

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOZMİK IŞIN KAYNAKLI NÖTRONLARIN AKISI VE ENERJİ DAĞILIMI

Hakan ERGİ

Fizik Anabilim Dalı

**ANKARA
2014**

Her hakkı saklıdır

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

21.12.2014

Hakan ERGİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOZMİK IŞIN KAYNAKLI NÖTRONLARIN AKISI VE ENERJİ DAĞILIMI

Hakan ERGİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Dünyamız sürekli olarak dış uzaydan gelen kozmik radyasyona maruz kalmaktadır. Çoğunluğunu hidrojen ve alfa parçacıkların oluşturduğu doğrudan atmosfere giren birincil kozmik ışınlar, atmosfere girdikten sonra gaz molekülleriyle etkileşerek ikincil kozmik ışınları oluşturmaktadır. Uçuş mürettebatı ve sık uçak yolculuğu yapan insanlar ikincil kozmik parçacıklardan kaynaklanan kozmik radyasyona maruz kalmaktadır. Bu çalışmada ikincil kozmik parçacıkların %60'ını oluşturan nötron akısının çeşitli yüksekliklerdeki dağılımı incelenmiştir. Amerikan Ulusal Havacılık Dairesi'nde geliştirilen CARI kodu ile farklı irtifalarda uçuş yapan mürettebatın ve yolcunun maruz kaldığı efektif dozlar hesaplanmıştır. Farklı enlem ve boylamlarda yükseklik değişikçe ikincil kozmik ışınların yoğunluğun da değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak yükseklik arttıkça maruz kalınan kozmik radyasyonun azaldığı görülmüştür. Sonuçlar, literatürlerdeki çalışmalarla ile uyum içerisindedir.

Aralık 2014, 49 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kozmik ışınlar, kozmik radyasyon, nötron akısı, ortam doz eşdeğeri, efektif doz, CARI, EXPACS

ABSTRACT

Master Thesis

STUDY ON THE COSMIC-RAY INDUCED NEUTRONS FLUX AND ITS ENERGY DISTRIBUTION

Hakan ERGİ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ

Our world is constantly exposed to cosmic radiation from outer space. Mostly consisting of hydrogen and alpha particles, primary cosmic rays which are entering the atmosphere directly, interact with gas molecules after entering the atmosphere and constitute in this way secondary cosmic rays. Flight crews and individuals who frequently travel with planes are constantly exposed to cosmic radiation caused by secondary cosmic particles. In this study, the distribution at various heights of the secondary cosmic particles which constitutes 60% of the neutron flux is examined. The effective doses, of which flight crews and passengers of different altitudes were exposed to, were calculated using the CARI code developed by the American National Aviation Authority. It was observed that the intensity of the secondary cosmic rays changes at the various heights of different latitudes and longitudes. And accordingly it was seen, as the altitude increases, the exposure of the cosmic radiation decreases. The results are in agreement with the studies in the literature.

December 2014, 49 pages

Key Words: Cosmic rays, cosmic radiation, neutron flux, ambient dose equivalent, effective dose , CARI, EXPACS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında engin tecrübelerini, bilgi ve önerilerini benden esirgemeyen, akademik dünyadaki iş ahlakı konusundaki düşüncelerine büyük saygı duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe KAŞKAŞ'a (Ankara Üniversitesi F.B.E. Fizik A.B.D) sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Her türlü bilgi paylaşımında bize yardımcı olan Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'ne ve CARI kodunu bizimle paylaşan Karen O'BRIEN'a (Department of Physics and Astronomy Northern Arizona University) teşekkür ederim.

Hakan ERGİ

Ankara Aralık 2014

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELE DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KOZMİK IŞINLAR	2
2.1 Kozmik Işımların Tarihçesi	3
2.2 Kozmik Işın Kaynakları ve Enerji Spektrumları.....	5
2.2.1 Birincil ve İkincil Kozmik Işımlar.....	8
2.2.2 Birincil kozmik ışımlar	8
2.2.3 İkincil kozmik ışımlar	9
2.3 Dünyanın Elektrik ve Manyetik Alanında Kozmik Işımlar.....	12
3. KOZMİK RADYASYON VE DOZ HESAPLAMALARI	15
3.1 Kozmik Radyasyon	15
3.2 Doz Hesaplamaları	15
3.3 <i>Heliocentric</i> Potansiyel ve <i>Cut Off Rigidity</i>	17
3.3.1 <i>Heliocentric potential</i>	17
3.3.2 <i>Cut off rigidity</i>	19
3.4 Kozmik Işımlardan Kaynaklanan Doz Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırılması	21
3.4.1 AVIDOS	22
3.4.2 CARI	23
3.4.3 EPCARD	23
3.4.4 FDOScalc	24
3.4.5 IASON-FREE	25
3.4.6 JISCARD EX	25

3.4.7 PANDOCA	26
3.4.8 PCAIRE	26
3.4.9 PLANTEOCOSMICS	27
3.4.10 QARM	27
3.4.11 SIEVERT	27
4. NÜMERİK HESAPLAMALAR	29
4.1 Nötron Doz Ölçümleri Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları	29
4.2 Hesaplamalar ve Kullanılan Yöntemler	35
4.3 Örneklem: Bir Pilotun Aylık Uçuş Planına Göre Doz Hesabı	39
4.4 Solar Aktivite ve Kozmik Işınlr Arasındaki İlişki.....	42
5. SONUÇ	44
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	49

