren radyasyon miktarıdır. SI birimi ise Gray(Gy)'dir ve ışınlanan maddenin kilogramı başına 1 J'lük enerji verir.

$$1Gy = 1 J / kg = 100 rad \quad (2.2)$$

2.6.1.4 Radyasyon doz eşdeğeri (Biyolojik doz)

Farklı tip radyasyonlar için, soğurulan enerji aynı olsa da, meydana getirdiği biyolojik etkiler farklıdır. Bu etki sadece soğurulan radyasyonun toplam enerjisine değil, yolu boyunca birim uzunlukta meydana gelen enerji kaybına (LET) bağlıdır.

Radyasyon hasarı radyasyonun lineer enerji transferi ile artar, yüksek LET'li radyasyonun (alfa parçacığı, nötron gibi) yaptığı biyolojik hasar, düşük LET'li radyasyonun (beta parçacıkları, gama-X ışınları gibi) yaptığından çok daha fazladır.

Doz eşdeğeri H ile gösterilir ve soğurulan doz ile radyasyon tipine bağlı hasarı tanımlayan bir Q kalite faktörünün çarpımına eşittir.

$$H(\text{doz eşdeğeri}) = D(\text{soğurulan doz}) \times Q(\text{kalite faktörü}) \quad (2.3)$$

Geleneksel birim sisteminde doz eşdeğerinin birimi rem'dir ve 1 röntgenlik X ve gama ışınının meydana getirdiği aynı biyolojik etkiyi meydana getiren radyasyon miktarıdır.

$$1rem = 1rad \times Q \quad (2.4)$$

Q kalite faktörü, Çizelge 2.4'te de görüldüğü gibi radyasyon tipine göre değişmektedir.

SI birimler sisteminde Doz Eşdeğeri Birimi Sievert (Sv) dir. Çoğunlukla radyasyon çalışanlarının ve toplumun maruz kaldığı radyasyon doz eşdeğeri için mSv veya μ Sv kullanılır.

$$1Sv = 1J / kg \quad (2.5)$$

$$1Sv = 100rem \quad (2.6)$$

Çizelge 2.4 : Radyasyon tipine göre kalite faktörü (Si Belkhir, 2010).

Radyasyon	Enerji	Q
X-ışınları, gama ışınları,elektronlar, pozitronlar, müonlar		1
	< 10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
nötron	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
proton	> 2 MeV	5
Alfa parçacıkları, nükleer fisyon ürünleri, ağır çekirdekler		20

2.6.2 Atmosferdeki yüklü parçacıkların etkileşimleri

Atmosfere girdikten sonra, birincil kozmik radyasyon, havayı oluşturan atomların ve moleküllerin elektronları ve çekirdekleri ile etkileşime maruz kalır ve sonuç olarak, radyasyon bileşimi atmosferde yayıldıkça değişir. Tüm parçacıklar hadronik ve/veya elektromanyetik işlemlerle enerji kaybına uğrarlar.

Gelen hadronlar, azot ve oksijen gibi atmosferik çekirdeklerle çarpıştığında güçlü etkileşimlere maruz kalırlar. Birkaç GeV enerjisinin üstünde çarpışmalarda, mezon ve diğer ikincil parçacıkların yaratılmasından kaynaklanan bölgesel nüfuz eden parçacık duşları üretilir.

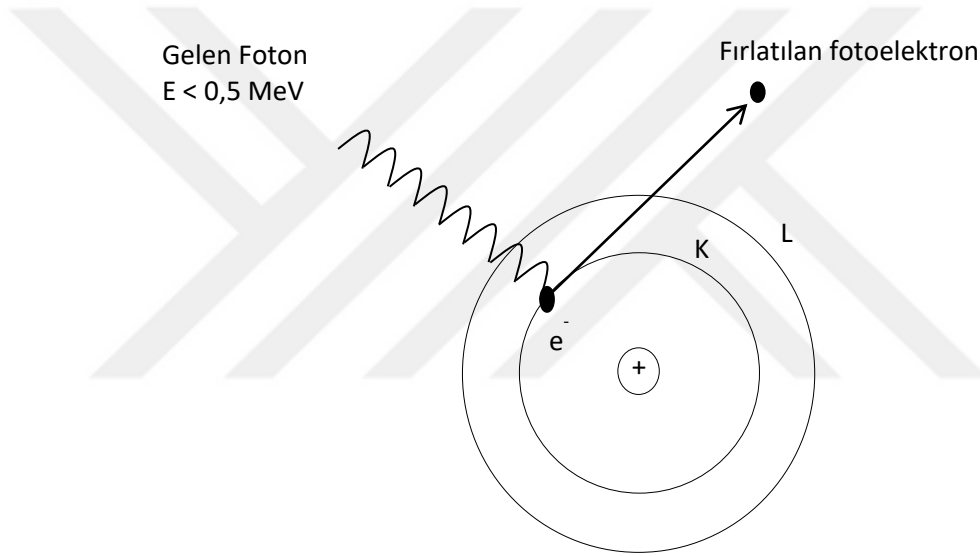
Enerjik ve ağır birincillerin olması durumunda, spallasyon parçaları atmosferde yayılmaya devam eder ve aynı şekilde yeni oluşturulan enerjik ikincil parçacıklar için yörüngeleri boyunca daha fazla parçacık üretir. Enerjik hadronik çarpışmalarından ortaya çıkan en çok parçacık pionlardır, fakat kaonlar, hiperonlar, tılsımlı parçacıklar ve nükleon-antinükleon çiftleri de üretilir.

2.6.2.1 Gama ışını etkileşimleri

Gama ışını, çekirdekler tarafından yayımlanan radyasyondur. Başlangıç enerjilerine ve atom numaralarına bağlı olarak madde ile çeşitli yollardan etkileşir. Bunlardan madde içinde zayıflamaları ve enerji depolamaları açısından en önemlileri; fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumudur.

Fotoelektrik etkileşim

Enerjisi 0,5 MeV'den küçük foton, yüksek atom numaralı malzemenin atomuyla etkileşerek yörüngeye bağlı elektronla çarpışır ve tüm enerjisini aktardığı elektronu atomdan fırlatır (Şekil 2.4).

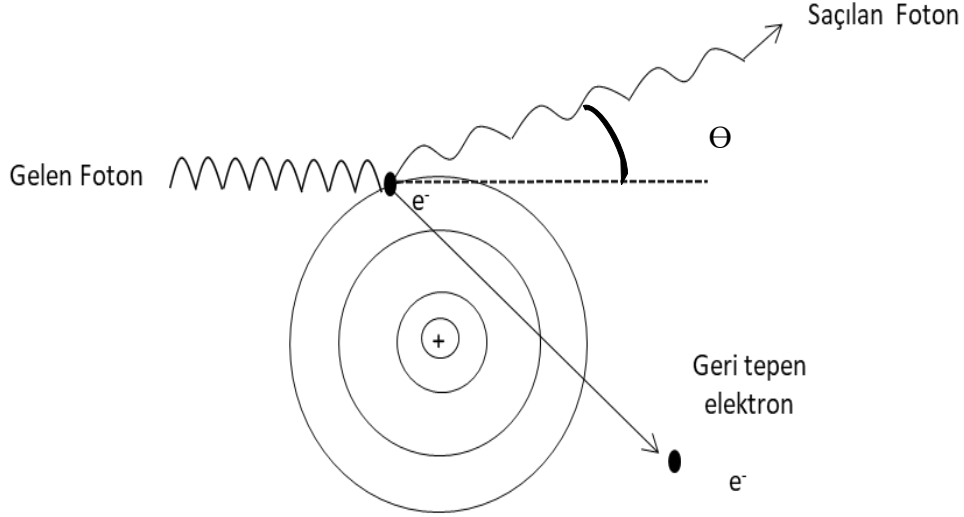


Şekil 2.4 : Fotoelektrik etki.

Fırlatılan bu elektron fotoelektron olarak adlandırılır ve kinetik enerjisi, gelen foton enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisi arasındaki fark kadardır. Bütün enerjisini kaybedene kadar ikincil iyon çiftleri meydana getirerek yoluna devam eder.

Compton saçılması

Enerjisi 0,5 MeV ile 1 MeV arasında olan gama ışınının, serbest bir elektrona çarpması sonucu, daha az enerjiyle yönünü değiştirdiği ve enerjisinin bir kısmına elektrona aktardığı esnek saçılma olayıdır (Şekil 2.5). Elektrona aktarılan bu enerji saçılan fotonun saçılma açısıyla (Θ) doğru orantılıdır. Gelen gama ışınının enerjisinin artmasıyla etkileşimin olma olasılığı azalırken, malzemenin atom numarasından bağımsızdır.

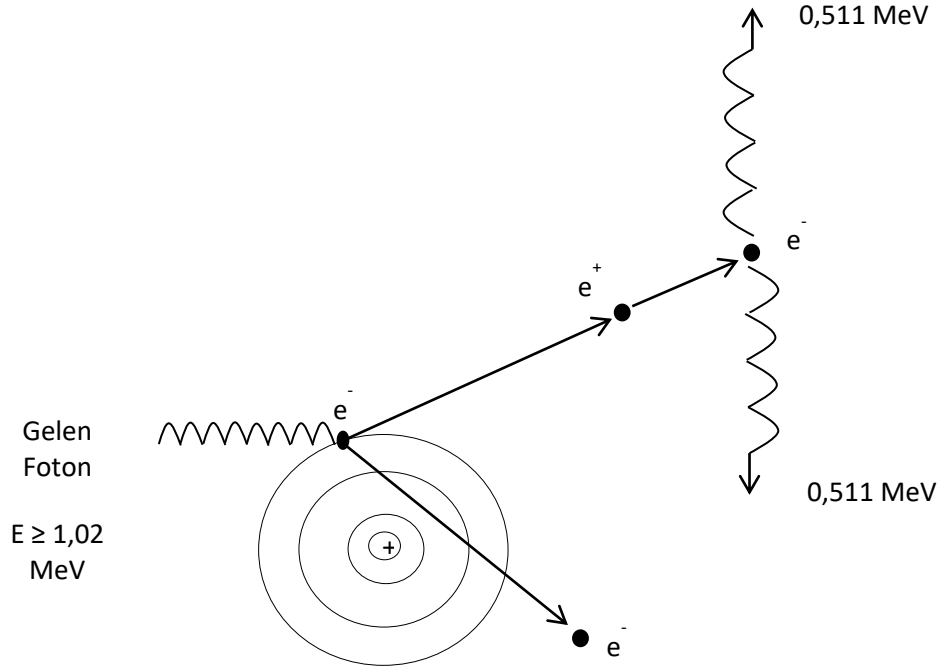


Şekil 2.5 : Compton saçılması.

Çift oluşumu

Enerjisi 1,022 MeV veya üzeri olan bir foton, çekirdeğin alanında soğurulduğu zaman, bir elektron-pozitron çifti meydana getirir (Şekil 2.6).

Elektron bütün enerjisini ikincil iyon çiftleri meydana getirerek kaybederken, pozitron madde içinde hareket ettiği sırada serbest bir elektronla çarpışarak birbirlerini yok ederler ve böylece zıt yönde 0,51 MeV' lik iki gama ışını yayınlanır (Anihilasyon Radyasyonu).



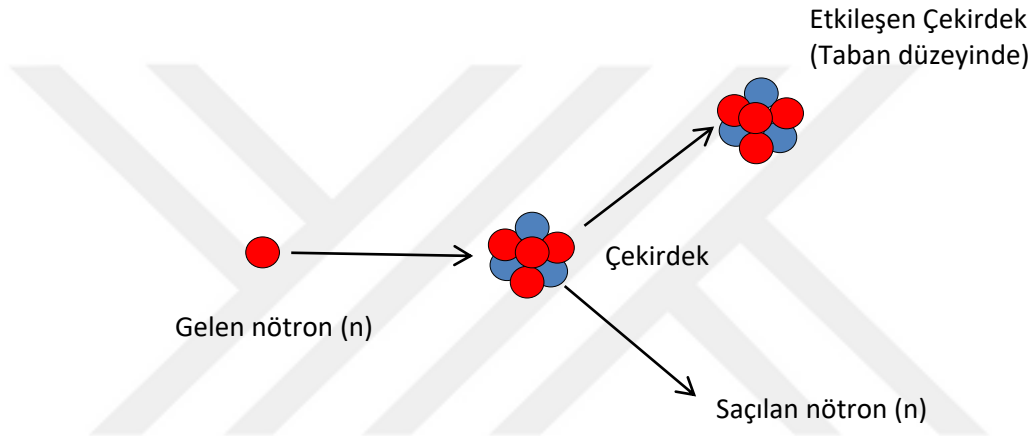
Şekil 2.6 : Çift oluşumu.

2.6.2.2 Nötron etkileşimleri

Nötronlar elektriksel olarak yüksüz olduklarından bir atomdaki elektronlardan veya çekirdeğin pozitif yükünden etkilenmezken doğrudan çekirdek ile etkileşirler. Nötronlar enerjilerine bağlı olarak bir çok etkileşme girerler.

Esnek saçılma

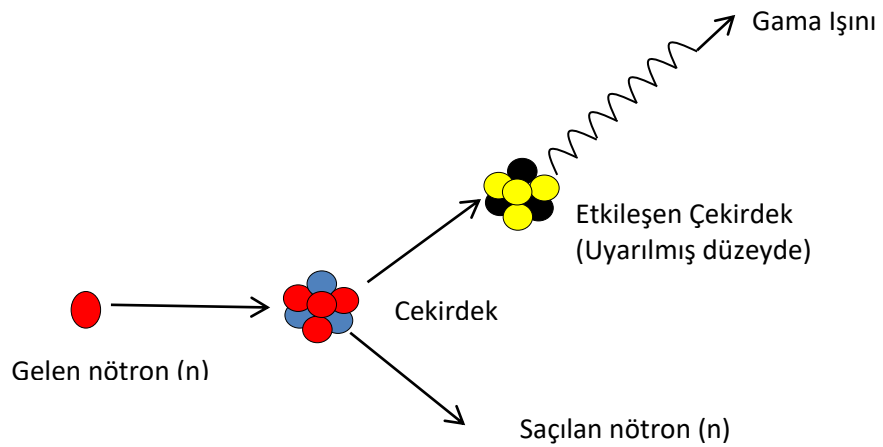
Nötron, atom çekirdeğine çarptıktan sonra enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktarır ve farklı bir doğrultuda ilerler (Şekil 2.7). Çekirdek bu olay esnasında taban düzeyinde kalmaya devam eder. Bu etkileşimin sembolü (n,n) 'dir. Düşük enerjilerde (0,1 – 10 MeV) gerçekleşir.



Şekil 2.7 : Nötronun esnek saçılması.

Esnek olmayan saçılma

Esnek saçılmada olduğu gibi nötron, atom çekirdeğine çarptıktan sonra enerjisinin bir kısmını çekirdeğe aktarır ve farklı bir doğrultuda ilerler.



Şekil 2.8 : Nötronun esnek olmayan saçılması.

Ancak burada çekirdek uyarılmış düzeyde kalır ve gama ışını yayımlayarak bozunur (Şekil 2.8). Bu etkileşimin sembolü (n, n')'dir. Nötronun esnek olmayan saçılma ile çekirdeği uyarması için 10 MeV'den fazla enerjiye sahip olması gerekir.

Işınımlı yakalama reaksiyonları

Nötron çekirdek tarafından yakalanır ve bir veya daha fazla γ ışını yayımlanır. Gelen nötron tamamen soğurular ve böylece elementin kütle sayısı bir birim artar. Örneğin; Z atom numaralı ve A kütle numaralı bir ${}_Z^AX^A$ çekirdeğin nötronla etkileşimi sonucu;



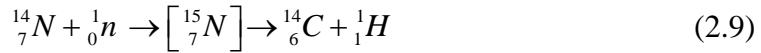
reaksiyonu oluşur. Bu etkileşimin sembolü (n, γ)'dir. Düşük enerjilerde gerçekleşir.

Yüklü parçacık tepkimeleri

Nötronla etkileşimi sonucu oluşan bileşik çekirdeğin, (n, α) veya (n,p) türü gibi soğurma reaksiyonlarıyla yüklü bir parçacık yayınlamasıdır. Örneğin (n, α) reaksiyonu;



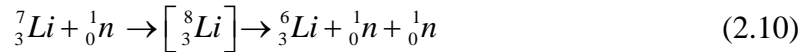
(n,p) reaksiyonuna örnek ise;



verilebilir.