KISALTMALAR DİZİNİ

ICRP	Uluslararası Radyobiyojik Korunma Komisyonu
ICRU	Uluslararası Radyasyon Birim Ve Ölçüm Komisyonu
NCRP	Ulusal Radyasyon Korunma Ve Ölçüm Konseyi
TEPC	Tissue-Equivalent Proportional Counter
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
NIRS	Ulusal Radyobiyojik Bilimler Enstitüsü
JAA	Joint Aviation Authorities
ISO IEC	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
DLR	Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
IRSN	L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
CME	Coronal Mass Ejections

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 IC 443 süpernova kalıntısının Fermi-LAT ve WISE (mavi) ile çeşitli dalga boylarında elde edilen görüntüsü	2
Şekil 2.2 Dünyanın manyetik alanından etkilenen kozmik ışınların doğrultuları burada 1 en yüksek enerjili, 5 en düşük enerjili kozmik ışını göstermektedir	6
Şekil 2.3 Kozmik ışın akısının enerjiye göre değişimi	7
Şekil 2.4 Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu	9
Şekil 2.5 Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşmeler sonucunda oluşan parçacık duşu	10
Şekil 2.6 Dünyanın elektrik alan çizgileri.....	13
Şekil 2.7 Dünyanın etrafındaki manyetik alan çizgileri ve manyetosfer	14
Şekil 3.1 Dünyada kozmik radyasyon ölçümü yapan dedektör istasyonları.....	17
Şekil 3.2 Yıldızlararası gazın içindeki kozmik ışınların etkisinde bulunan heliosphere	18
Şekil 3.3 <i>Heliocentric</i> potansiyelin, çeşitli yerlerde bulunan detektörler yardımıyla alınan ölçümler sonucunda 1958-2008 yıllarındaki değişimi.....	19
Şekil 3.4 Mart 2004 tarihin de alınan efektif dikey <i>cut off rigidity</i> eğrileri.....	21
Şekil 4.1 Nötron akısının enerjiye göre değişimi.....	29
Şekil 4.2 Nötron akı oranının enerjiye göre değişimi.....	30
Şekil 4.3 Ortam doz eşdeğerinin uçuş sayısına göre değişimi	31
Şekil 4.4 Efektif dozun uçuş sayısına göre değişimi	32
Şekil 4.5 Ortam doz eşdeğerinin yüksekliğe bağlı değişimi.....	33
Şekil 4.6 Efektif dozun yüksekliğe bağlı değişimi	34
Şekil 4.7 EXPACS programının çalışma ara yüzü	35
Şekil 4.8 Nötron akı oranının enerjiye göre değişimi	36
Şekil 4.9 CARI-6P programının çıktısı. Ankara için CARI-6P programı kullanılarak hesaplanan farklı parçacıklar için efektif dozlar	37
Şekil 4.10 Efektif dozun yüksekliğe göre değişiminin literatür ile karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.11 Nötron efektif dozun literatür ile karşılaştırılması.....	39
Şekil 4.12 Efektif dozun yıllara göre değişiminin solar döngü ile karşılaştırılması...	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Bazı temel parçacıkların yarı ömürleri	11
Çizelge 2.2	Bir parçacık düşünde, pion, müon ve kaonların bozunma reaksiyonları ve bu reaksiyonların gerçekleşme olasılıkları	12
Çizelge 4.1	Örnek CARI-6P çıktısı, IST-DLM uçuşu (“prwf” prorton için ağırlık fonksiyonunu,, uGy ise μ Gy birimini göstermektedir	40
Çizelge 4.2	Ekim - Kasım 2013 aylarında bir pilotun yaptığı uçuşlara göre CARI-6P programında hesaplanan efektif doz miktarları	41

1. GİRİŞ

Kozmik ışınlar dünya atmosferine giren yüksek enerjili parçacıklardır. Doğrudan yeryüzüne ulaşabilen çok yüksek enerjili kozmik ışınlara birincil kozmik ışın, bu birincil kozmik ışınların dünya atmosferine girdiğinde gaz atomlarıyla etkileşmesinden kaynaklanan yeni yüklü parçacıklara da ikincil kozmik ışınlar denir. Enerjilerine göre ikiye ayrılan kozmik ışınların uzayda hangi koşullarda oluştuğu tam olarak belirlenememiştir. Enerjilerinin 10^{21} eV değerlerine kadar çıktığı gözlemlenen yüklü parçacıklardan oluşan kozmik ışınların kaynağının, uzaydaki süpernovalar olduğu düşünülmektedir.

Kozmik ışınlar, astrofizikçilerin ve parçacık fizikçilerinin çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Astrofizikçiler uzayın derinliklerinde meydana gelen yüksek enerjili astrofiziksel olaylar hakkında bilgi edinmek için kozmik ışınlar ile ilgili pek çok çalışma yürütmektedirler. Parçacık fizikçileri, birçok temel parçacığın oluşumunu, dünya atmosferine girdikten sonra gaz molekülleriyle etkileşimi sonucu oluşan kozmik ışınlar üzerinde yaptıkları deneyler sayesinde gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kozmik ışınlar hakkında genel bilgiler verilmiş ve kozmik ışınların tarihçesinden bahsedilmiştir. Dünyanın manyetik alanında kozmik ışınların davranışları ile ilgili bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde, kozmik radyasyon ve kozmik radyasyon dozu ile ilgili bazı temel kavramlara değinilmiştir. Kozmik radyasyondan korunma ve kozmik radyasyon dozunun kontrol altında tutulabilmesi için çeşitli ulusal ve uluslar arası kuruluşların yaptığı çalışmalardan bahsedilmiştir. Kozmik radyasyon dozunun hesaplanmasında kullanılan çeşitli kodlar karşılaştırılmıştır. Son bölümde, EXPACS ve Amerikan Ulusal Havacılık Dairesi Sivil Havacılık Sağlık Enstitüsü'nden (FAA's Civil Aerospace Medical Institute) edindiğimiz CARI kodu ile yaptığımız hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

2. KOZMİK IŞINLAR

Kozmik ışınlar, dış uzaydan sürekli olarak dünya atmosferine giren, ışık hızına yakın hızlarda hareket eden yüksek enerjili (rölâivistlik) parçacıklardır. Kozmik ışınların %90'nına yakını protonlar (hidrojen atomunun çekirdeği), %9 kadarını alfa parçacıkları (He atomunun çekirdeği), geriye kalan % 1'lik kısmını ise elektronlar ve ağır iyonlar oluşturmaktadır.

Kozmik ışınların enerjilerinin 10^{21} eV değerlerine kadar ulaştığı gözlenmiştir (Ridgen 2003). Kozmik ışınların enerjilerindeki bu değişkenlik, parçacıkların farklı kaynaklardan gelmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bazı kaynaklar kozmik ışınların kaynağını ilkel evrenden kalma egzotik parçacıklara bağlarken, dev bir kara delikten kaynaklanabileceğini öne süren araştırmacılar da bulunmaktadır. Yüksek enerji fiziğinin gelişmesiyle, yüksek enerjili ışınımı izleyen çoklu teleskop sistemleri tarafından yapılan gözlemler neticesinde, kozmik ışınların kaynağının süpernovalar olduğuna dair kanıtlar ağırlık kazanmıştır. Nasa'nın Fermi Gama ışını uzay teleskopunun verilerinin kullanıldığı bir çalışmada, evrende çok hızlı hareket ederek yayılan kozmik ışınların, süpenova kalıntıları tarafından üretildiği ispatlanmıştır (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc>, 2014).



Şekil 2.1 IC 443 süpernova kalıntısının Fermi-LAT ve WISE (mavi) ile çeşitli dalga boylarında üretilmiş görüntüsü (NASA/DOE/FermiLAT Collaboration) (http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/supernova-cosmic-rays.html, 2014)

Araştırmacılar süpernova kalıntılarının kozmik ışınlar ürettiğini kanıtlayabilmek için IC 443 ve W44 olarak bilinen iki süpernova kalıntısına ait Fermi verilerini incelemiş, kalıntıların hızlandırılmış proton ürettiğini keşfetmişlerdir (süpernova yıldızlararası ortamı dolduran soğuk ve yoğun gaz bulutundan oluşur).

2.1 Kozmik Işınlara Tarihçesi

Radyoaktivitenin Henri Becquerel tarafından keşfedilmesinden sonra atmosferdeki iyonizasyonun sebepleri tartışma konusu olmuştur. 19.yüzyıl sonlarına doğru, gazların iletkenlikleri üzerine yapılan çalışmalar sırasında kullanılan elektroskopların dış ortamdaki radyasyondan yalıtılmış olmalarına rağmen yük kaybına uğradıkları gözlenmiştir. Araştırmacılar bu yük kaybına, kaynağı bilinmeyen iyonlaştırıcı radyasyonun sebep olabileceği sonucuna varmışlar, hatta bu kaynakların dünya dışından yeryüzüne ulaşabileceği olasılığı üzerinde durmuşlardır.

Fizikçi Theodore Wulf tarafından keşfedilen elektroskop sayesinde kaynağı bilinmeyen bu radyasyon ile ilgili araştırmalar zamanla derinlik kazanmış, yeryüzünden belirli yüksekliklerde deneyler yapılmıştır. Atmosferdeki iyonizasyonun kaynağının yeryüzü olduğu düşüncesine dayanılarak yüksekliklere çıkıldıkça radyoaktivitenin azalması beklenmiştir. Ancak yapılan deneyler sonucunda yeryüzünden yukarı doğru gidildikçe radyoaktivitenin arttığı gözlenmiştir.

1912 yılında Avusturyalı bilim adamı Victor Franz Hess 5300 metrede gerçekleştirdiği balon uçuşu sırasında yaptığı ölçümler sonucunda, buradaki radyoaktivitenin deniz seviyesinin iki katından fazla olduğunu gözlemlemiştir. Böylelikle kaynağı belli olmayan iyonize ışınların, yeryüzündeki radyoaktif elementlerden kaynaklanmadığını ve dış uzaydan dünyaya ulaştığı sonucuna varmıştır. Hess, kozmik ışınları keşfinden dolayı 1936 yılında Nobel ödülü kazanmıştır.

Uzaydan gelen bu radyasyonun kozmik ışın olarak adlandırılması, Milikan'ın bu radyasyonun yüksek enerjili gama ışınları olduğu teorisine dayanmaktadır. Daha sonra

yapılan çalışmalarda kozmik ışınların çok yüksek enerjili parçacıklar olduğunun kanıtlanmasına rağmen, bu parçacıkların kozmik ışın olarak adlandırılmasına devam edilmiştir.

1927 yılında J Clay Hollanda Endonezya'ya yaptığı uçak yolculuğu sırasında farklı enlemlerin farklı kozmik ışın yoğunluğunda bulunduğunu ve en düşük kozmik ışın yoğunluğunun ekvator yakınlarında olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmacılar bu yoğunluk farkına dünyanın manyetik alanının sebep olabileceği üzerinde durmuş ve kozmik ışınların elektrik yüküne sahip olup dünyanın manyetik alanından etkilendiği sonucuna varmışlardır.