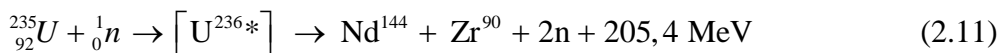
Nötron üreten tepkimeler

Bazen yüksek enerjili bir nötron yakalandığı zaman, (n, 2n) ve (n, 3n) gibi iki veya daha çok nötron yayımlanır. (n, 2n) reaksiyonu sonucu oluşan ürün çekirdek hedef çekirdeğin izotopudur. Örneğin;



Fisyon

${}^{235}\text{U}$ veya ${}^{239}\text{Pu}$ gibi ağır çekirdeklerin bir nötron soğurmasıyla daha küçük iki parçaya bölünmesi olayıdır. Bu reaksiyonda iki fisyon ürünüyle birlikte iki veya üç nötron ve büyük miktarda enerji açığa çıkar. Örneğin;



2.7 Atmosferdeki Hava Duşu

Kozmik bir parçacık atmosfere girdiğinde, çekirdeklerle etkileşim yoluyla kademeli olarak ikincil parçacıkları üretir. Bu kademeli sistemlere Geniş Hava Duşu adı verilir.

İkincil parçacık tipi ile tanımlanan iki kademe türü vardır: hadronik (protonlar veya daha ağır çekirdekler tarafından uyarılanlar) ve elektromanyetik duşlar (birincil gama, elektron veya pozitron).

2.7.1 Elektromanyetik duş

Elektromanyetik duşlar gama ışınları, elektronlar veya pozitronlar tarafından başlatılabilir. Birincil gama ışını, atmosferik çekirdeğin alanında, $\lambda_{\text{çift}} \approx 47 \text{ g/cm}^2$ karakteristik uzunluktaki çift üretim prosesi boyunca elektron-pozitron çifti yaratır. Çift oluşturulduktan sonra birincil gama kaybolur ve ikincil parçacıkların her biri birincil enerjinin yaklaşık yarısını alır.

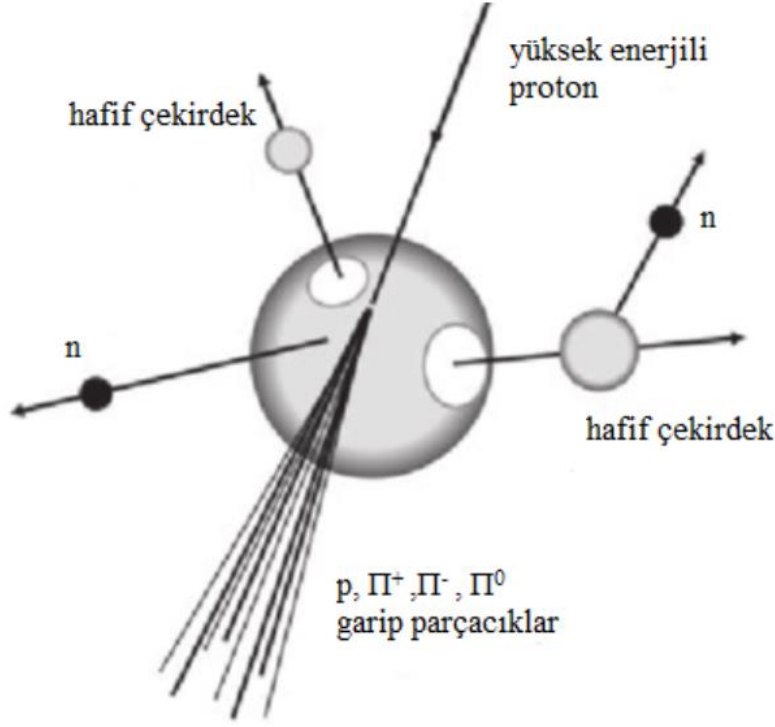
Elektron ve pozitron atmosfer boyunca hareket etmeye devam eder. Bremsstrahlung işlemi ile yüksek enerjili bir foton çıkana kadar, yaklaşık $36,2 \text{ g/cm}^2$ 'yi aşarlar. Bu adımlar, ikincil elektron enerjisi, Bremsstrahlung elektronun iyonizasyon kayıplarına eşit olarak kaybolduğunda kritik $E_{\text{kritik}} = 82 \text{ MeV}$ 'nin altına düşene kadar sürekli tekrar eder.

Gamaların aksine, birincil elektron hala ikinci bir Bremsstrahlung foton yayınlayacak kadar enerjiye sahip olabilir. İyonlaşma kayıpları baskın olduğunda durur. Bu elektron nedeniyle atmosferden geçerken birkaç yüksek enerjili fotonlar yayabilir. Bu ikincil fotonlar alt duş yaratır. Birincil elektronun enerjisi yeterince yüksekse ve Dünya'nın manyetik alanı nedeniyle güçlü bir şekilde sapmıyorsa, alt duşlar yerdeki aynı ışık havuzunu ışınlar. Bu, elektron kaynaklı duşun daha fazla sayıda ikincil parçacıklara ve buna bağlı olarak yüksek irtifalardan daha fazla sayıda Cherenkov fotonuna sahip olduğu anlamına gelir.

2.7.2 Hadronik duş

Yüksek enerjili bir hadron, büyük çoğunlukla proton, atmosferik çekirdeklerle güçlü bir kuvvetle etkileşime girdiğinde bir hadronik duş meydana gelir. Etkileşim her çeşit pionu, garip parçacıkları ve hadronları üretebilir.

Koni içinde hafif parçacıklar (iyonlar, hadronlar, garip parçacıklar) üretilir. Koninin genişliği, birincil hadron enerjisine bağlıdır. Şematik olarak, işlem Şekil 2.4' te tasvir edilmiştir.



Şekil 2.9: Atmosferdeki çekirdeklerle kozmik ışın etkileşiminin şematik gösterimi (Lypova, 2013).

İkincil nükleonlar ve pionlar atmosfer boyunca hareket eder ve diğer nükleonlarla etkileşimi nedeniyle parçacık demeti oluşur. Bu işlem, nükleon başına birincil enerji, pion üretimi eşliğinden daha büyük (yaklaşık 1 GeV) olana kadar devam eder. Bu pionlar esas olarak müon ve nötrinolara dönüşür:

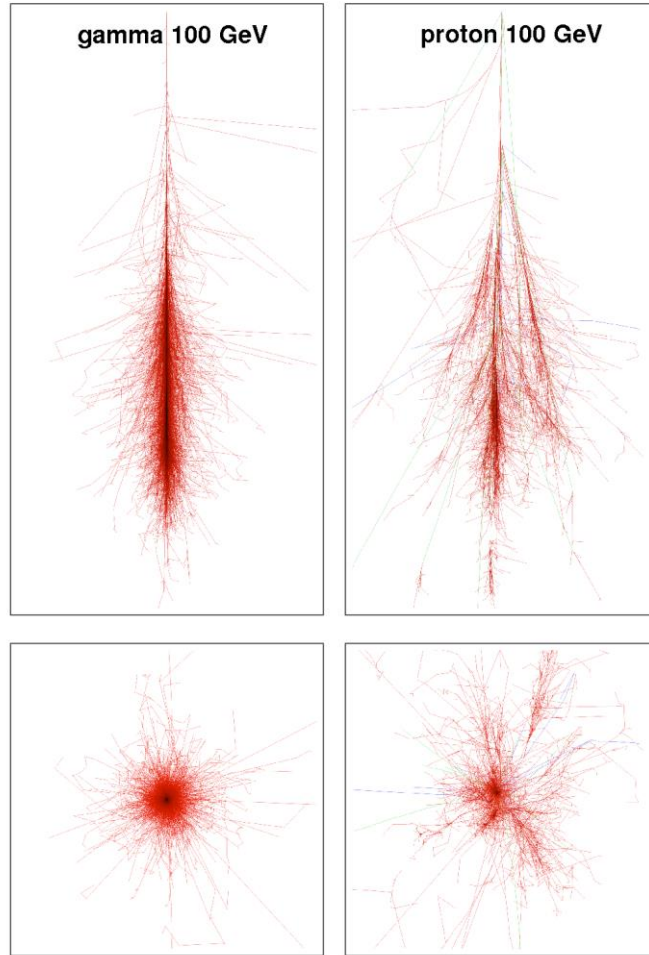
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.12)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.13)$$

Nükleer etkileşimin tipik uzunluğunun pionun bozunma uzunluğundan daha büyük olduğu atmosferin daha yüksek katmanlarında, yüksek enerjilik müonlar üretilebilir. Bu müonlar atmosferde derinlemesine nüfuz edebilir ve hatta yer seviyesine bile ulaşabilirler.

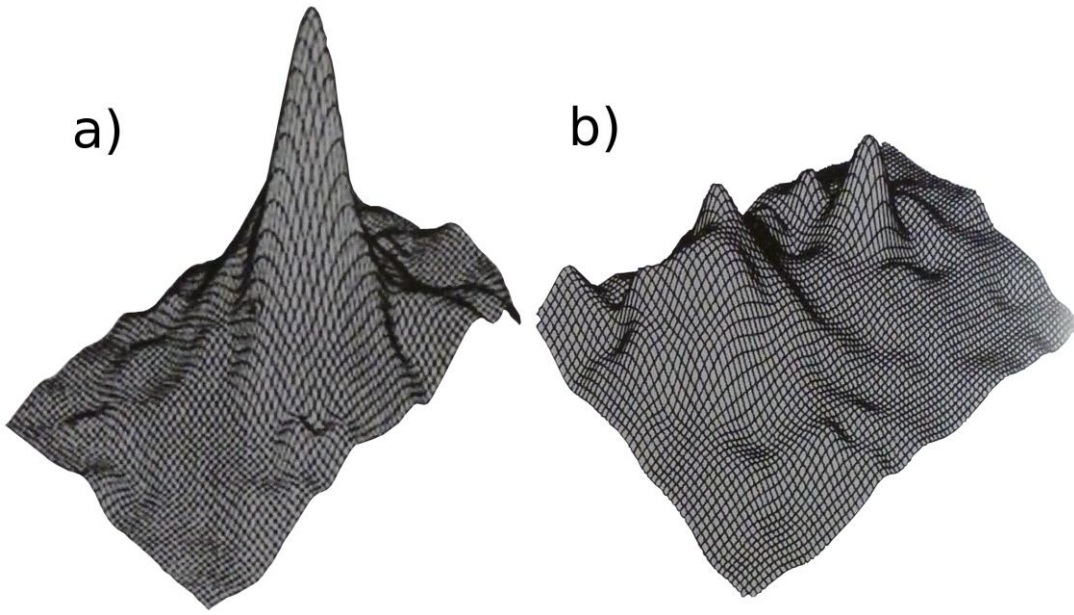
Hadronik ve elektromanyetik duşlar arasındaki ana farklar:

- Hadronik duşlar, ikincil parçacıkların çapraz momentumundan dolayı daha büyük yanal dağılıma sahiptir. Şekil 2.10'ta birincil enerjileri 100 GeV olan gama ve proton duşlarının dağılımlarındaki fark gösterilmiştir.
- Hadronik duşlarda Cherenkov ışığının ana kaynakları, elektromanyetik altduşlardır. Elektromanyetik bileşen esas olarak yüksüz pion bozunmasından sonra oluşur. Bütün iyon tipleri neredeyse eşit miktarda üretilir. Bundan dolayı, yüksüz iyonlar ve sonuç olarak elektromanyetik alt duşlar, birincil parçacık enerjisinin sadece bir kısmını alır. Sonuç olarak, hadronik duşlar aynı birincil enerjiye sahip elektromanyetik duşlardan daha zayıf görünür.



Şekil 2.10 : Gama ışını (solda) ve proton (sağda) kaynaklı hava duşunun karşılaştırılması. Üstteki görüntüler dikey gelişimi gösterir, alttaki görüntüler ise duşların yanal gelişimini gösterir. Kırmızı renk, foton, elektron ve pozitron izlerini, mavi renk - hadron izlerini, yeşil renk - müon izlerini temsil eder (Lypova, 2013).

- Eğer duş ağır paracak tarafından başlatılırsa, çok çekirdekli bir yapıya sahip olabilir. Atmosferik çekirdeğin çarpışmasından sonra ağır kozmik ışın, goreceli parçalanma fragmanlarının, protonların ve nötronların bir dağılımı ile hareket etmeye devam eder. Yüksek enerji parçaları alt duşları yaratabilir ve ana duşta çok çekirdekli bir yapıya yol açabilir. Proton duşunun (solda) tek çekirdekli yapısı ve ağır hadron duşunun (sağda) ok çekirdekli yapısı üzerinde bir karşılaştırma, Şekil 2.11' de gösterilmektedir.



Şekil 2.11 : Proton tek çekirdekli (a) ve ağır hadron çok çekirdekli (b) duşların merkezi bölgesinde parçacık yoğunluğunun dağılımı (Steinke, 2012).

3. RADYASYON TAŞINIMINDA MONTE CARLO TEKNİKLERİ

Monte Carlo yöntemi, rastgele sayılar kullanarak bir soruna makroskopik bir çözüm elde etmenin, istatistiksel bir yaklaşımdır. İlgili problemi tanımlayan olasılık dağılım fonksiyonlarının rastgele örnekleme içerebilir. Algoritmanın doğru olması ve fiziksel sistemin iyi modellenmesi koşuluyla, dağıtımların tekrarlanan örnekleme doğru çözüme yaklaşacaktır.

Monte Carlo yöntemi, 1940'ların sonlarında Stanislaw Ulam, John Von Neumann, Robert Richtmyer ve Nicholas Metropolis tarafından kullanılan nötron taşınım problemlerinin çözümüne yönelik istatistiksel bir yaklaşım olarak elde edildi. Daha sonraki yıllarda birçok merkez tarafından bilgisayar tabanlı, MCNP, GEANT4, OpenMC gibi Monte Carlo kodları geliştirildi.

Monte Carlo simülasyonunda radyasyon taşınımı, parçacıkların farklı adımlarla hareket ederek ve yol boyunca çeşitli türlerle etkileşime girerek gerçekleşir. Parçacık etkileşimlerinin stokastik yapısı, rasgele sayı üretici kullanılarak simüle edilir. Adım uzunluğu ve etkileşim tipi, geometrik kısıtlamalar dikkate alınarak kesit alanı verilerinden örneklendirilir. Uygun diferansiyel kesitlerin örnekleme, ortaya çıkan parçacıkların enerjisini ve yönünü belirler (Poon, 2004).

Monte Carlo yönteminin benzersizliği, istatistiksel yaklaşımındadır. Örnekleme ve çıkarım gibi istatistiksel yöntemlere dayanır. Bu, yöntemin yalnızca rastgele olayları veya işlemleri içeren sorunlara uygulanabileceği anlamına gelmez. Bununla birlikte, Monte Carlo araştırmasının ilk günlerinden itibaren, yöntem rastgele olayları incelemek için ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Radyasyon taşınımının doğası gereği rastgele bir işlem olması Monte Carlo tekniğine mükemmel bir örnektir. Klasik istatistiklerin aksine, Monte Carlo yönteminde örnekler gözlemlerden toplanmak yerine bilgisayar algoritması tarafından üretilir. Süreci temsil eden bir olasılık dağılım fonksiyonu üzerinden, bilgisayar kodlarının ürettiği düzenli rastgele sayıların

belirlediği rastgele örneklemeler takip edilir. Sonuçların ortalamasındaki değişim, örnekleme sayısı arttıkça azalır ve problemin çözümüne yaklaşılır.

Bilgisayar kodu içerisine gömülmüş nükleer kütüphaneler, parçacıkların her bir enerjilerindeki etkileşim olasılıklarını barındırır. Monte Carlo kodlarının ürettiği rastgele sayılar, bu olasılık dağılımları üzerinden hangi olayın gerçekleşeceğine karar vermede kullanılır. Bu rastgele sayıların nasıl dağılım gösterdiği sonuçları etkilemektedir. Üretilen rastgele sayıların, düzenli rastgele sayılar olarak dağılması gerekmektedir. Olasılıksal olarak sadece bir kısımda dağılması hesaplamalarda hataya sebep olur.

Monte Carlo yönteminin istatistiksel bir yöntem olması sebebiyle teorik sonuca ulaşamaz. Fakat örnekleme sayısının artması ile birlikte giderek hata oranı azalmaya başlar. Bu değişime varyasyon adı verilir ve Monte Carlo kodlarında sonuca, varyasyonu azaltarak ulaşılır. Örnekleme sayısının düşük olduğu durumlarda varyasyon yüksektir ve ne kadar fazla örnekleme sayısı olursa gerçek değere o kadar yaklaşılmaktadır. Bu sebeple örnekleme sayısı artırılarak varyasyon azaltılır ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulur.

Fiziksel bir problemi çözmek için genel Monte Carlo taslağı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Problem matematiksel olarak formüle edilir. Bu, ilgilenilen miktar için bir denklem veya denklem sistemine yol açan bir fenomen modeli geliştirmeyi içerir.
2. Sorunun istatistiksel bir yorumu, ilgilenilen miktarın bir dağılım parametresi, örneğin, ortalama veya bunun bir fonksiyonu olarak formüle edilir.
3. Dağılımın örneklenmesi için bir algoritma geliştirilir.
4. Parametre ve istatistiksel belirsizliği için “tahmin ediciler” türetilmiştir. Bunlar, örnek ortalaması ve örnek varyansı kadar basit olabilir. Radyasyon taşınımı hesaplamalarında tahmin edicilere çoğu zaman *tallies* denir.
5. Algoritma ve tahmin ediciler, istenilen istatistiksel belirsizlik seviyesine ulaşmada, gereken hesaplama süresini azaltmak için optimize edilmiştir. Bu hedefe sistematik hata veya sapma vermeden ulaşmak için kullanılan

yöntemler, genel olarak varyans azaltma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır.

6. Parametre tahmininin istenilen istatistiksel belirsizliğini elde etmek için yeterince büyük bir örnek üretilir.
7. Parametre ve belirsizliği, örnek kullanılarak tahmin edilir (Vassiliev, 2017)





4. GEANT4 SİMÜLASYON PROGRAMI

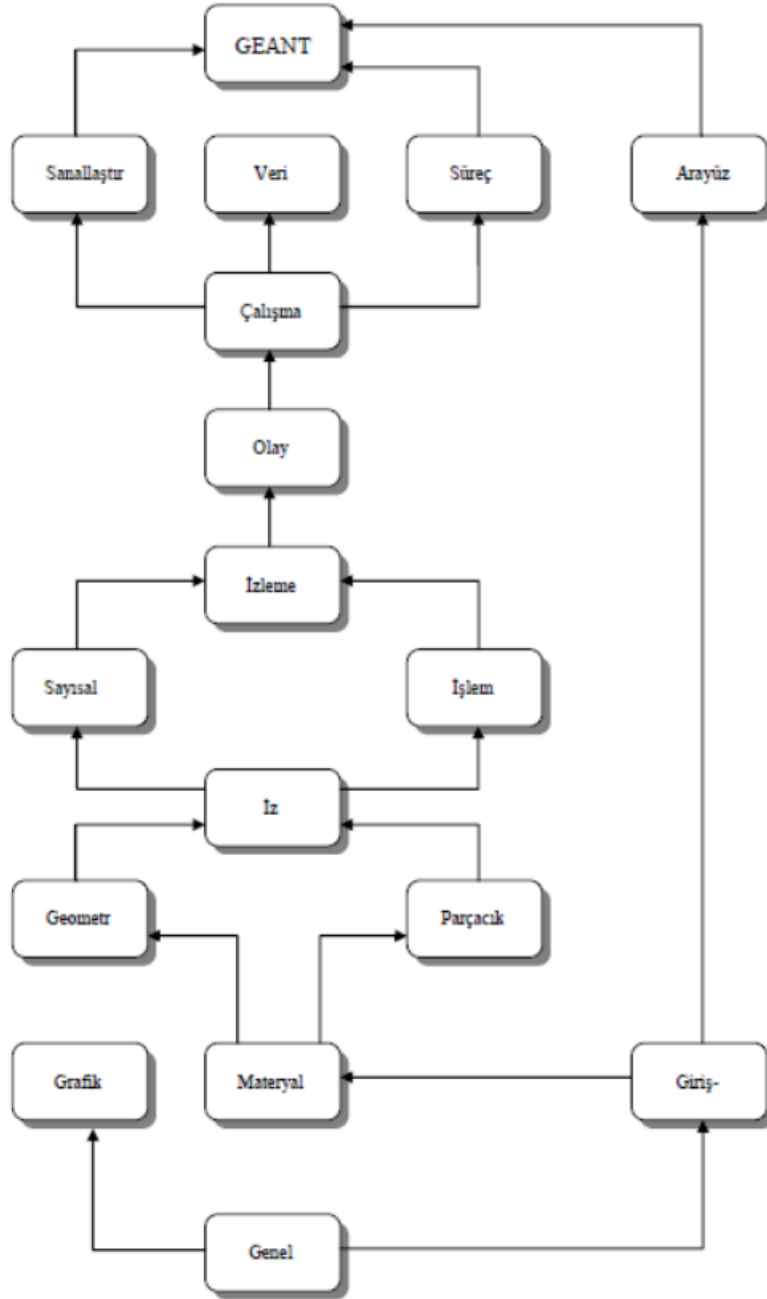
GEANT4 1993'te CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarı) ve KEK (Japon Ulusal Hızlandırıcı Merkezi) tarafından yapılan iki bağımsız projenin sonucudur. Her iki grup da mevcut GEANT3 programını geliştirerek yüksek enerjili parçacık fiziğinde parçacık dedektörü simülasyonu için bilgisayar yazılımı geliştirmeye çalışmışlardır. Daha sonra bu iki faaliyet birleşmiş ve nesneye yönelik programlamaya dayalı bir simülasyon programı oluşturmak için, CERN dedektör araştırma ve geliştirme komitesine bir teklif sunmuşlardır. Başlangıçta Avrupa, Rusya, Japonya, Kanada ve Amerika'dan katılan 100'den fazla bilim insanı ve mühendis işbirliğine katılmıştır. Aralık 1998'te ilk araştırma ve geliştirme çabaları tamamlanmış ve GEANT4 işbirliği Ocak 1999'da araç setinin geliştirilmesine ve iyileştirilmesine devam etmek, bakım ve kullanıcı desteği sağlamak amacıyla kurulmuştur. Günümüzde yüksek enerji fiziği, tıp, astronomi, uzay bilimi ve radyasyondan korunma gibi farklı araştırma alanlarında uygulanmaktadır.

4.1 GEANT4 Tasarımı

GEANT4, "GEometry ANd Tracking" (geometri ve iz sürme) isimlerinin kısaltılması olup parçacıkların madde içinden geçişinin ve madde ile etkileşiminin simülasyonunun yapılmasını sağlayan yazılım paketidir. GEANT4 nesneye yönelik programlama dillerinden C++ ile, ileri bir yazılım mühendisliği tekniği kullanılarak yazılmıştır.

GEANT4 , kapsamlı bir dizi parçacık, dedektör geometrisi, malzeme, takip yöntemi, dedektör yanıtı, görselleştirme ve kullanıcı arayüzü sunar. Ayrıca parçacıkların geniş bir enerji aralığında madde ile etkileşimlerini tanımlamak için elektromanyetik, hadronik ve optik gibi fizik işlemleri sağlar. Ek olarak, bir dizi rasgele sayı üretici, fizik birimleri ve sabitleri parçacık veri grubu uyumlu parçacık yönetimi de dahil olmak üzere geniş bir dizi yardımcı program vardır.

Kullanıcılar nesne yönelimli bir çerçeve üzerine (framework) tek başına uygulamalar inşa edebilirler. Modüler mimarisi, kullanıcının belirli ihtiyaçlara göre yalnızca gerekli modüler bileşenleri seçmesini sağlar. GEANT4 araç seti için ortak modüler ve hiyerarşik yapı, alt kategorilerin tek yönlü bir bağımlılık akışıyla bağlandığı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : GEANT4'ün hiyerarjik yapısı (Agostinelli ve diğ., 2013).

Şekil 4.1'deki şemanın altındaki kategoriler, neredeyse tüm üst kategoriler tarafından kullanılır ve araç setinin temelini oluştururlar. Genel kategori, sistem birimlerini,

sabitleri, nümerikleri ve rasgele sayı dağıtımını kapsar. “Material” ve “Particle” kategorileri, parçacık madde etkileşimlerinin simülasyonu için parçacık ve malzemelerin fiziksel özelliklerini tanımlamada kullanılır. “Geometry” kategorisi, geometrik bir yapı tanımlanmasını ve parçacığı etkin bir şekilde üretme becerisi sağlar. “Track” kategorisi “Processes” kategorisi tarafından kullanılan “iz” ve “adım”lar için sınıflar üretir. “Processes” kategorisi fiziksel etkileşim modülleri olan leptonların, fotonların, hadronların, iyonların ve hadroniklerin elektromanyetik etkileşimleri uygulamalarını içerir. Tüm işlemler iz durumunun (track’s state) değişikliğinde katkılarını yöneten ve “hits” ve “digitization” için hassas hacimde bilgi sağlayan “tracking” kategorisi tarafından çağrılır. “Event” kategorisi, olay’ları izler açısından yönetir, “run” kategorisi ise ortak bir ışın ve dedektör uygulamasını paylaşan olay’ların toplamlarını yönetir.

Genel olarak, parçacıkların madde ile etkileşim simülasyonunun ana kategorileri şunlardır.

- Geometri ve Malzemeler
- Parçacığın Madde İle Etkileşimi
- “Event” Ve “Tracking” Yönetimi
- “Digitization” Ve “Hit” Yönetimi
- Görselleştirme Ve Kullanıcı Arayüzü

4.1.1 Geometri ve malzemeler

GEANT4 çok sayıda farklı şekil ve malzemedeki bileşenlere sahip bir geometrik model oluşturma ve dedektör yanıtlarını simüle etmek için gereken bilgileri kaydeden hassas elamanları tanımlama yeteneğine sahiptir.

Dedektör yapısını tanımlamada kullanılan iki kavram vardır: “world” dış hacim ve “daughter” iç hacim. “World” hacmi, dedektörün ilk daughter hacmi için bir referans hacimdir ve tüm dedektör bileşenlerini üç boyutlu uzayda içeren en büyük hacim olarak düşünülmüştür. Her bir dedektör bileşeni, merkezi başka bir hacmin çerçevesindeki bir noktaya yerleştirilmiş geometrik bir hacim olarak tanımlanır. Bu hacimler elementler veya birleşikler olarak tanımlanan malzemeleri içerir. Bileşikler, kimyasal formülleri ve ağırlık oranları olarak verilen atomik bileşenleri ve belirli bir sıcaklık ve basınçtaki yoğunlukları ile tanımlanmıştır. Genel olarak, GEANT4 ’teki

geometri, simülasyona uygun malzemelerle oluşturulmuş hacimleri ifade eder. Bu geometriler, parçacık vuruşlarına (hits) dair bilgileri kaydeden hassas bileşenler olarak tanımlanabilirler.

4.1.2 Parçacığın madde ile etkileşimi

Maddedeki parçacık etkileşimi, parçacık tipleri ve enerjileri ile ilişkilidir. Birincil parçacıklar uygun fizik prosesleriyle başladıktan sonra, başka bir parçacığa çarpıp tüm enerjisini aktarıp durana, bozunana kadar veya dünya hacminin dışına çıkana kadar sistemde izlenir, buna “track” denir. Birincil parçacıkların üretilmesi; olay üretici ya da parçacığın tipi, konumu, hareket yönü ve kinetik enerjisi ile birleştirilmiş bir parçacık demeti oluşturabilen “parçacık atıcı” sınıfı kullanılarak yapılabilir.

Parçacıkların iki etkileşim noktası arasında ilerlemesi için uzay ve zaman koordinatlarının yanısıra enerjileri de güncellenmelidir. Bu nedenle, bir parçacık etkileşimi veya bozunmasında belirli bir başlangıç ve son durum halini ayırt etmek yararlı olacaktır. Etkileşim veya bozunma, (flight path) parçacığın izlediği yol boyunca atmosferik yoğunluk dağılımı ile birlikte bir hadronik reaksiyonun tesir kesiti ve olasılık ile belirlenir. Bir bozunma uzunluğu ve bir etkileşim uzunluğu rastgele olarak bağımsız bir şekilde belirlenir ve kısa olan asıl yol uzunluğu olarak alınır. Bu yöntemle ayrıca bir parçacık bozunması veya etkileşimi olup olmadığına karar verilir.

4.1.3 Fizik süreçleri

GEANT4 fizik süreçleri listesi; fotonların, elektronların, müonların, hadronların ve iyonların 250 eV’tan bir kaç PeV’a kadar kapsayan çeşitli tamamlayıcı ve alternatif fizik işlemleri içerir. GEANT4 fizik süreçleri leptonların, fotonların, hadronların, ve iyonların elektromanyetik etkileşimlerini oluşturur. Bu sınıf aşağıda listelendiği gibi alt bölümlere ayrılmıştır. Her alt gruba, farklı etkileşim süreçleri sağlanmıştır (Çizelge 4.1). Standart elektromanyetik süreç kategorisi, çeşitli elektron, pozitron, foton ve yüklü hadron etkileşimi uygulamalarını sağlar. Foton süreçleri compton saçılması, gama ışınının elektron ve müon çiftlerine dönüşümünü ve fotoelektrik etkileri sağlar. Elektron ve pozitron süreçleri arasında bremsstrahlung, iyonlaşma, gama ışını üretimi, pozitron yok olma ve senkrotron radyasyonu işlemleri bulunur.

Çizelge 4.1 : Elektromanyetik, hadronik ve diğer önemli etkileşimler (Agostinelli ve diğ, 2013).

Fizik Sınıfları	Etkileşimler
Standart	Çoklu Saçılma
	Geçiş radyasyonu
	Sintilasyon
	Cherenkov Etkisi
	Fotoabsorbsiyon
Müonlar	İyonizasyon
	Bremsstrahlung
	Müon Fotonükleer
	$e^- - e^+$ Çift üretimi
Elektronlar	İyonizasyon
	Bremsstrahlung
	$e^- - e^+$ anihilasyonu
	$\mu^- - \mu^+$ içinde $e^- - e^+$ anihilasyonu
	Hadronların içinde $e^- - e^+$ anihilasyonu
Sinkrotron Radyasyonu	
Gama	Fotoelektrik Etki
	Compton Saçılması
	$e^- - e^+$ içinde gama dönüşümü
	$\mu^- - \mu^+$ içinde gama dönüşümü
Hadron	İyonizasyon
	Delta-ışını Üretimi
Düşük Enerji	Compton Saçılması
	Rayleigh Saçılması
	Gama dönüşümü
	Fotoelektrik etki
	Bremsstrahlung
Optik Fotonlar	Optik fotonların etkileşimleri

Enerji kaybı süreci ise iyonlaşma ve bremsstrahlung nedeniyle parçacıkların sürekli enerji kaybı işlemleriyle ilgilidir. Tüm yüklü parçacıklar için çoklu saçılma olayı geçerlidir.

Üç proses müonların enerji kaybına katkıda bulunur: Bunlar bremsstrahlung, iyonlaşma ve elektron-pozitron çiftlerinin doğrudan üretimi şeklindedir. Her proses aynı zamanda farklı gama ışını üretim işlemlerini de simüle eder. Ayrıca GEANT4 , müonların hadron üretimi üzerindeki nükleer etkileşimini sağlar. Bu, 10 GeV üzerindeki enerjilerde yüksek enerjili müonlarda yüksek enerjili kozmik ışınların, müon yayılımının ve müon kaynaklı hadronik altyapı simülasyonu için önemlidir.

Yüklü hadronların sürekli enerji kaybı, temel olarak gama ışını üretiminin doğrudan işlemini de uyaran iyonizasyona katkıda bulunur. GEANT4, elektronların, pozitronların ve fotonların, kaonların ve nükleer parçaların enerji akışına dönüştüren foto nükleer reaksiyonları içerir.

GEANT4 'te elektronlar, fotonlar, pozitif ve negatif yüklü hadronlar ve pozitif yüklü iyonlar gibi parçacıkların düşük enerjili elektromanyetik fiziği için bir dizi fizik işlemi uygulanmaktadır. Düşük enerji süreçleri, fotoelektrik etki, Compton saçılması, Rayleigh saçılması, bremsstrahlung ve iyonizasyonu içerir. Deneysel verilere dayanan foton dönüştürme işlemi de uygulanmaktadır. Ek olarak uyarılmış atomlardan flüoresan emisyonu da dahildir. Elektron ve gama işlemlerinin uygulanması tesir kesitlerinin belirlenmesi için veri sağlayan veri kütüphanelerine dayanmaktadır.