1933 yılında T.H. Johnson ve Chicago Üniversitesinden L. Alvanes ile A.H. Compton'dan oluşan çalışma grubu, birbirlerinden bağımsız olarak yürüttükleri çalışmalarda kozmik ışınların ağırlıklı olarak pozitif yüklü parçacıklardan oluştuğunu gözlemlemiştir. Aynı yıl C.W. Anderson, sis odası ile yaptığı deneylerde kozmik ışınların izlerini gözlemlerken anti elektronu (pozitron) keşfetmiştir (SCHLAEPFER 2003). C. W. Anderson ve S. H. Neddermeyer 1937 yılında sis odası deneyleri sırasında elektronun 200 katı kütleye sahip yeni bir parçacık keşfetmişlerdir. Pozitif ve negatif yüklü olmak üzere iki çeşit olan bu parçacığa müon adı verilmiştir. Kozmik ışınlar kullanılarak keşfedilen pozitron ve müon parçacık fiziğinin temelini oluşturmuştur ve parçacık hızlandırıcı merkezleri kuruluncaya kadar araştırmalar kozmik ışınlar kullanarak yapılmıştır.

P. Auger 1938 yılında Alp Dağları'nda yerleştirdiği detektörlerle hava molekülleri ile yüksek enerjili parçacıkların çarpışmalarından kaynaklanan ikincil atom altı parçacıkların oluşturduğu kozmik ışın sağanağını keşfetmiştir.

Dünya atmosferine girmeden önce kozmik ışınların nasıl bir yapıya sahip olduğuna dair bilgi sahibi olmak isteyen bilim adamları balonlarla bir takım deneyler düzenlemiştir. Hidrojen ile demir arasında kalan bütün elementlerin (ağır çekirdeklerin) birincil kozmik ışınların içerisinde bulunduğunu keşfetmişlerdir. Daha sonraki yıllarda kozmik ışınların enerji spektrumu ve geliş yönlerinin tayini üzerine yapılan deneyler

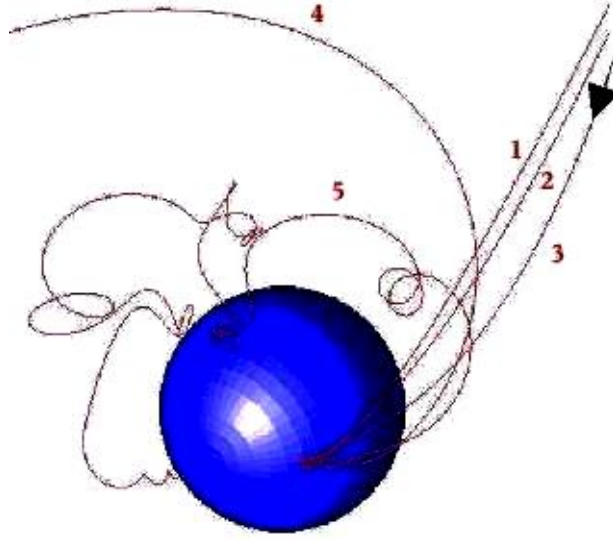
çerçevesinde birincil kozmik ışınların enerji spektrumunun 10^{20} eV'un üzerinde olabileceği de gözlemlenmiştir. 1991 yılında Amerika'da Fly's Eye kozmik ışın araştırma grubu, 3×10^{20} eV enerjili, 1994'te de Japonya'da Agasa grubu 2×10^{20} eV enerjili bir kozmik ışın olayı gözlemlemiştir (<http://www.p-ng.si/public/pao/history.php>, 2014).

Günümüzde teknolojik gelişmelerin ışığında kozmik ışınlarla ilgili bilimsel çalışmalar yoğun bir biçimde devam etmektedir. Kaynakları bilinmeyen bu ışınlar hakkında bilgi sahibi olabilmek, evrenin geçmişi, gelişimi ve geleceği konusunda pek çok soruya cevap bulabilmek amacıyla araştırmalar yapılmaya devam edilmektedir.

2.2 Kozmik Işın Kaynakları ve Enerji Spektrumları

Kozmik ışınlar ile ilgili, bilim dünyasında merak uyandıran en temel soru, bu ışınların kaynakları, yani nereden gelmiş olabilecekleridir. Kozmik ışınların kaynağı hakkındaki ilk görüş 1960 yılında Bernard Peters tarafından ortaya atılmıştır. Peters kozmik ışınların enerjilerini temel alarak bir yorum yapmış, düşük enerjili kozmik ışınların bulunduğu galaksi içindeki kaynaklardan, yüksek enerjili kozmik ışınların ise bu galaksinin dışındaki kaynaklardan gelebileceği görüşünü ileri sürmüştür.

Kozmik ışınların enerjileri $10^9 - 10^{21}$ eV arasında değişmektedir. Dünya atmosferine her yönde girebilen kozmik ışınlar, galaksi içi manyetik alanın etkisiyle ya da yaptıkları olası saçılmalarla hareket doğrultularını kaybederler. Bu bakımdan kozmik ışınların kaynakları hakkında atmosfere geliş doğrultuları düşünülerek yorum yapmak yanlış olacaktır. Ancak yüksek enerjili kozmik ışınlar yani 10^{19} eV'tan daha yüksek enerjiye sahip kozmik ışınlar manyetik alandan pek fazla etkilenmeyeceğinden, dünya atmosferine doğrusal olarak girerler. Galaksi içindeki olası kozmik ışın kaynaklarının simetrik bir dağılım göstermedikleri ve dünya atmosferine her yönden geliyor olmaları düşünüldüğünde, yüksek enerjili kozmik ışınların galaksi dışından geldiği söylenebilir.