4.1.4 Event ve tracking yönetimi

“Event” yönetimi simülasyondaki ana birimdir. “Event”, fizik harici olay üreticilere soyut bir arayüz sağlar. Fizik olay üretici bir fizik olayını tanımlayan birincil parçacıkları sağlar. Bu olay sınıfı, bir olayın süreci tamamladıktan sonra gerekli olmayan geçici bilgilerin saklanmasından kaçınır. Olayı işlemeden önce birincil köşeleri (primary vertices) ve birincil parçacıkları içerir. İşlemden sonra, simülasyon tarafından oluşturulan “hits” ve “digitizations” a sahiptir ve isteğe bağlı olarak, simüle edilmiş parçacıkların yörüngelerini depolayabilir.

Simülasyonda her parçacık ortamdan adım adım taşınır. G4Step sınıfı; koordinatlar, hacim, enerji ve momentum dahil, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki “track”

özelliklerindeki değişiklikleri depolar. G4Track adı verilen bir başka sınıf, her adımın tamamlanmasından sonra parçacığın son durumu hakkında bilgi tutar. “Tracking” verilen parçacık için tüm fizik işlemlerinin ve eylemlerinin tarar ve hangisinin çağrılacağına karar verir. Fizik sürecinde proses özellikleri üç izleme eylemi izleyerek gösterilir:

- *Durduğunda* parçacık bozunması
- *Adım boyunca* enerji kaybı veya ikincil parçacık üretimleri
- *Adım sonrası* bozunma veya etkileşimle ikincil parçacık üretimi

İzleme işleminin ana işlevleri aşağıda listelenmiştir:

- Parçacıkları izlemeden önce yapılan işlemler - ikincil parçacıkları temizleme
- Ön izleme kullanıcı müdahale süreci
- İstenirse bir yörünge inşa etme
- Fizik sürecine izlemenin başlangıcını bildirme
- Parçacık canlı iken adım adım izleme
- İzleme sonrası kullanıcı müdahale süreci
- Eğer oluşturulmuşsa yörüngeyi yok etme

4.1.5 Dijitalleştirme ve hit (vuruş) yönetimi

GEANT4 'te, bir vuruş, hassas bir dedektör bileşeninde fiziksel bir etkileşimin veya bir iz (veya izlerin) etkileşimlerinin birikiminin bir görüntüsüdür. Öte yandan, “digit” terimi bir dedektör çıktısını, örneğin bir ADC veya TDC sayımını veya bir trigger sinyalini temsil eder. Bir veya daha fazla vuruş ve / veya diğer dijit’lerden bir dijit oluşturulur. GEANT4 , hem dedektör hassasiyeti hem de vuruş veya dijit için yalnızca soyut sınıflar sağlar. Hassas bir dedektör, mevcut adımda verilen bilgileri kullanarak vuruş oluşturur. G4VHit sınıfından türetilmiş, kullanıcı tanımlı nesnelere olan “vuruşlar”, bir olay nesnesinde toplanır. İzleme zamanında, adım hassas bir dedektöre bir işaretçi içeren bir hacmin içindeyken, bu hassas dedektör mevcut adım bilgisi ile başlatılır. İzleme zamanında otomatik olarak çağrılan hassas bir dedektörün aksine, digitization (sayısallaştırma) modülünün kullanıcı kodu tarafından

başlatılması gerekir. Sayısallaştırma, olay işlemi sırasında, her olayın sonunda veya hatta bazı olayların işlenmesinden sonra da yapılabilir.

4.1.6 Görselleştirme ve kullanıcı arayüzü

OpenGL 37, DAWN 38 ve HepRep (Yüksek Enerji Fiziği Temsil Edilebilir) gibi GEANT4 araç setine entegre edilmiş üç ana görselleştirme sürücüsü vardır. OPENGL, 3D bilgisayar grafikleri üreten bir writing uygulaması için diller arası çapraz platform uygulamaları program etkileşimi tanımlayan standart bir özelliktir. Bu, gerçek zamanlı, hızlı görselleştirme için yaygın olarak kullanılır ve uygundur. DAWN, sunum veya dokümantasyon için teknik olarak yüksek kaliteli postscript çıktısı hazırlamak için çok uygun hassas görselleştirme sağlar. HepRep, simülasyondaki geometri modülünün ve yörüngelerin 3D temsillerini görselleştirmek için uygundur.

4.2 ROOT Analiz Programı

ROOT, yüksek enerji fiziği araştırmasının merkezinde, CERN'de doğan bir veri analizi aracıdır. Her gün binlerce fizikçi verilerini analiz etmek veya simülasyonlar yapmak için ROOT uygulamalarını kullanmaktadır. ROOT ile şunlar yapılabilir :

- Verileri kaydetme: Veriler (ve herhangi bir C ++ nesnesini) bir ROOT dosyasına sıkıştırılmış bir ikili biçimde kaydedilebilir. Nesne formatı da aynı dosyaya kaydedilir. ROOT dosyaları kendi kendini tanımlayıcı niteliktedir. Veri modelini tanımlayan kaynak dosyalarının bulunmaması durumunda bile, bir ROOT dosyasındaki bilgiler her zaman okunabilir durumdadır. ROOT, büyük miktarda verilere hızlı erişim için son derece güçlü bir veri yapısı sağlar; bu, normal bir dosyaya erişmekten bile daha hızlıdır.
- Verilere Erişme: Bir veya birkaç ROOT dosyasına kaydedilen verilere bilgisayardan, web'den ve kullanılan büyük ölçekli dosya dağıtım sistemlerinden erişilebilir. Birkaç dosyaya yayılan ROOT dalları, çok büyük miktarda veri üzerinde döngülere izin vererek özgün bir nesne olarak zincirlenebilir ve erişilebilir.
- Veri Madeni: Verileri kullanabilmek için güçlü matematiksel ve istatistiksel araçlar sağlanmıştır. Bir C ++ uygulamasının ve paralel işlemin gücü her türlü veri

manipölasyonu için kullanılabilir. İstatistiksel dağılımın ardından veriler üretilebilir ve modellenerek karmaşık sistemlerin simölasyonunu mümkün kılar.

- Sonuqların Yayınlanması: Sonuqlar histogramlar, dağılım grafikleri, fitting fonksiyonları ile gösterilebilir. ROOT grafikleri birkaç mouse tıklamasıyla gerçek zamanlı olarak ayarlanabilir. Sonuqlar PDF veya diqler formatlarda yüksek çözünürlüklü bir şekilde kaydedilebilir.
- İnteraktif biçimde çalıştırma veya kendi uygulamanızı oluşturma: İnteraktif oturumlar ve makro yazmak için Cling C ++ yorumlayıcısı kullanılabilir veya program tam hızda çalışacak şekilde derlenebilir. Her iki durumda da, grafiksel bir kullanıcı arayüzü oluşturulabilir.
- ROOT'u diqler dillerde de kullanma: ROOT, Python, R ve Mathematica gibi mevcut dillerle sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. (root, 2019)



5. DÜNYA ATMOSFERİNİN MODELLENMESİ VE DOZ HESAPLAMALARI

Bu tez çalışmasında simülasyonlar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birincisinde, Dünya atmosferi modellenip deniz seviyesinde ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda ikincil parçacıklardan gama, proton ve nötron akıları incelenmiştir. İkincisinde ise insan vücudu modellenip, önceki simülasyon çalışmasında iki farklı seviyede elde edilen enerji ve sayımlara göre doz hesabı yapılmıştır.

5.1 Atmosferin Modellenip İkincil Parçacıkların Oluşturulması

Simülasyon çalışmasının bu kısmında, yeryüzünden itibaren atmosferin, taban kenarları ve yüksekliği 80 km olan küp biçimindeki bölümü ele alınmış ve Dünya'nın yüzeyi düz kabul edilerek modellenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Dünya'nın elektrik ve manyetik alanı hesaba katılmamıştır.

5.1.1 Fizik süreçlerinin belirlenmesi

Monte Carlo simülasyonları, radyasyon taşınımının hesaplanmasında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. GEANT4, parçacıkların madde içerisinden geçişlerinin simülasyonu için bir yazılım araç seti olarak çok yönlülüğü nedeniyle mevcut olan birçok Monte Carlo simülasyon araç takımı arasında daha ön plandadır. Kullanıcı GEANT4'te, belirli simülasyon amaçları için uygun olan parçacık - madde etkileşimlerinde farklı modeller seçebilir. GEANT4 geniş fizik süreçlerine sahiptir, kullanıcı hangi fizik süreçlerini ekleyeceğini iyi bilmelidir çünkü eksik ya da hatalı olması simülasyon sonuçlarının yanlış olmasına sebep olmaktadır.

Bir "Fizik Listesi" oluşturmak veya GEANT4 tarafından sağlanan halihazırda var olan bir fizik listesinden seçim yapmak, büyük ölçüde yapılan çalışmaya bağlıdır. Fizik Listesi, uygulamanız için gereken tüm parçacıkları, fizik işlemlerini ve üretim

eşiklerini yöneten bir C++ sınıfı veya sınıflar topluluğudur. GEANT4, her sürümde rutin olarak doğrulanan ve güncellenen referans fizik listeleri sunar. GEANT4 tarafından sağlanan ve bazıları Çizelge 5.1' de sıralanan çeşitli fizik süreçleri ve modelleri vardır.

Çizelge 5.1 : GEANT4 fizik modelleri (Agostinelli ve diğ., 2013).

Model ismi	Uygulama
FTFP_BERT	Hadronlar için Bertini-style cascade (<5 GeV), yüksek enerjiler için FTF (Fritiof) modeli, HEP için önerilen tüm standart EM süreçlerini içerir.
QGSP_BERT	9,9 GeV'ye kadar Bertini-style cascade, yüksek enerjiler için QGS (Quark Gluon String) modeli (> 18 GeV).
QGSP_BIC	9,9 GeV'ye kadar Binary cascade model, yüksek enerjiler için QGS modeli (> 18 GeV).
FTFP_BERT_HP	Hadronlar için Bertini-style cascade (<5 GeV), yüksek enerjiler için FTF (Fritiof) modeli, 20 MeV altındaki nötronlar için High Precision modeli, tüm standart EM işlemlerini içerir.
QGSP_BIC_HP	9,9'a kadar Binary cascade model, yüksek enerjiler için QGS modeli (> 18 GeV), 20 MeV'nin altındaki nötronlar için High Precision model.

GEANT4 Nötron Veri Kütüphanesi (G4NDL), *Evaluated Nuclear Data Library* (ENDL) benzeyen dosya formatına dayanmaktadır. 20 MeV'nin altındaki enerjilere sahip nötronlarda; elastik saçılma için G4NeutronHPElastic, inelastik saçılma için G4NeutronHPInelastic, termal yakalama için G4NeutronHPCapture ve fisyon reaksiyonları için G4NeutronHPFission dahil olmak üzere High Precision (HP) süreçleri mevcuttur.

Binary Cascade (BIC), $A < 16$ için harmonik osilatör kabuğu ve $A > 16$ için Woods-Saxon modeli kullanan A ve Z 'den (A : nükleon sayısı Z : proton sayısı) inşa edilen üç boyutlu bir çekirdek modelidir. Bu modelde, her bir nükleon, bir Gauss dalga paketi olarak muamele görülür ve toplam çekirdek dalga fonksiyonu, bu dalga paketlerinin süperpozisyonundan üretilir.

Quark Gluon String Parton (QGSP) modeli, protonların, iyonların, kaonların ve çekirdeklerin yüksek enerji etkileşimleri için temel fizik listesidir. Yüksek enerji

etkileşimi uyarılmış bir çekirdek oluşturur, daha sonra nükleer uyarılmayı (nuclear de-excitation.) simüle eden ön bileşik modeline geçer.

Simülasyonda kullanılan fizik süreçleri

Bu çalışmada ilk olarak simülasyonun en önemli parçası olan, fizik süreçleri belirlenmiş ve programa dahil edilmiştir.

Kozmik ışınlar 10^{20} eV'a kadar enerjik parçacıklardan oluşur. Birincil kozmik radyasyon esas olarak proton, alfa ve daha ağır çekirdeklerden oluşmaktadır. Elektromanyetik işlemlerin yanısıra yüksek enerjili güçlü etkileşimler, ikincil kozmik parçacık duşunun üretimine yol açar. Yüksek enerjili birincil parçacıkların Dünya'nın atmosferi ile farklı irtifalardaki güçlü etkileşimlerinden oluşan yüklü pionlar, kaonlar, diğer mezonlar ve hiperonlar atmosferdeki hadron akısına katkıda bulunmaktadır.

Pionlar, kaonlar ve diğer parçacıklar gibi kararsız parçacıkların yanı sıra, yeterli enerjileri varsa hadronlar, hadronik etkileşimleri başlatacak, geniş hava duşlarının temelini oluşturan ikincil parçacıklar üretecektir. Bu nedenle hadronik, elektromanyetik ve radyoaktif bozunmalar simülasyon çalışmamıza eklenmesi gereken en önemli süreçlerdir.

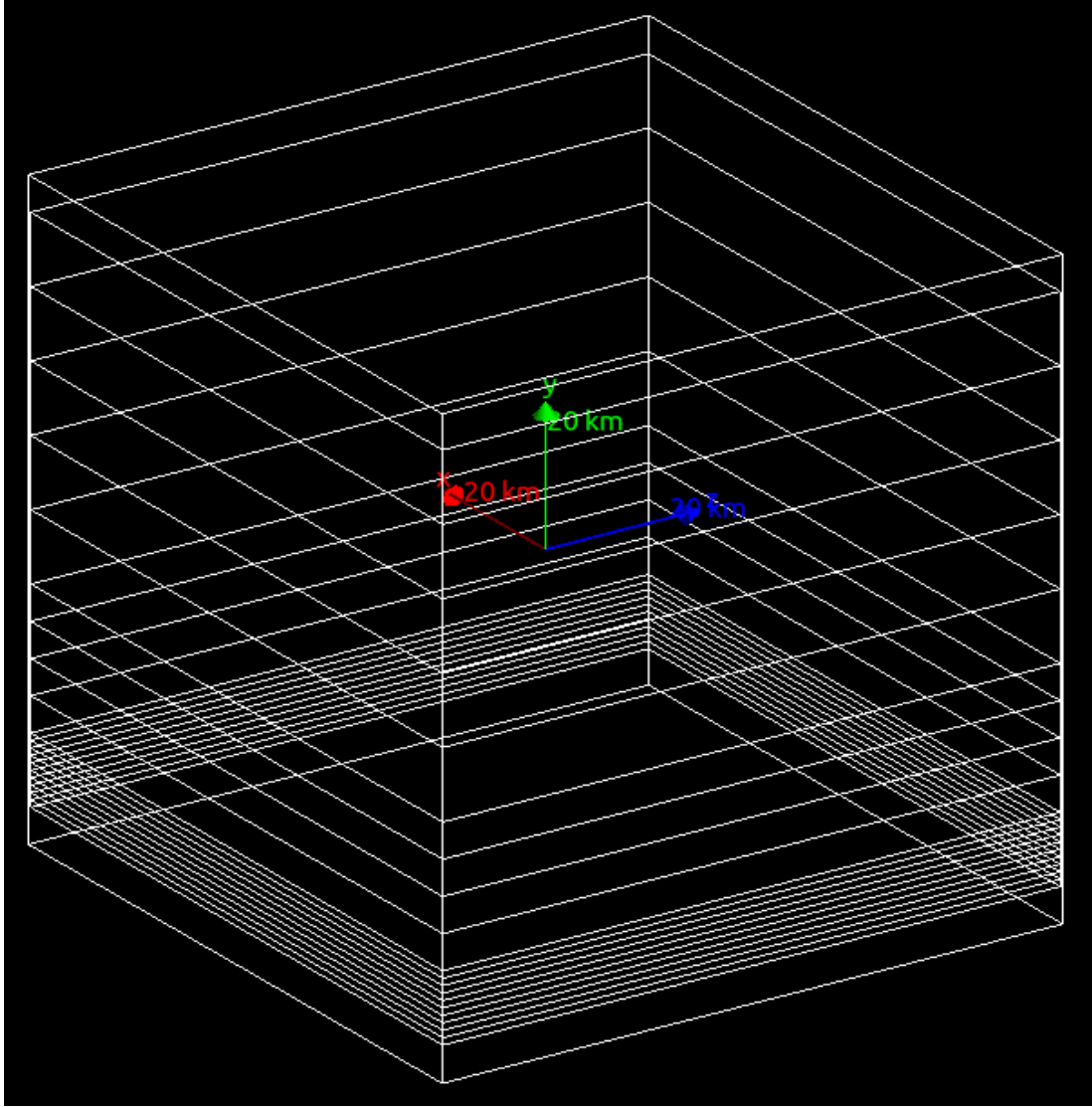
GEANT4'te bulunan standart elektromanyetik paket, elektromanyetik etkileşimler için kullanılırken, hadronik etkileşimler için enerji aralığına bağlı olarak GEANT4'ün farklı modelleri kullanılır. Yüksek enerjiler için (> 10 GeV), quark-gluon string model, 10 GeV'den daha düşük enerjilerdeki nükleonlar için binary intranuclear cascade modeli seçilmiştir. 20 MeV'den daha düşük enerjili nötronlar için ise ENDF veritabanını temel alan G4NeutronHP modeli kullanılmıştır.

Simülasyonda G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP, hadronik etkileşimler için tüm paketleri içermektedir. Ayrıca, radyoaktif iyonların bozunum etkileşimleri için G4RadioactiveDecayPhysics kullanılmıştır.

5.1.2 Geometri tasarımı ve materyallerin belirlenmesi

Bu çalışmada, yeryüzünden itibaren atmosferin, taban kenarları ve yüksekliği 80 km olan küp biçimindeki bölümü ele alınmış ve ayrıca Dünya'nın yüzeyi düz kabul edilmiştir.

Şekil 5.1’de gösterildiği gibi kalınlıkları, deniz seviyesi ile 10 km arası 1 km, 10 ile 30 km arası 5 km ve 30 ile 80 km arası da 10 km olacak şekilde katmanlara ayrılarak 19 kübik geometri katmanının üst üste binmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 5.1 : GEANT4’te oluşturulan kübik atmosfer modeli.

Her bir atmosfer tabakasına ait sıcaklık, basınç ve yoğunluk değerleri “U.S Standard Atmosphere 1976” baz alınarak hesaplanmıştır (U.S Standard Atmosphere, 1976). Bu değerler Çizelge 5.2’ de gösterilmiştir. Ve ayrıca atmosfer, % 78,08 N, % 20,946 O, % 0,934 Ar, % 0,033 CO₂, % 0,001818 Ne, % 0,000524 He, %0,000179 CH₄, % 0,0001 Kr, % 0,00005 H, % 0,000009 Xe bileşenlerinden oluşturulmuştur (MGM, 2018). Ek B’de tasarlanan geometri ve materyaller kodlarının önemli kısımları verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Deniz seviyesinden itibaren irtifaya bağlı olarak sıcaklık, basınç ve yoğunluk değişimi (U.S Standard Atmosphere, 1976).

Deniz Seviyesinden İtibaren Yükseklik (m)	Sıcaklık (°C)	Basınç (10^4 N/m)	Yoğunluk (kg/m^3)
0	15,00	10,13	1,225
1000	8,50	8,89	1,112
2000	2,00	7,950	1,007
3000	-4,49	7,012	0,9093
4000	-10,98	6,166	0,8194
5000	-17,47	5,405	0,7364
6000	-23,96	4,722	0,6601
7000	-30,45	4,111	0,5900
8000	-36,94	3,565	0,5258
9000	-43,42	3,080	0,4671
10000	-49,90	2,650	0,4135
15000	-56,50	1,211	0,1948
20000	-56,50	0,5529	0,08891
25000	-51,60	0,2549	0,04008
30000	-46,64	0,1197	0,01841
40000	-22,80	0,0287	0,003996
50000	-2,50	0,007978	0,001027
60000	-26,13	0,002196	0,0003097
70000	-53,57	0,00052	0,00008283
80000	-74,51	0,00011	0,00001846

Dünya atmosferine ulaşan birincil kozmik ışınların %99 gibi büyük bir kısmını, proton ve helyum atomunun çekirdeği (alfa parçacığı) oluşturmaktadır. Balonlar yardımıyla, üst atmosferde yapılan ölçümlerde, farklı enerji değerlerindeki proton ve helyum akıları elde edilmiştir. Bu değerlerin dağılımı Şekil. 5.2 ve Şekil. 5.3'te gösterilmiştir. Çalışmamızda proton ve alfa parçacıkları, atmosferin en üst tabakasından yani yerden 80 km yukarıdan dünya atmosferine dik olacak şekilde ayrı ayrı gönderilmiştir.

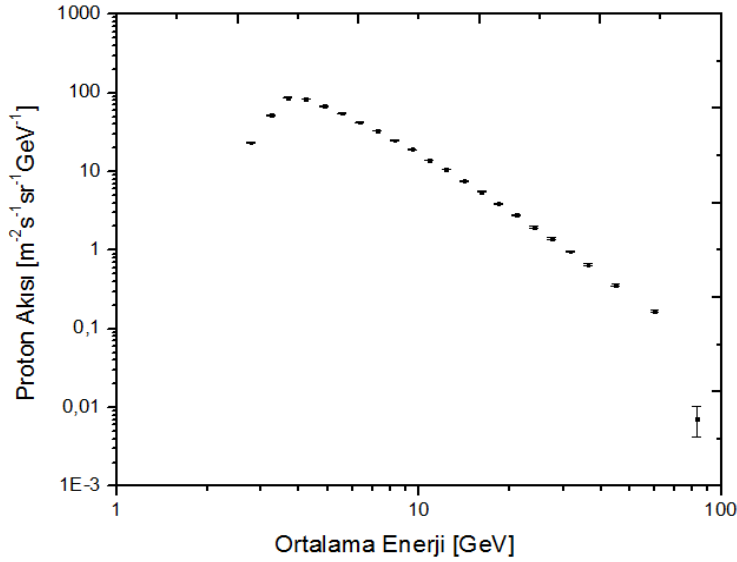
Parçacığın konumu ve hangi yönden gönderileceği *PrimaryGeneratorAction* sınıfında tanımlanır.

“ fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,-1.,0.))”

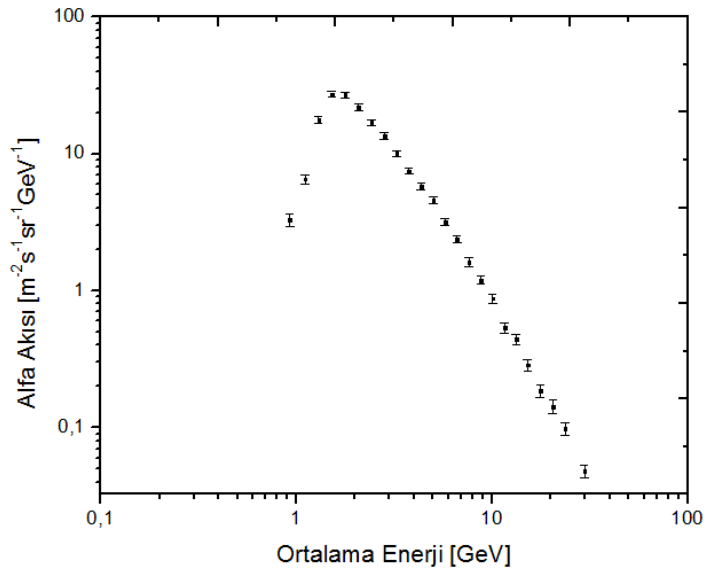
kodu parçacığın -y yönünde, yani dünya atmosferine dik olacak şekilde gönderilmesini talimat verir.

“fParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.*km,40.1*km,0.*km))” kodu ise parçacığın hangi konumdan gönderileceğini gösterir (Burada parçacık x ve z

yönünde merkezde olup sadece y konumundan gönderilir. 40,1 km ifadesi GEANT4 için 80,2 km demektir. Çünkü GEANT4 Şekil 5.1’de gösterildiği gibi oluşturulan geometrinin merkezini (0, 0, 0) kabul edip + ve – yönlerde yarı yarıya yerleştirme yapar).



Şekil 5.2 : Simülasyonda kullanılan birincil proton akısı.



Şekil 5.3 Simülasyonda kullanılan birincil alfa akısı.

Yukarıdaki grafiklerdeki değerlerin ayrıntılı açıklaması ise Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’te verilmiştir. Bu değerler Bellotti’nin 1999’daki atmosferin üst kısımlarında balon ölçümlerinde elde ettiği enerji ve akı değerleridir.

Çizelge 5.3 : Atmosferin üst kısmına ulaşan proton akıları (Bellotti, 1999).

Kinetik Enerji Aralığı (GeV)	Ortalama Enerji (GeV)	Akı (cm².sr. s. GeV) -1
2,55 - 2,95	2,77	0,002310
2,95 - 3,41	3,21	0,005184
3,41 - 3,93	3,68	0,008690
3,93 - 4,52	4,22	0,008346
4,52 - 5,19	4,85	0,006766
5,19 - 5,95	5,56	0,005480
5,95 - 6,81	6,36	0,004204
6,81 - 7,78	7,28	0,003283
7,78 - 8,89	8,31	0,002490
8,89 - 10,1	9,49	0,001918
10,1 - 11,6	10,8	0,001390
11,6 - 13,2	12,3	0,001066
13,2 - 15,1	14,1	0,000763
15,1 - 17,2	16,1	0,000552
17,2 - 19,7	18,3	0,000389
19,7 - 22,5	21	0,000279
22,5 - 25,7	24	0,000195
25,7 - 29,5	27,5	0,000140
29,5 - 33,9	31,6	0,000096
33,9 - 39	36,3	0,000065
39 - 52,2	44,8	0,000036
52,2 - 71	60,3	0,000017
71 - 99,1	83	0,000007

Simülasyon çalışmasında enerji ve akı değerleri göz önüne alınarak Dünya atmosferine dik olacak biçimde, demet olarak gönderilen birincil proton ve alfanın sayım değerleri hesaplanmıştır. Örneğin;

Akı (cm².sr.s.GeV)⁻¹ ; 1 saniyede, 1 cm²'lik alanda 1 steradyan'lık derecede 1GeV'lik enerji değeridir.

Bu nedenle simülasyonda belli enerji değerlerinde, 4π'de, 1 m²'lik alanda saniyede göndereceğimiz parçacık sayısı hesaplandı. 0,008690 (cm².sr.s.GeV)⁻¹ 'lik akı değerinde olan 3,68 GeV enerjide göndereceğimiz adet sayısını aşağıdaki gibi bulabiliriz :

$$= 0,008690 \times 3.68 \times 4\pi \times 1 \times 10^4 \cong 4019 \quad (5.1)$$

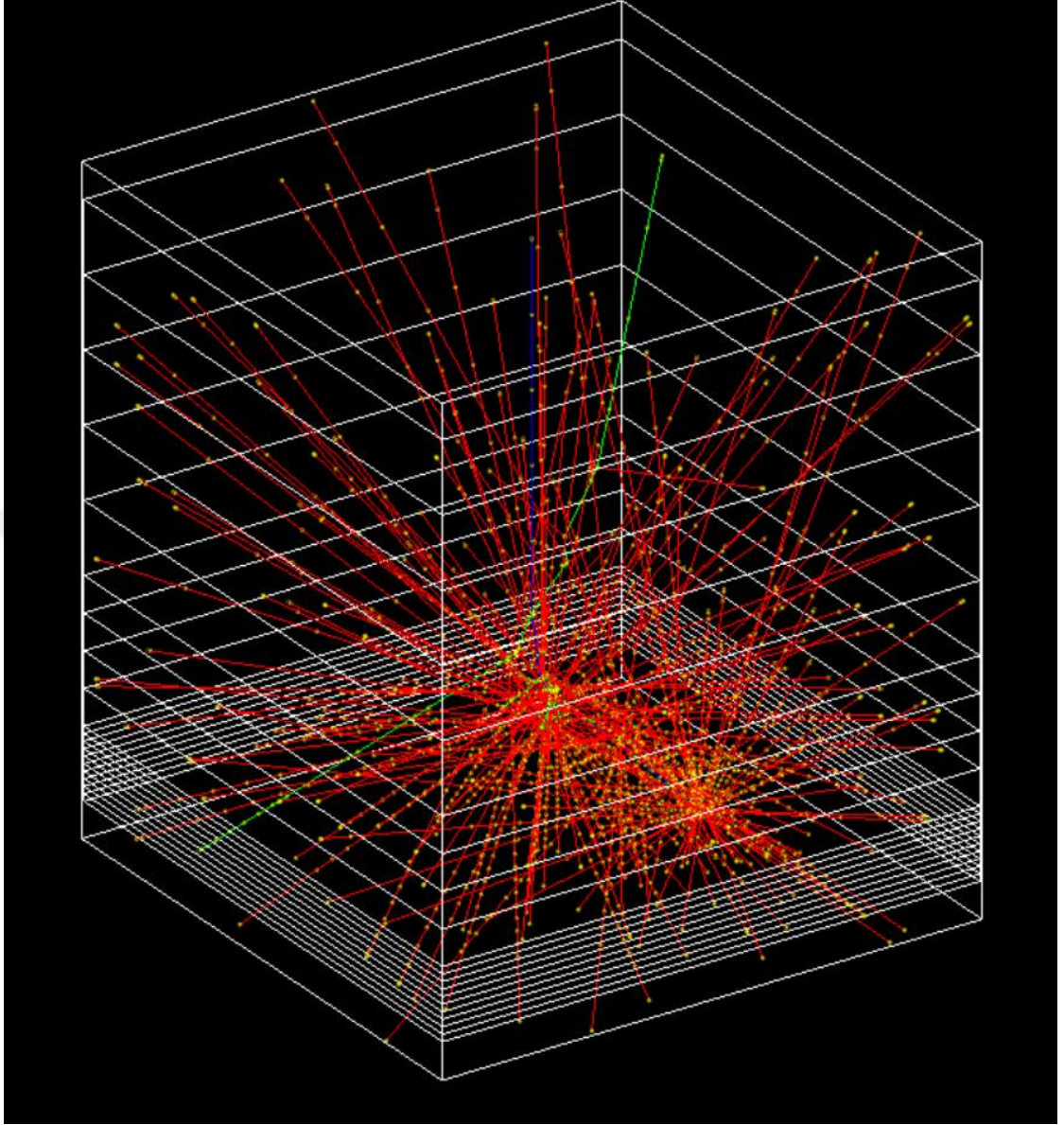
Böylece tüm değerler için hesaplandığında Ek E'de (Çizelge A.1 ve Çizelge A.2) atmosferden gönderilen parçacıkların türlerine göre enerji ve sayım değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Atmosferin üst kısmına ulaşan alfa akıları (Bellotti, 1999).

Kinetik Enerji Aralığı (GeV)	Ortalama Enerji (GeV)	Akı (cm².sr. s. GeV)⁻¹
0,841 - 1,00	0,927	0,00033
1,00 - 1,19	1,11	0,000653
1,19 - 1,40	1,30	0,00177
1,40 - 1,64	1,52	0,00272
1,64 - 1,92	1,78	0,0027
1,92 - 2,24	2,08	0,00219
2,24 - 2,62	2,42	0,00169
2,62 - 3,03	2,82	0,00135
3,03 - 3,51	3,26	0,00101
3,51 - 4,06	3,77	0,000748
4,06 - 4,68	4,36	0,000578
4,68 - 5,39	5,02	0,000458
5,39 - 6,20	5,77	0,000317
6,20 - 7,13	6,64	0,000238
7,13 - 8,20	7,63	0,000162
8,20 - 9,42	8,77	0,000119
9,42 - 10,8	10,1	0,0000875
10,8 - 12,4	11,6	0,0000536
12,4 - 14,3	13,3	0,0000444
14,3 - 16,5	15,3	0,0000286
16,5 - 19,1	17,7	0,0000186
19,1 - 22,1	20,5	0,0000142
22,1 - 25,7	23,7	0,0000098
25,7 - 35,0	29,7	0,0000048
35,0 - 49,1	41,0	0,000002

Protonlar ve alfa parçacıkları için birincil olaylar, kullanıcı tarafından tanımlanan bir sınıfta üretilmiş olup, ikincil parçacık akıları ise, ROOT analiz programı kullanılarak deniz seviyesi ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere 2 farklı irtifada, histogram ve text dosyası olarak kaydedilmiştir. Bu 2 farklı irtifa GEANT4'te TrackingAction dosyasında tanımlandı. (Ek D).

Şekil 5.4'te, GEANT4'te, tasarlanılan atmosferin en üst tabakasından 1 GeV enerjide 1 adet proton gönderilerek oluşan simülasyon örneği gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : GEANT4 'te Simülasyon Örneği.