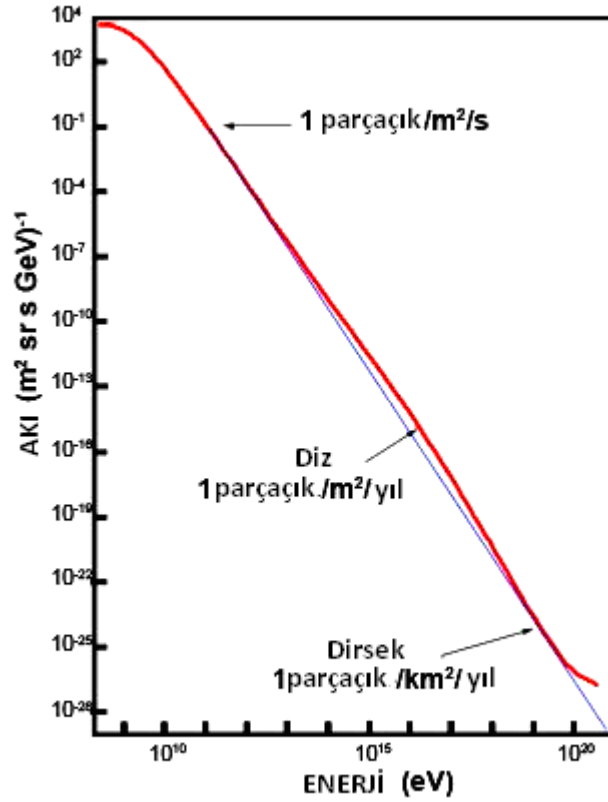


Şekil 2.2 Dünyanın manyetik alanından etkilenen kozmik ışınların doğrultuları, burada 1 en yüksek enerjili, 5 en düşük enerjili kozmik ışını göstermektedir (<http://www.nmdb.eu/?q=node/172>, 2014)

Enerjisi $10^9 - 10^{18}$ eV aralığında olan ışınlar, düşük enerjili kozmik ışınlar olarak adlandırılır. Güneşten kaynaklanan manyetik alandan dolayı daha düşük enerjili kozmik ışınlar dünya atmosferine ulaşamazlar. Kaynakları süpernova patlamaları olan düşük enerjili kozmik ışınlar, galaksi içindeki manyetik alanın etkisiyle bu bölgeye hapsolmuş olup, galaksi içinde defalarca dolanabilmektedirler (Şekil 2.2).

Güneş de bir kozmik ışın kaynağıdır. Güneşte oluşan patlamalardan dolayı uzaya saçılan ağır iyonların ve elektronların oluşturduğu kozmik ışınlar da vardır. Bu ışınlar GeV mertebesinde ve çok küçük enerjilere sahiptir.

Kozmik ışın akısı, kozmik ışınların enerjilerine bağlıdır. Kozmik ışınların enerjilerine göre dağılımı Şekil 2.3’de verilmiştir. Yüksek enerjilerdeki kozmik ışınlar düşük enerjili olanlara nazaran daha az sayıdadırlar, örneğin. 1 m^2 ’ye saniyede düşük enerjili bir kozmik ışın parçacığı düşerken, 1 km^2 ’ye yılda yüksek enerjili bir tek parçacık düşebilmektedir. Yüksek enerjili kozmik ışınlar oldukça düşük akıya sahiptirler.



Şekil 2.3 Kozmik ışın akısının enerjiye göre değişimi (<http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Cosmic+Rays+Energies>, 2014)

Spektrumun yaklaşık olarak doğrusal olması kozmik ışın akısının, enerjiye lineer olarak bağlı olduğunu göstermektedir. Güç Yasası (Power Law) olarak da bilinen bu yasa,

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır.

Buradaki “ α ” değeri yaklaşık olarak 1.7’dir (Stenkin, 2005). Daha yüksek enerjilerde $E < 10^{16}$ eV için $\alpha \approx 2.7$, $10^{16} < E < 10^{19}$ eV için yaklaşık olarak 3.1’dir (<http://www.mpa-garching.mpg.de>, 2014).

Kozmik ışın akısının, enerjiye olan bağlılığının her yerde güç yasasına uymadığı gözlenmektedir. 10^{15} eV değerinde görülen “*knee*” (diz) olarak adlandırılan bölge ve 10^{20} eV civarında gözlemlenen “*ankle*” (dirsek) bölgesi, spektrumun güç yasasına

uymayan bölgeleridir. Güç yasasına uymayan bu bölgeler kozmik ışınların kaynakları hakkında bilgi verebilmektedir. Buradan 10^{15} eV değerinden daha büyük enerjilerdeki protonların ve 10^{18} eV'den büyük enerjilere sahip olan iyonların galaksi dışından geldiği sonucu çıkarılabilir (<http://www.nmdb.eu/?q=node/134>, 2014).