5.2 Doz Hesaplamalarının Yapılması

Kozmik ışın birincil etkileşimlerinde veya daha sonraki etkileşimlerinde üretilen ikincil parçacıkların enerji spektrumu, uygun bir fizik listesi kullanılarak GEANT4 simülasyon araç seti ile simüle edilebilir. Bu ikincil spektrumlar farklı irtifalarda, toplam dozu eşdeğer olarak değerlendirmek için kullanılabilir.

İkincil nötron, gama ve protonların akısı GEANT4' ten elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiş ve histogramlar ROOT ile hesaplanmıştır. Bu ikincil spektrumlar daha sonra farklı irtifalarda absorbe dozu hesaplamak için kullanılmıştır.

Absorbe doz, çeşitli iyonlaştırıcı radyasyonların neden olduğu gerçek biyolojik etkiyi göstermediğinden, Uluslararası Radyolojik Koruma Konseyi'nin önerisine göre eşdeğer dozlara dönüştürüldü. Absorbe edilen doz, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$Doz = (dE / dm)(Gy) \quad (5.2)$$

dE, radyasyonun bir malzemede biriktirdiği enerji ve dm, radyasyona maruz kalan malzemenin kütlesidir. Eşdeğer doz denklem 5.3'deki gibi tanımlanabilir.

$$Eşdeğer Doz = w \times D (Sv) \quad (5.3)$$

İlk simülasyonda elde edilen enerji değerleri, GEANT4'te yazılan koddan dolayı, ROOT'ta elde edilen sonuçlar logaritmikti. Bu nedenle ilk olarak enerji dönüşümleri onluk tabana göre yapıldı. Örneğin;

$$\log_{10} x = -3,9775, \quad x = 0,000105317 \text{ MeV} \quad (5.4)$$

şeklinde bütün enerji değerleri excel dosyasında dönüştürülmüştür. Atmosferdeki akı değerlerine göre gönderilen proton ve alfadan elde edilen ikincil gama, nötron ve protonun toplam sayım değerleri hesaplanmış ve enerji değerleriyle birlikte doz hesabı için gönderilen ortalama enerji, temsili olarak şu şekilde hesaplanmıştır :

Çizelge 5.5 : Doz hesabı için gönderilecek ortalama enerjinin temsili olarak hesaplanması.

Sayım	Enerji (MeV)	Enerji*Sayım
a	e	a*e
b	f	b*f
c	g	c*g
d	h	d*h
Toplam:	a+b+c+d	a.e + b.f + c.g + d.h

$$Ortalama Enerji = \frac{\sum(\text{sayım} \times \text{enerji})}{\text{toplam sayım}} \quad (5.5)$$

Buradaki toplam sayım değeri aynı zamanda GEANT4'te gönderilen "beamOn" değeridir. Yukarıdaki örnek hesaplama, deniz seviyesi ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere gama,nötron ve proton için ayrı ayrı yapıldı.

GEANT4 doz hesaplamalarını "Action" sınıflarında yapar, bunun için gönderilen ortalama enerji PrimaryGeneratorAction sınıfında yazıldı.

Örneğin nötron için;

```
particleTable->FindParticle(particleName="neutron");  
fParticleGun->SetParticleEnergy(94.15536*MeV);
```

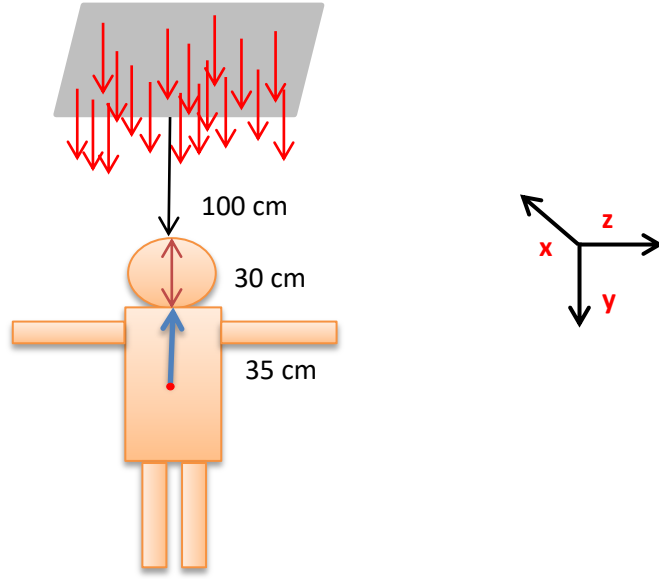
şeklinde tanımlanır.

Doz hesaplamaları için tasarlanılan geometri

Simülasyon çalışmasının ilk aşamasında elde edilen enerji ve sayım değerleri doz hesaplamalarında kullanıldı. Bunun için ayrı bir simülasyon çalışması yapılarak, yeni bir geometri tasarlandı.

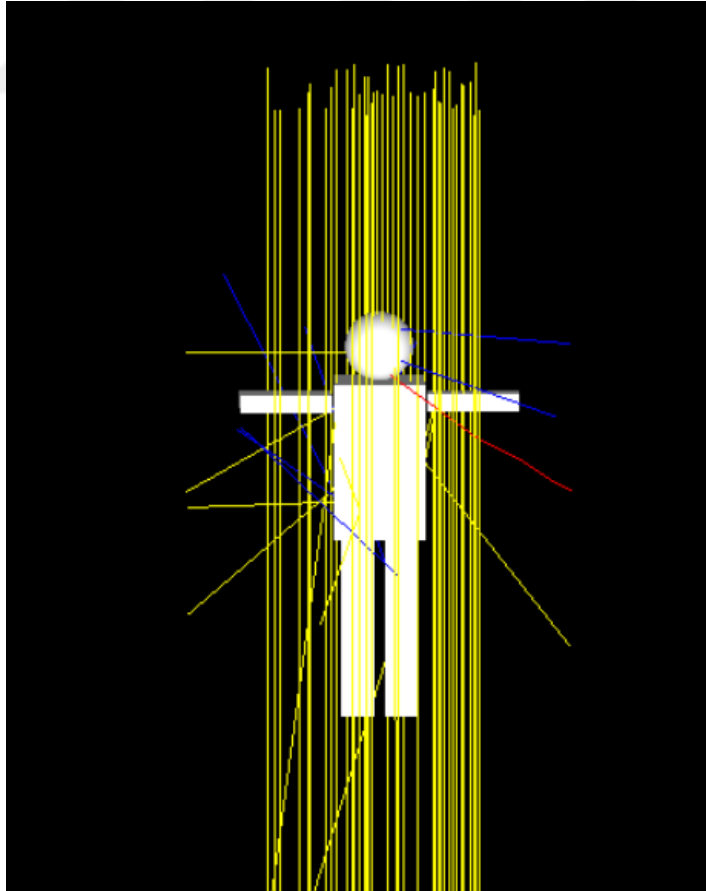
Bu doz hesapları insan dokusu üzerinde inceleneceği için, DetectorConstruction sınıfında ortalama bir insan vücudu tasarlanıp, GEANT4'te doku örneği için kullanılan G4_A-150_TISSUE materyali kullanıldı. Elde edilen ortalama enerji değerleri insan vücudunun yaklaşık 1 m yukarısında, 1 m²'lik alandan rastgele şekilde gönderilmiştir. GEANT4'te tasarlanan insan vücudu ve parçacığın gönderilme şekli temsili olarak Şekil 5.5'te gösterilmiştir (Doz hesabı için tasarlanan DetectorConstruction kodları Ek C'de verilmiştir.). İnsanın 1 m yukarısından, 1m²'lik alandan rastgele gönderilen parçacık PrimaryGeneratorAction'da şu şekilde ifade edilmiştir:

```
G4double cosTheta = 2*G4UniformRand() - 1., phi = twopi*G4UniformRand();  
G4double sinTheta = std::sqrt(1. - cosTheta*cosTheta);  
G4double ux = sinTheta*std::cos(phi),  
         uy = sinTheta*std::sin(phi),  
         uz = cosTheta;  
G4double x = (G4UniformRand() - 0.5)*1.*m;  
G4double z = (G4UniformRand() - 0.5)*1.*m;  
G4double y = 165.*cm;  
fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,-1.,0.));  
fParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(x,y,z));
```



Şekil 5.5: GEANT4 'te tasarlanan insan vücudu ve gönderilen parçacıkların temsili gösterimi.

Şekil 5.6'da ise GEANT4 'te tasarlanan temsili insan vücudu ve 1 m yukarısından rastgele olmak üzere 94,155 MeV enerjide 50 nötron gönderilmesiyle oluşan simülasyon örneği gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : GEANT4 'te doz hesabı için yapılan geometri ve simülasyon örneği.

6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

İki aşamalı olarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında ilk olarak deniz seviyesi ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere gama, nötron ve protonların akısı incelenip Origin programıyla grafikleri çizilmiş olup 2. Aşamada ise bu seviyelerdeki doz hesabına katkıları incelenmiştir.

6.1 Farklı Seviyelerde İkincil Parçacıkların, Simülasyonda Elde Edilen Akıları

Yeryüzünün yaklaşık 80 km yukarısından gönderilen birincil kozmik ışınların, etkileşimlere girerek oluşturduğu ikincil gama, nötron ve protonların enerji spektrumları GEANT4 simülasyon aracı kullanılarak 2 farklı seviyede incelenmiştir.

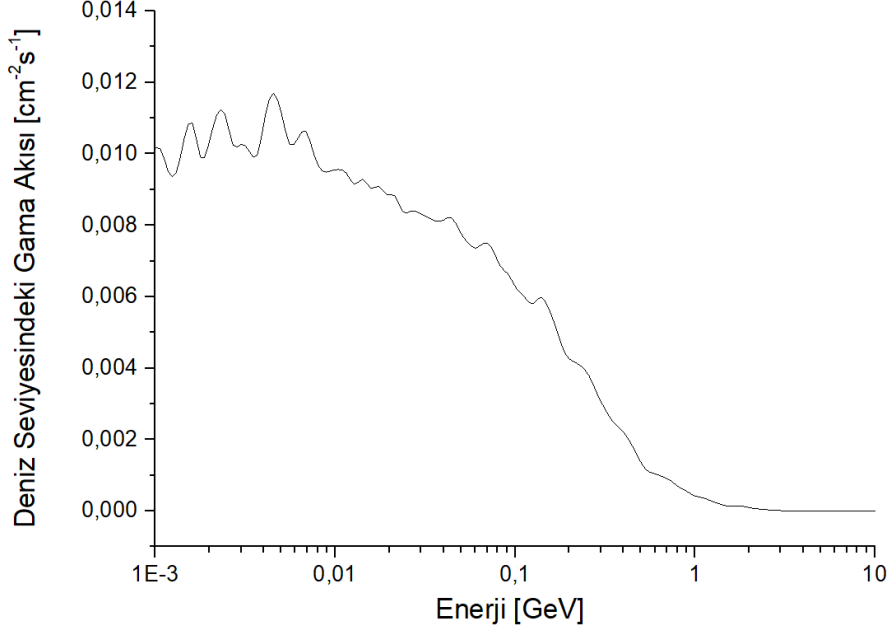
Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki kozmik ışınlar

Atmosferdeki birincil kozmik radyasyonun etkileşim süreçleri, farklı ikincil parçacık bileşenlerine yol açar. Çeşitli parçacık tiplerinin maruz kaldığı spesifik etkileşim mekanizmaları nedeniyle, akılarının atmosferdeki yolları boyunca zayıflamaları farklıdır. Bir diğer önemli özellik, kararsız parçacıkların ortalama ömrüdür. Çoğunlukla göreceli ve zaman genişlemesi nedeniyle uzun ömürlü olmalarına rağmen, üretim noktasından deniz seviyesine kadar var olma olasılığı, parçacık tipine, yük durumuna, enerjisine, yayılma açısına ve ortalama ömrüne bağlıdır.

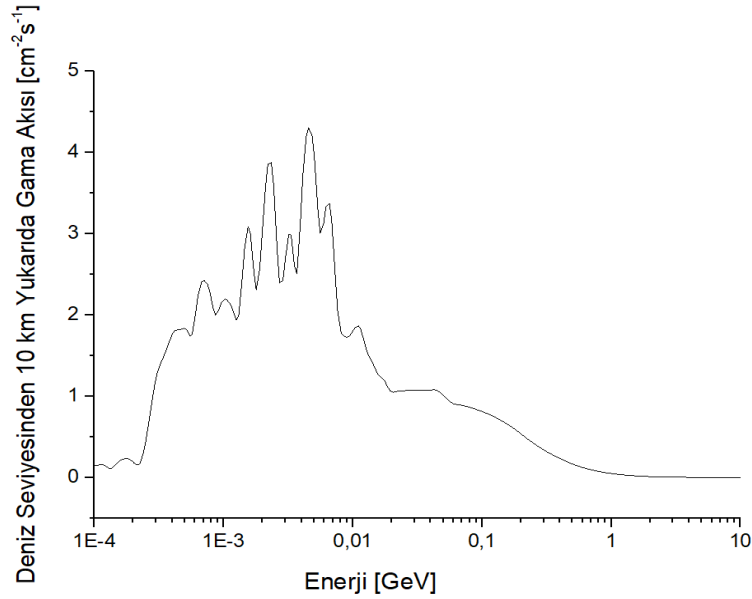
Enerjik protonlar ve nötronlar çoğunlukla güçlü etkileşimlerle enerji kaybederler, ağır çekirdekler hava moleküllerinin çekirdeği ile çarpışmalarda parçalanır ve elektronlar ve fotonlar elektromanyetik enerji kaybı işlemlerine maruz kalır. Ek olarak, tüm yüklü parçacıklar iyonlaşma kayıplarına maruz kalırlar. Ortalama ömrü 10^{-12} sn'den kısa olan parçacıklar bölgesel olarak üretilmedikleri sürece deniz seviyesinden aşağıda var olma olasılıkları neredeyse yoktur. Parçacıkların maksimum yoğunluğu, 15 km yükseklikte veya uçak irtifalarının hemen üstünde meydana gelir. Kozmik ışın yoğunluğunun en fazla olduğu yer, aynı zamanda birçok ticari uçak uçuşunun irtifası olan yaklaşık 10 - 25 km'de gerçekleşir.

6.1.1 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki gama ışınları

Atmoseferin en üst katmanından gönderilen proton ve alfadan elde edilen ikincil gama ışınlarının deniz seviyesinde ve deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki akısı incelenmiştir. Gerekli dönüşümler yapılarak ROOT analiz programından elde ettiğimiz verilere göre grafikler; GeV mertebesindeki enerjiye karşılık akı ($\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$) değerlerine göre çizilmiştir (Şekil 6.1, Şekil 6.2).



Şekil 6.1 : Deniz seviyesindeki gamaların enerjiye göre akısı.



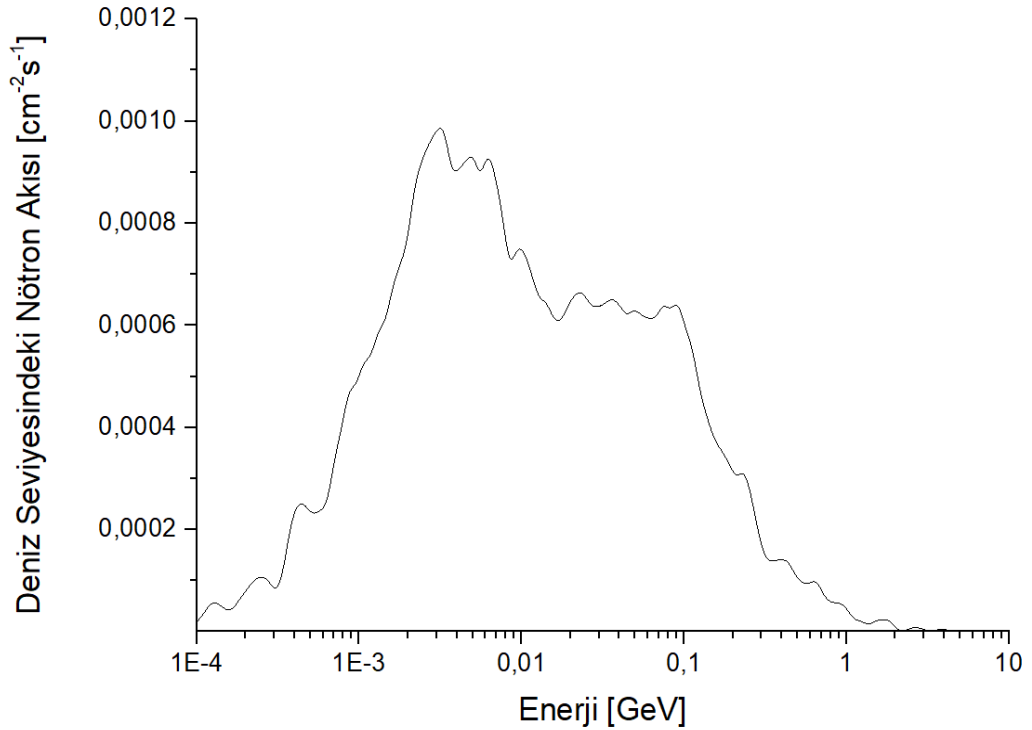
Şekil 6.2 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki gamaların enerjiye göre akısı.