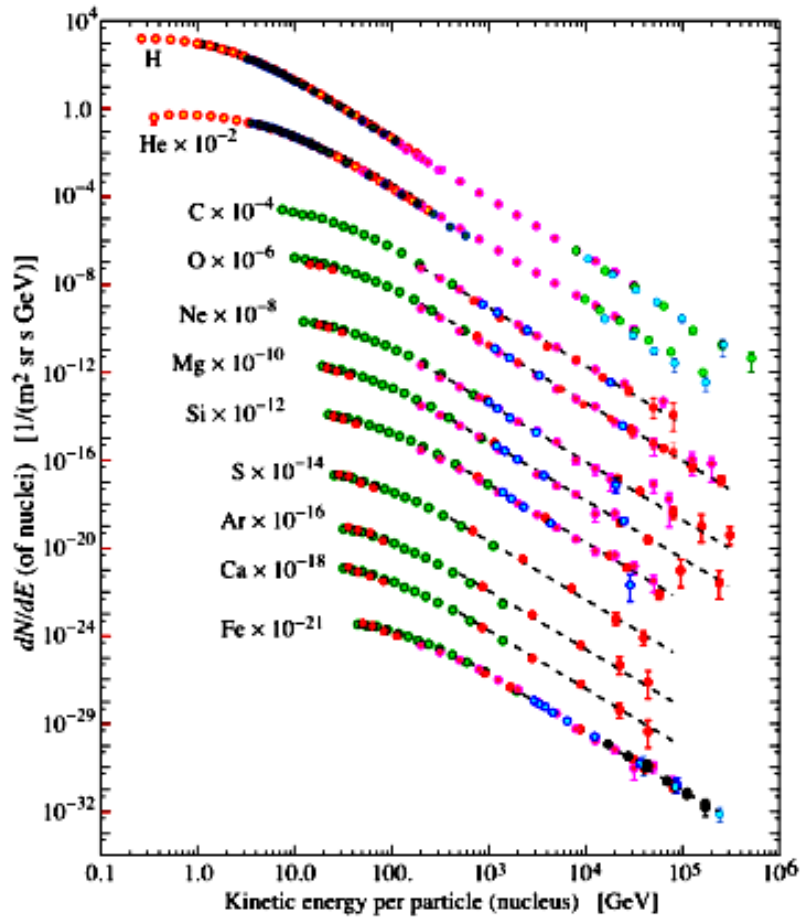
2.2.1 Birincil ve ikincil kozmik ışınlar

Kozmik ışınlar, kaynaklarına ve meydana geliş biçimlerine göre ikiye ayrılır. Birincil kozmik ışınlar çok yüksek enerjilerde, madde ile herhangi bir etkileşim yapmadan doğrudan yeryüzüne ulaşan kozmik ışınlardır. İkincil kozmik ışınlar ise, birincil kozmik ışınların atmosfere girdikten sonra, atmosferdeki gaz atomları ya da moleküllerle olan etkileşimler sonucunda oluşan ve birincil kozmik ışınlara göre daha düşük enerjiye sahip olan kozmik parçacıklardır.

2.2.2 Birincil kozmik ışınlar

Birincil kozmik ışınlar yaşadığımız galakside bulunan yıldız, süpernova gibi astrofiziksel kaynaklardan gelen yüksek enerjilere sahip kararlı parçacıklardır. Atmosfere girdikten sonra hava molekülleriyle yaptıkları çarpışmalar sonucunda ikincil kozmik ışınları oluşturduklarından dolayı çok azı doğrudan yeryüzüne ulaşabilir. Birincil kozmik ışınların, %90'nı hidrojen atomu çekirdeği (proton), %9'unu Helyum atomu çekirdeği (alfa parçacığı) geri kalan kısmını ise ağır çekirdekler ve elektronlar oluşturmaktadır.

Birincil kozmik ışınları oluşturan H, He atomlarının ve ağır iyonların akılarının enerjilerine bağlı değişimi Şekil 2.4'de verilmiştir. Akılarda, enerjinin düşük olduğu bölgelerde bir artış görülmektedir ve çok yüksek enerjilerdeki kozmik ışınların seyrek olarak gözlemlenmektedir.



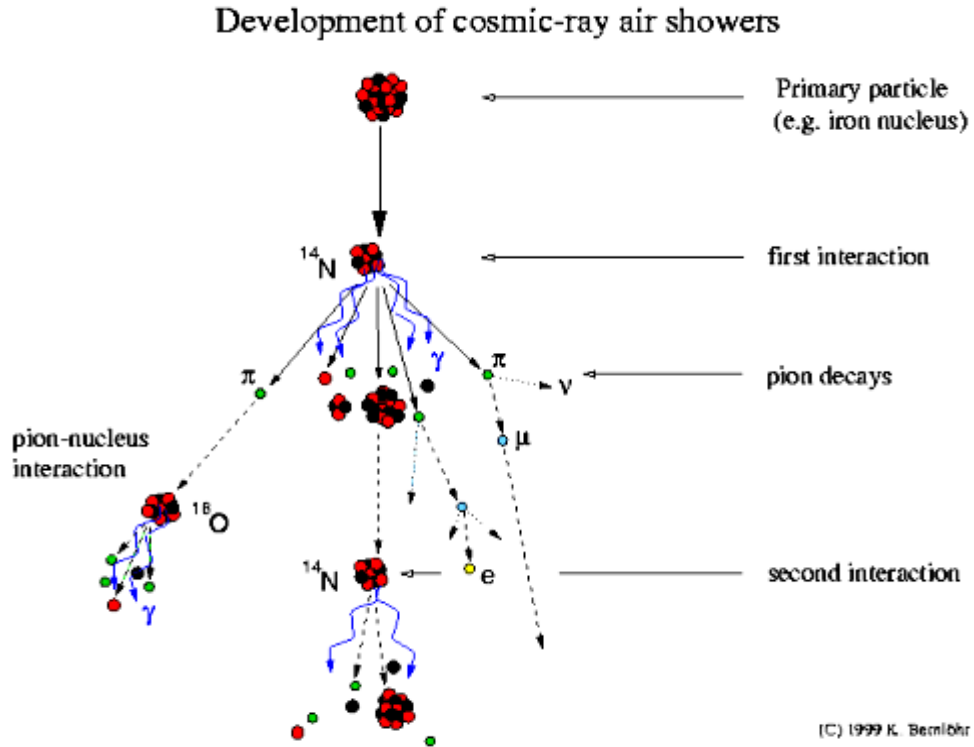
Şekil 2.4 Birincil kozmik ışınların enerji spektrumu (<http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-cosmic-rays.pdf>, 2014)

2.2.3 İkincil kozmik ışınlar

Birincil kozmik ışınların yıldızlar arası gaz bulutlarından veya dünya atmosferinden geçerken yaptıkları çarpışmalar sonucunda ikincil kozmik ışınlar meydana gelirler. İkincil kozmik ışınlar genellikle birincil parçacıkların büyük bir bölümünü oluşturan protonun atmosferdeki oksijen ve nitrojen çekirdekleriyle etkileşmesi ile üretilir. İkincil kozmik ışınlar yeryüzüne ulaşmaya kadar bozunmaya uğrar. Bu bozunma kozmik ışınların enerjileri yeni bir parçacık üretilmesine yetmeyecek kadar küçük bir değere ulaşmaya kadar devam eder. İkincil parçacıkların bu bozunmaları “hava duşu” (air shower) olayını oluşturur.

Birincil kozmik ışınlar atmosferdeki gaz molekülleriyle 30 km yükseklikte etkileşmeye başlar, dolayısıyla ikincil kozmik parçacıklar da bu yükseklikte oluşur. Atmosfer içinde

soğurulmalarından ya da yarı ömürlerinin yeterli derecede uzun olmayışından dolayı ikincil parçacıkların bir kısmı yeryüzüne ulaşamaz. Bu bakımdan yaklaşık 15-21 km aralığında kozmik ışın yoğunluğu maksimumdur. Ancak yeryüzüne doğru gelindikçe kozmik ışın yoğunluğu da bir azalma göstermektedir.



Şekil 2.5 Birincil kozmik ışınların atmosferdeki etkileşmeler sonucunda oluşan parçacık duşu (<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/Showers.html>, 2014)

Atmosferik çekirdeklerin etkisi altında kozmik ışınların enerjilerini dünya yüzeyine yayması, parçacık duşu olarak bilinen bir olaydır (Şekil 2.5). Parçacık duşunun yayılma derecesi birincil kozmik ışınların enerjileriyle ilişkilidir. Parçacık duşu olayı birincil kozmik ışınların 10^{11} eV enerji mertebesine ulaşılabilirdiği durumlarda meydana gelir. 10^{19} eV'luk bir birincil kozmik parçacık ile başlayan duş, atmosferdeki gaz molekülleri ile etkileşmeler sonucunda 10 milyar tane parçacık oluşturabilir.

İkincil kozmik ışınlarda lityum, berilyum ve bor gibi doğada az bulunan bazı atom çekirdeklerine de rastlanır. Yine ikincil kozmik ışınlarda kısa yarı ömre sahip mezon adı

verilen bazı parçacıklara da rastlanır. Birincil kozmik parçacıkların atmosferde yaptığı hadronik etkileşmeler sonucunda nükleonlar, pionlar (π^- , π^0 , π^+), kaonlar (K^- , K^0 , K^+) olmak üzere bazı mezonlar oluşur. Pionların ömürleri oldukça kısa olduğundan yeryüzüne ulaşamazlar. Yüklü pionların (π^- , π^+) bozunmasıyla müonlar (μ^- , μ^+), elektronlar ve müon nötrinolar, (ν_e , ν_μ) nötr pionların (π^0) bozunmasıyla kaybedilen enerjiye karşılık gelen ve elektronun yavaşlatılmasıyla üretilmiş olan (Bremmstrahlung) gama ışınları (γ) oluşur. Bu gama ışınları elektron ve pozitron (e^- , e^+) çifti meydana getirerek çift oluşumuna uğrarlar. Sonuç olarak pionların bozunması sonucunda oluşan kararsız bir lepton olan müon, bozunarak elektron, pozitron, nötrino ve müon nötrinolarını oluşturur.

Çizelge 2.1 Bazı temel parçacıkların yarı ömürleri (<http://pdg.lbl.gov>, 2014)

Tip	İsim	Sembol	Kütle (MeV/c^2)	Yarı Ömür
Lepton	Elektron/Pozitron	e^-/e^+	0,511	$> 4.6 \times 10^{20}$ yıl
	Müon/Antimüon	μ^-/μ^+	105,6	2.2×10^{-6} saniye
	Tau/Antitau	τ^-/τ^+	1777	291×10^{-15} saniye
Mezon	Nötral Pion	π^0	135	8.4×10^{-17} saniye
	Yüklü Pion	π^+/π^-	139,6	2.6×10^{-8} saniye
Baryon	Proton/Antiproton	p^+/p^-	938,2	$> 10^{29}$ yıl
	Nötron/Antinötron	$n/\bar{n}$	939,6	885,7 saniye

Pionların, müonların ve kaonların bozunması sırasında birden fazla reaksiyon meydana gelmektedir. Bu reaksiyonların gerçekleşme olasılıkları en yüksek olanlar çizelge 2.2’de verilmiştir.