6.1.2 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki nötronlar

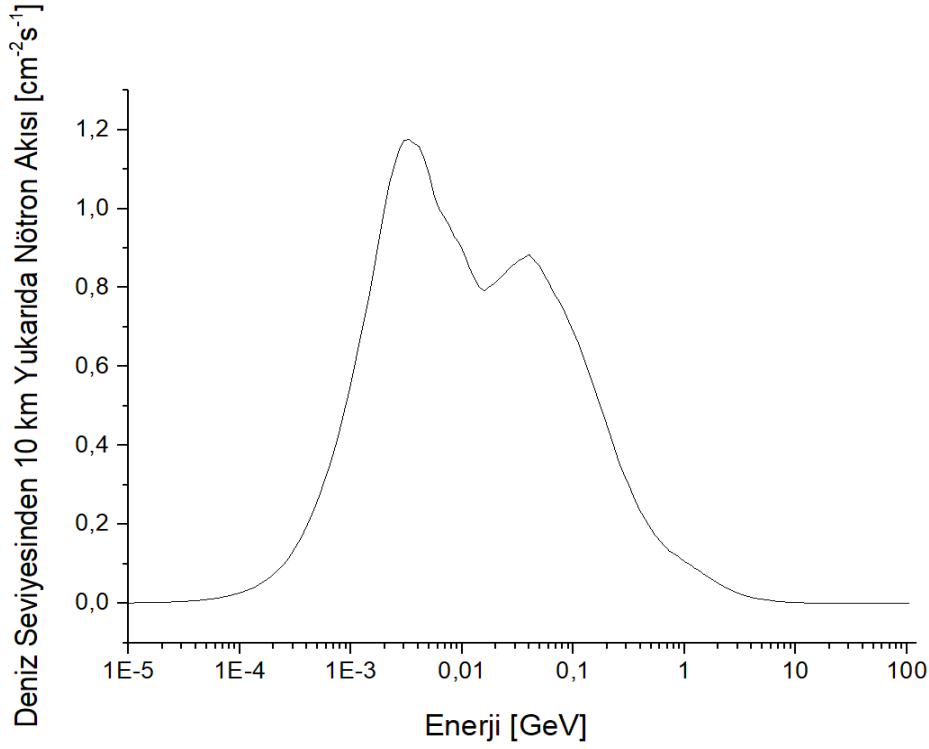
Atmosferik nötronların çoğu, kozmik ışın protonları veya helyum çekirdeği tarafından başlatılmış hadronik hava duşlarında üretilir. İkinci bir kaynak, kozmik gama ışınları veya elektronlar tarafından başlatılan elektromanyetik hava duşlarıdır. Bununla birlikte, nötronların üretildiği elektromanyetik duşların hadronik bileşeni küçüktür.

Atmosferik nötronlar, Dünyadaki radyoaktivite ile de üretilebilir. Bu nötronlar için nispeten kısa bir ortalama serbest yolla sonuçlanan düşük irtifalardaki yüksek atmosferik yoğunluğa bağlı olarak, Dünya'dan gelen katkı sadece troposferin alt kısmıyla ilgilidir. Bu nedenle, sadece hadronik hava duşları yoluyla yapılan üretim burada kabul edilir.

Simülasyonda atmosferin yukarisından gönderdiğimiz birincil parçacıkların başlattığı hadronik duş sonucu deniz seviyesinde ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda elde edilen nötron akıları Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Deniz seviyesindeki nötronların enerjiye göre akısı.



Şekil 6.4 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki nötronların enerjiye göre akısı.

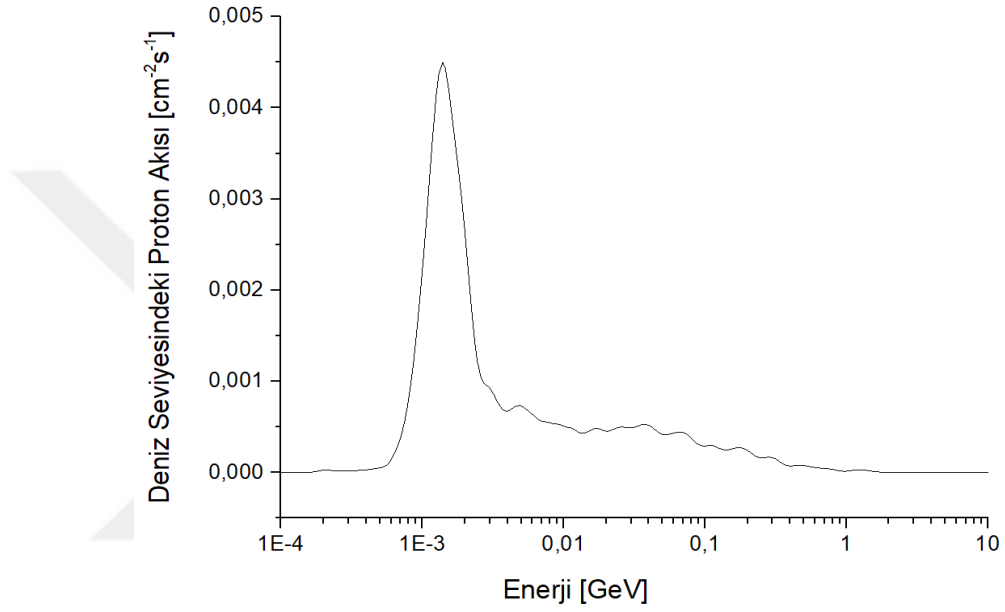
6.1.3 Deniz seviyesindeki ve atmosferdeki protonlar

Hadron akıları ve enerji spektrumları atmosferde 6500 metreye kadar olan dağ irtifalarında, yaklaşık 10 km'ye kadar uçaktaki aletlerle ve atmosferin neredeyse tepesine kadar balonla taşınan ekipmanlarla ölçülmüştür. Temelde hadronların enerji spektrumları manyetik spektrometreler, kütle spektrometreleri, kalorimetreler veya menzil spektrometreleri ile ölçülebilir. Protonları pilyonlardan ayırmak için momentum-enerji veya kütle-hız gibi iki parametre bilinmelidir. Güçlü etkileşimlerle belirlenen tek yüklü hadronlar prensip olarak birincil veya ikincil protonlar, yüklü pilyonlar, kaonlar veya hiperonlar, döteryum veya trityum olabilir. Genellikle daha büyük atmosfer derinliğinde sadece protonlar ve pilyonlar dikkate alınır. Yüklü-nötr oranı ölçülerek proton ve pilyonların ayrımı yapılabilir.

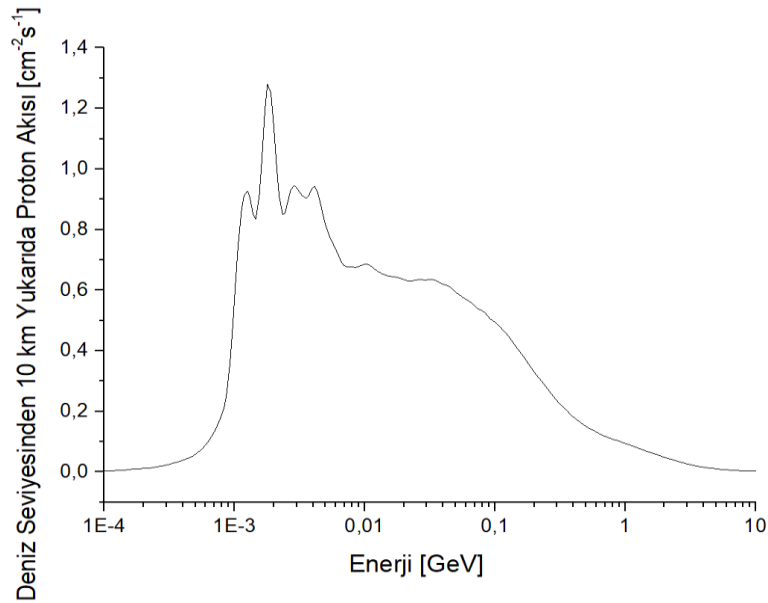
Belirli bir ortamdaki tek yüklü bir parçacığın iyonlaşma kayıplarının oranı sadece parçacığın hızının bir fonksiyonu olduğundan, protonların düşük enerji spektrumu, uygun kalınlıktaki emicilerde durdurulmuş parçacıkların oranları gözlenerek elde edilebilir. Bu yöntem birçok deneyde kullanılmıştır. Genel olarak proton

momentumları manyetik spektrometrelerle veya iyonlaşma kayıpları oranları ve aralıkları karşılaştırılarak ölçülmüştür.

Bu tez çalışmasında ise protonlar, GEANT4 simülasyon programıyla ikincil parçacık olarak diğer parçacıklar gibi elde edilmiş, ROOT analiz programıyla enerjiye karşılık sayım değerleri text dosyası olarak oluşturulmuştur. Origin programıyla da deniz seviyesi ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki gibi grafikleri çizilmiştir.



Şekil 6.5 : Deniz seviyesindeki protonların enerjiye göre akısı.



Şekil 6.6 : Deniz seviyesinden 10 km yukarıdaki protonların enerjiye göre akısı.

6.2 Deniz Seviyesi ve Atmosferde Doz Hesaplamaları

Kozmik radyasyon; foton, müonlar, elektronlar, protonlar, helyum iyonları ve nötronları içeren ikincil parçacıklar oluşturmak için atmosferdeki moleküller ile etkileşime girer ve bununla birlikte, bu parçacıkların çoğu, atmosferde daha derine nüfuz eder. Yer yüzeyine yaklaştıkça parçacıkların enerjileri azalacağından, örneğin yüksek irtifalarda uçmak, uçak personellerini ve çok sık seyahat edenleri yer seviyesindekilere oranla daha fazla kozmik radyasyon dozuna maruz bırakacaktır.

6.2.1 Deniz seviyesinde kozmik radyasyon dozu

Yer seviyesindeki kozmik radyasyon, müonlar, nötronlar, elektronlar, pozitronlar, fotonlar, protonlar dahil olmak üzere birçok farklı radyasyon karışımından oluşur, ancak dozun çoğu muonlar ve nötronlardan gelir. Yıllık efektif doz yaklaşık 0,4 mSv'dir.

Çoğu insan düşük irtifada yaşar ve bu nedenle, enlem ile bir miktar değişimin dışında, benzer miktarda yıllık kozmik radyasyon dozuna maruz kalır. Topraktaki diğer doğal radyasyon kaynaklarının da katkıları vardır: topraktan yayılan radyasyon ve topraktan gelen yapı malzemeleri (~ 0,46 mSv), Radon gazı (~ 1,2 mSv), iç ışınlama-Potasyum 40 (~ 0,3 mSv).

6.2.2 Atmosferde kozmik radyasyon dozu

Kozmik radyasyonun yoğunluğu artan irtifa ile artar ve jeomanyetik koordinatların (boylam ve enlem) kutuplara doğru daha büyük ve ekvatorun yanında daha küçük olmasıyla değişir.

Dünya'nın üst atmosferinde geçirdikleri zaman nedeniyle, havacılık endüstrisindeki uçak mürettebatı, yer yüzeyindeki bireylerin radyasyon seviyelerinin neredeyse iki katına maruz kalmaktadır (NASA, 2019). Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu uçak mürettebatının ve kabin personelinin kozmik radyasyona maruz kalmasının, mesleki olarak kabul edilebilir düzeyde olması için bireysel dozlarını değerlendirmekte gerekli önlemler alınmasını önermektedir (ICRP, 1991). Sivil Havacılık Genel Müdürlüğünün yayınladığı "*Uçakla Ticari Hava Taşıma İşletmeciliği Operasyon Usul ve Esasları Talimatı*"nın 86. maddesinde belirttiği üzere; uçak mürettebatının ve kabin personelinin bir yıl içerisinde alabileceği maksimum kozmik radyasyon 6 mSv'i aşamaz.

Hem birincil yüksek enerjili parçacıklar hem de ikincil parçacıklar, insanlar üzerinde olumsuz sağlık etkilerine sahip olabilir. Kozmik radyasyon DNA'yı parçalayabilir ve hücre fonksiyonlarını değiştirebilen serbest radikalleri üretebilir.

Simülasyonda; absorbe edilen dozlar, ikincil nötronlar, protonlar ve gama ışınları için Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilen spektrumlara dayanarak, Bölüm 5.2'de anlatıldığı gibi, GEANT4 ile hesaplanarak bulunmuştur (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1 : İkincil parçacıklar için doz hesabı.

Parçacık	Yükseklik	Yıllık toplam absorblanan doz (mGy)	Yıllık toplam eşdeğer doz (mSv)
Gama	Deniz Seviyesi	0,827	0,827
Nötron	Deniz Seviyesi	0,0341	0,171
Proton	Deniz Seviyesi	0,0318	0,159
Gama	Deniz seviyesinden 10 km yukarıda	110,005	110,005
Nötron	Deniz seviyesinden 10 km yukarıda	73,794	368,968
Proton	Deniz seviyesinden 10 km yukarıda	79,656	398,281



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında Dünya atmosferi GEANT4 simülasyon programı ile modellenerek, atmosferin en üst tabakasından gönderilen birincil kozmik ışınların oluşturduğu ikincil kozmik ışınların akısı, deniz seviyesinde ve deniz seviyesinden 10 km yukarıda olmak üzere incelenmiş ve bu seviyelerdeki doz hesaplamaları yapılmıştır. Bu sonuçlara göre kozmik ışınların yoğunluğunun irtifa ile değiştiği, deniz seviyesinden yukarılara çıkıldıkça arttığı gözlemlenmiştir.

Simülasyon çalışmasının ikinci kısmında ise, 2 farklı irtifada elde edilen ikincil kozmik parçacıkların ortalama enerjileri kullanılarak, insan dokusu üzerindeki doz değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen kozmik radyasyon dozu değerlerinin, insan vücudu üzerine 1 m yukarıdan direkt olarak tek yönden gönderdiğimiz ve elektrik ve manyetik alanı hesaba katmadığımız için standartlardan daha fazla olduğu görülmüştür.

Bir sonraki çalışmalarda;

- Elektrik ve manyetik alan eklenerek dünya atmosferi modellenip oluşan ikincil yüklü parçacıkların farklı irtifalarda seviyeleri ve doza katkıları incelenebilir.
- Uzay radyasyon ortamı modellenerek, Uluslararası Uzay İstasyonu (UUİ) gibi yapay uyduların maruz kaldığı kozmik radyasyon sonucu oluşan, radyasyon hasarı değerlendirilebilir veya UUİ’de çalışan personelin almış olabileceği kozmik radyasyon dozu hesaplanabilir.



KAYNAKLAR

- Adibpour, F., Mishev, A.L., Usoskin, I.G., Felsberger, E.,** (2014). Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71., *Advances in Space Research*. 55, 354-362.
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, H., Arce, P., Asai, M., Zschiesche, D.** (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506, 250-303.
- Akkoyun, S.** (2006). *Uzayda Gama Işını Ölçümleri-Bir GEANT Simülasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Alpboğan, Ü.** (2014). *Kozmik Işınlardan Tespiti Simülasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Atakan, M.** (2014). *Kars Bölgesinde Ölçülen Kozmik Işın Akı Yoğunluğu* (Yüksek Lisans Tezi). Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars.
- Bellotti, R., et al.** (1999). Balloon measurements of cosmic ray muon spectra in the atmosphere along with those of primary protons and helium nuclei over midlatitude. *Physical Review D*, Volume 60, 052002.
- Canflanca, P.** (2014). *Monte Carlo Simulation of a Detector for Cosmic Rays* (Bachelor Thesis). Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Fachbereich Physik, Almanya.
- Desorgher, L., Flückiger, E. O., Moser, M. R., Bütikofer, R.** (2003). *Geant4 Simulation of the Propagation of Cosmic Rays through the Earth's Atmosphere*. 28th International Cosmic Ray Conference, Switzerland. 4277–4280.
- Ergi, H.** (2014). *Kozmik Işın Kaynaklı Nötronların Akısı ve Enerji Dağılımı* (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Friedberg, W., Copeland, K.** (2011). *Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth*. Office of Aerospace Medicine Washington, DC 2059.
- Grieder, P.,** (2001). *Cosmic Rays at Earth*. University of Bern, Institute of Physics Switzerland.
- Hagmann, C., Lange, D., Wright, D.** (2007). *Cosmic-Ray Shower Generator (CRY) for Monte Carlo Transport Codes*. IEEE Nuclear Science Symposium Conference.

- Kole, M., Pearce, M., Salinas, M.** (2014). A model of the cosmic ray induced atmospheric neutron environment. *Astroparticle Physics*, 62, 230–240.
- Kunduracı, M.** (2011). *Deniz Seviyesindeki Müon Sayısının Müonların Düşeyle Yaptığı Açıyla Değişiminin Geant4 Simülasyon Programıyla İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Lamarsh, J., Baratta, A.**, (2001). *Introduction to Nuclear Engineering* (3rd ed.). CA.: Pearson Education Inc.
- Lypova, I.** (2013). *Investigation on gamma-electron air shower separation for CTA* (Master's thesis). Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomy and Space Physics Department, Ukrainian.
- Martin, J.E.**, (2013). *Physics for Radiation Protection*, CA.: Wiley-VCH.
- Özdemir, N.** (2016). *Yüksek Enerjili Kozmik Işınlardan Kapsamlı Duş Yağmurları İle Uyarılan Farklı Birincil Parçacıkların Karşılaştırılması Çalışması* (Yüksek Lisans Tezi). Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Poon, E.** (2004), *Validation of the GEANT4 Monte Carlo code for radiotherapy applications* (Master's thesis). McGill University, Medical Physics Unit, Montreal.
- Si Belkhir, F.** (2010). *Cosmic Ray Dosimetry*. El-Hadj Lakhdar University of Batna, Ministry of Higher Education and Scientific Research.
- Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü** (2010). *Uçakla Ticari Hava Taşıma İşletmeciliği Operasyon Usul Ve Esasları Talimatı*, Ankara.
- Steinke, B.** (2012). *First study of fast variability in Markarian 421 with the MAGIC stereoscopic System*, Ph.D. Thesis, Technische Universität München, Almanya.
- Sullivan, D. and colleagues** (2004)., *Evaluation of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew*. European Communities.
- Şaşmaz, T.** (2011). *Deniz Seviyesindeki Kozmik Işınlardan Enerji Spektrumunun Geant4 Simülasyon Programı İle İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Vassiliev, O. N.**, (2017). *Monte Carlo Methods for Radiation Transport*, University of Texas.
- Witharana, S.** (2007). *Development of Cosmic Ray Simulation Program – Earth Cosmic Ray Shower (ECRS)*, Ph.D. Thesis, Georgia State University.
- Yahşi, E.** (2011). *Kozmik Müonların Deniz Seviyesindeki Akısının Düşeyle Olan Açıyla Bağımlılığının Kozmik Işın Dedektörüyle İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yazgan, Ç.**, (2016). *Monte Carlo Yöntemi İle Lineer Hızlandırıcı Modellemesi ve Dozimetrik Kalite Kontrolü*. (Yüksek Lisans Tezi). Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Antalya.

Yıldız, A. (2008). *Deniz Seviyesinde Kozmik Işın Akı Oranı ve Uçuş Zamanının Bir Sintilasyon Dedektörü İle Tespit Edilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kafkas Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars.

Ziegler, J., (1996). *Terrestrial Cosmic Rays*, IBM Research Division.

Url-1<<https://www.taek.gov.tr/tr/2016-06-09-00-43-46/1087-dogal-radyasyon-kaynaklari.html>>, erişim tarihi 01.09.2019.

Url-2<<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-studies-cosmic-radiation-to-protect-high-altitude-travelers>>, erişim tarihi 16.10.2019.

Url-3<<https://root.cern.ch/about-root>>, erişim tarihi 25.10.2019.

Url-4<https://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html>, erişim tarihi 09.11.2018.

Url-5<<https://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=atmosfer>>, erişim tarihi 18.11.2018





EKLER

EK A: İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Oluşturulan Fizik Listesi

EK B: İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Tasarlanan Geometri

EK C: Doz hesabı için tasarlanan DetectorConstruction

EK D: İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Oluşturulan TrackingAction

EK E: Atmosferden Gönderilen Parçacıkların Türlerine Göre Enerji Sayım Değerleri





EK A

İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Oluşturulan Fizik Listesi

Hadron Inelastic physics

```
RegisterPhysics( new G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP(verb));
```

Ion Elastic scattering

```
RegisterPhysics( new G4IonElasticPhysics(verb));
```

In Inelastic physics

```
RegisterPhysics( new G4IonPhysics(verb));
```

Gamma physics

```
RegisterPhysics( new GammaNuclearPhysics("gamma"));
```

EM physics

```
RegisterPhysics(new ElectromagneticPhysics());
```

Decay

```
RegisterPhysics(new G4DecayPhysics());
```

Radioactive decay

```
RegisterPhysics(new G4RadioactiveDecayPhysics());
```



EK B

İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Tasarlanan Geometri

```
G4VPhysicalVolume* B1DetectorConstruction::Construct()
{
    G4int natoms;
    G4int ncomponents;
    G4double fractionmass;
    G4NistManager* manager = G4NistManager::Instance();
    manager->SetVerbose(0);
    G4Element* N = manager->FindOrBuildElement(7);
    G4Element* O = manager->FindOrBuildElement(8);
    G4Element* Ar = manager->FindOrBuildElement(18);
    G4Element* Ne = manager->FindOrBuildElement(10);
    G4Element* He = manager->FindOrBuildElement(2);
    G4Element* Kr = manager->FindOrBuildElement(36);
    G4Element* H = manager->FindOrBuildElement(1);
    G4Element* Xe = manager->FindOrBuildElement(54);
    G4Element* C = manager->FindOrBuildElement(6);
    G4Material* CO2 = new G4Material("CO_2", 0.00184212*g/cm3,ncomponents= 2);
    CO2->AddElement(C, natoms=1);
    CO2->AddElement(O, natoms=2);
    G4Material* CH4 = new G4Material("CH_4", 0.000667151*g/cm3,ncomponents= );
    CH4->AddElement(C, natoms=1);
    CH4->AddElement(H, natoms=4);
    G4double density, temperature, pressure;
    ////////////////////////////////////Air1////////////////////////////////////
    G4Material* Air1 =
        new G4Material("Air1", density= 1.225*kg/m3, ncomponents=10,
            kStateGas, temperature= 288.*kelvin, pressure= 1.013*bar);
    Air1->AddElement(N, fractionmass= 78.08*perCent);
    Air1->AddElement(O, fractionmass= 20.946*perCent);
    Air1->AddElement(Ar, fractionmass= 0.934*perCent);
    Air1->AddMaterial(CO2, fractionmass= 0.033*perCent);
    Air1->AddElement(Ne, fractionmass= 0.001818*perCent);
```

```

Air1->AddElement(He, fractionmass= 0.000524*perCent);
Air1->AddMaterial(CH4, fractionmass= 0.000179*perCent);
Air1->AddElement(Kr, fractionmass= 0.0001*perCent);
Air1->AddElement(H, fractionmass= 0.00005*perCent);
Air1->AddElement(Xe, fractionmass= 0.000009*perCent);
////////////////////////////////////0-1km////////////////////////////////////

```

```

G4ThreeVector pos1 = G4ThreeVector(0.*m, -39.5*km, 0.*m);
G4Box* solidShape1 =
    new G4Box("Shape1", ebat, 0.5*km, ebat);
G4LogicalVolume* logicShape1 =
    new G4LogicalVolume(solidShape1,    //its solid
        Air1,        //its material
        "Shape1");   //its name
    new G4PVPlacement(0,    //no rotation
        pos1,              //at position
        logicShape1,       //its logical volume
        "Shape1",         //its name
        logicWorld,       //its mother volume
        false,            //no boolean operation
        0,                //copy number
        checkOverlaps);   //overlaps checking

```

```

////////////////////////////////////10-15km////////////////////////////////////

```

```

G4ThreeVector pos11 = G4ThreeVector(0.*m, -27.5*km, 0.*m);
G4Box* solidShape11 =
    new G4Box("Shape11", ebat, 2.5*km, ebat);
G4LogicalVolume* logicShape11 =
    new G4LogicalVolume(solidShape11,    //its solid
        Air11,        //its material
        "Shape11");   //its name
    new G4PVPlacement(0,    //no rotation
        pos11,           //at position
        logicShape11,     //its logical volume
        "Shape11",       //its name
        logicWorld,      //its mother volume
        false,           //no boolean operation

```



```

0, //copy number
checkOverlaps); //overlaps checking
////////////////////////////////////30-40km////////////////////////////////////
G4ThreeVector pos15 = G4ThreeVector(0.*m, -5.*km, 0.*m);
G4Box* solidShape15 =
    new G4Box("Shape15",ebat, 5.*km, ebat);
G4LogicalVolume* logicShape15 =
    new G4LogicalVolume(solidShape15, //its solid
        Air15, //its material
        "Shape15"); //its name
    new G4PVPlacement(0, //no rotation
        pos15, //at position
        logicShape15, //its logical volume
        "Shape15", //its name
        logicWorld, //its mother volume
        false, //no boolean operation
        0, //copy number
        checkOverlaps); //overlaps checking

```



EK C

Doz hesabı için tasarlanan DetectorConstruction

```
// Envelope parameters
G4double env_sizeX = 40.*cm, env_sizeY = 1.8*m, env_sizeZ = 40.*cm;

//////////////////////////////////// World //////////////////////////////////////
G4double world_sizeX = 10.2*env_sizeX;
G4double world_sizeY = 4.2*env_sizeY;
G4double world_sizeZ = 4.2*env_sizeZ;
G4Material* world_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
G4Box* solidWorld =
    new G4Box("World", //its name
             0.5*world_sizeX, 0.5*world_sizeY, 0.5*world_sizeZ); //its size
G4LogicalVolume* logicWorld =
    new G4LogicalVolume(solidWorld, //its solid
                        world_mat, //its material
                        "World"); //its name
G4VPhysicalVolume* physWorld =
    new G4PVPlacement(0, //no rotation
                      G4ThreeVector(), //at (0,0,0)
                      logicWorld, //its logical volume
                      "World", //its name
                      0, //its mother volume
                      false, //no boolean operation
                      0, //copy number
                      checkOverlaps); //overlaps checking

//////////////////////////////////// Head //////////////////////////////////////
G4Material* shape2_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_A-150_TISSUE");
G4ThreeVector pos2 = G4ThreeVector(0.*cm, 50.*cm, 0.*cm);
G4Sphere* solidShape2 =
    new G4Sphere("Shape2", //its name
                 0.*cm, 15.*cm,
                 0.*deg, 360.*deg, 0.*deg, 180.*deg); //its size
G4LogicalVolume* logicShape2 =
```

```

new G4LogicalVolume(solidShape2,    //its solid
                    shape2_mat,     //its material
                    "Shape2");     //its name
new G4PVPlacement(0,                //no rotation
                  pos2,             //at position
                  logicShape2,     //its logical volume
                  "Shape2",        //its name
                  logicWorld,      //its mother volume
                  false,           //no boolean operation
                  0,               //copy number
                  checkOverlaps);  //overlaps checking
//////////////////////////////////// Body //////////////////////////////////////
G4Box* solidBody =
  new G4Box("Body",                //its name
            10.*cm, 35.*cm, 20.*cm); //its size
G4LogicalVolume* logicBody =
  new G4LogicalVolume(solidBody,   //its solid
                      shape2_mat,  //its material
                      "Body");    //its name
  new G4PVPlacement(0,             //no rotation
                    G4ThreeVector(0.,0.,0.*cm),
                    logicBody,     //its logical volume
                    "Body",        //its name
                    logicWorld,    //its mother volume
                    false,         //no boolean operation
                    0,             //copy number
                    checkOverlaps); //overlaps checking
//////////////////////////////////// Leg1 //////////////////////////////////////
G4Box* solidLeg1 =
  new G4Box("Leg1",               //its name
            7.*cm, 40.*cm, 7.*cm); //its size
G4LogicalVolume* logicLeg1 =
  new G4LogicalVolume(solidLeg1,   //its solid
                      shape2_mat,  //its material
                      "Leg1");    //its name

```

```

new G4PVPlacement(0,          //no rotation
                  G4ThreeVector(0.,-75.*cm,9.5*cm),
                  logicLeg1,  //its logical volume
                  "Leg1",     //its name
                  logicWorld, //its mother volume
                  false,      //no boolean operation
                  0,          //copy number
                  checkOverlaps); //overlaps checking

//////////////////////////////////// Leg2 //////////////////////////////////////

G4Box* solidLeg2 =
  new G4Box("Leg2",          //its name
            7.*cm, 40.*cm, 7.*cm); //its size

G4LogicalVolume* logicLeg2 =
  new G4LogicalVolume(solidLeg2, //its solid
                      shape2_mat, //its material
                      "Leg2"); //its name

new G4PVPlacement(0,          //no rotation
                  G4ThreeVector(0.,-75.*cm,-9.5*cm),
                  logicLeg2,  //its logical volume
                  "Leg2",     //its name
                  logicWorld, //its mother volume
                  false,      //no boolean operation
                  0,          //copy number
                  checkOverlaps); //overlaps checking

//////////////////////////////////// Hand1 //////////////////////////////////////

G4Box* solidHand1 =
  new G4Box("Hand1",        //its name
            4.*cm, 4.*cm, 20.*cm); //its size

G4LogicalVolume* logicHand1 =
  new G4LogicalVolume(solidHand1, //its solid
                      shape2_mat, //its material
                      "Hand1"); //its name

new G4PVPlacement(0,          //no rotation
                  G4ThreeVector(0.*cm,25.*cm,41.*cm),
                  logicHand1, //its logical volume

```

```

    "Hand1",          //its name
    logicWorld,      //its mother volume
    false,          //no boolean operation
    0,              //copy number
    checkOverlaps); //overlaps checking
//////////////////// Hand2 //////////////////////////////////////
G4Box* solidHand2 =
    new G4Box("Hand2",          //its name
        4.*cm, 4.*cm, 20.*cm); //its size
G4LogicalVolume* logicHand2 =
    new G4LogicalVolume(solidHand2, //its solid
        shape2_mat, //its material
        "Hand2"); //its name
    new G4PVPlacement(0, //no rotation
        G4ThreeVector(0.*cm,25.*cm,-41.*cm),
        logicHand2, //its logical volume
        "Hand2", //its name
        logicWorld, //its mother volume
        false, //no boolean operation
        0, //copy number
        checkOverlaps); //overlaps checking

```

EK D

İkincil Kozmik Parçacıkların Üretimi için Oluşturulan TrackingAction

1. Deniz Seviyesi için;

```
G4double pos = track->GetPosition().y();  
if (pos>-39.9*km) return;
```

2. Deniz Seviyesinden 10 km yukarısı için;

```
G4double pos = track->GetPosition().y();  
if (pos>-29.9*km) return;
```





EK E

Çizelge A.1 : Atmosferden birincil parçacık olarak gönderilen protonun enerji ve parçacık sayısı ilişkisi.

Enerji (GeV)	Gönderilen Proton Sayısı
2.77	804
3.21	2091
3.68	4019
4.22	4426
4.85	4124
5.56	3829
6.36	3360
7.28	3003
8.31	2600
9.49	2287
10.8	1886
12.3	1648
14.1	1352
16.1	1117
18.3	895
21	736
24	588
27.5	484
31.6	382
36.3	297
44.8	203
60.3	127
83	75

Çizelge A.2 : Atmosferden birincil parçacık olarak gönderilen alfanın enerji ve parçacık sayısı ilişkisi.

Enerji (GeV)	Gönderilen Alfa Sayısı
0.927	38
1.11	91
1.3	289
1.52	520
1.78	604
2.08	572
2.42	514
2.82	478
3.26	414
3.77	354
4.36	317
5.02	289
5.77	230
6.64	199
7.63	155
8.77	131
10.1	111
11.6	78
13.3	74
15.3	55
17.7	41
20.5	37
23.7	29
29.7	18
41	10



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hatice DOĞRU

E-posta : dogru.hatice@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 – 2019, İTÜ Enerji Enstitüsü Proje Destekli Araştırma Görevlisi.