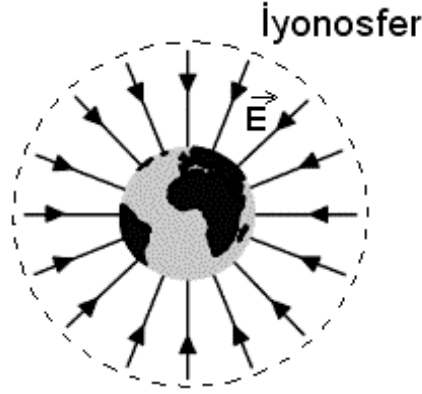
Çizelge 2.2 Bir parçacık düşünde, pion, müon ve kaonların bozunma reaksiyonları ve bu reaksiyonların gerçekleşme olasılıkları (<http://pdg.lbl.gov>, 2014)

Bozunma Reaksiyonu	Gerçekleşme Olasılığı (%)
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	99.99
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	99.99
$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	98.8
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$	≈ 100
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$	≈ 100
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	≈ 63.5
$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	≈ 63.5
$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$	≈ 38.7
$K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$	≈ 38.7

İkincil kozmik ışınların % 60–65 kadarını nötronlar oluşturmaktadır. Kozmik ışın nötronları birincil ve ikincil kozmik ışınların havadaki oksijen ve nitrojen atomlarıyla çarpışması sonucunda üretilir. Yaklaşık 12 dakika olan yarı ömürlerinden dolayı güneşten daha uzak bölgelerden dünyaya ulaşabilmeleri pek mümkün görülmemektedir. Bu bakımdan nötronların birincil kozmik ışın olamayacakları düşünülebilir. Kozmik ışınlarındaki nötronların akısı ve enerji spektrumu daha sonraki bölümlerde tartışılacaktır.

2.3 Dünyanın Elektrik ve Manyetik Alanında Kozmik Işınlar

Dünya, atmosferdeki iyonosfer tabakasına kadar yönü yeryüzüne doğru olan bir elektrik alan etkisindedir. Yapısında iyonlaşmış atomlar, moleküller ve elektronlar bulunan yıldırım, şimşek gibi hava olaylarında önemli rol oynayan iyonosfer tabakası iletken ve pozitif yüklüdür. İyonosfer ve yeryüzü arasındaki elektrik alan çizgileri şekil 2.6’da verilmiştir.



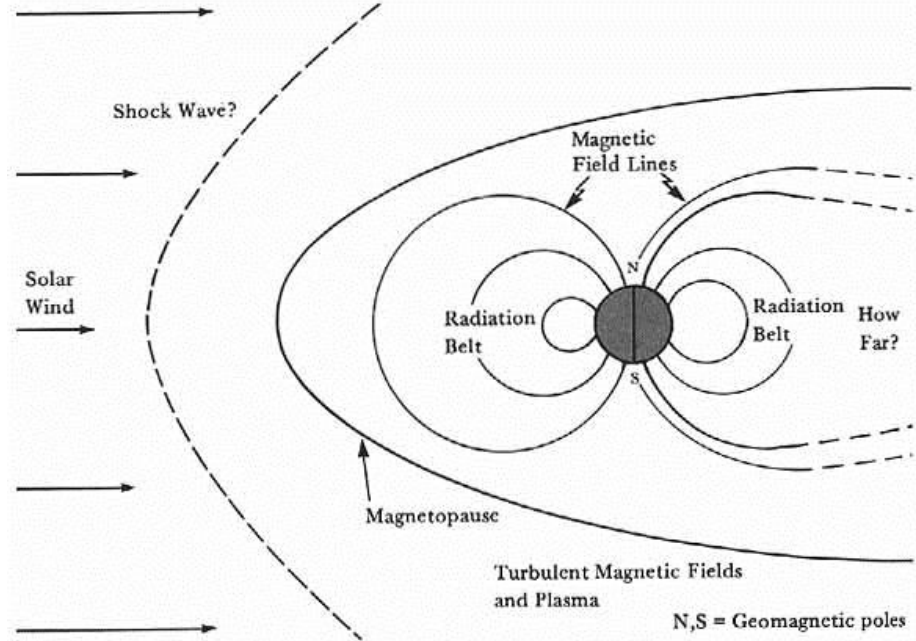
Şekil 2.6 Dünyanın elektrik alan çizgileri (Arslan , 2011)

Yeryüzüne doğru ilerleyen kozmik ışınlar atmosferde dünyanın elektrik alanının etkili olduğu yeryüzüne yakın kısımlara ulaştığında, elektrik yüklerinin cinsine bağlı olarak yeryüzüne doğru ya da ters yönde bir kuvvetin etkisinde kalır. Yeryüzü ile iyonosfer tabakası arasındaki elektrik alan, hava koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bulutlu havalarda atmosferdeki yük yoğunluğuna bağlı olarak, elektrik alan şiddetinin, açık havaya göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu bağlamda yapılan deneysel gözlemler çerçevesinde kozmik ışın akısında, hava koşullarına bağlı olarak farklılık gözlemlenmiştir.

Yeryüzünün 3200 km altında, sıvı demirin hareketi sonucunda bir elektrik akımı oluşur ve bu akım manyetik alanların oluşumuna sebep olur. Yüklü metal parçacıklar manyetik alanlardan geçerek devamlı ve döngüsel bir elektrik akımı yaratır. Çekirdekteki sıvı metalin sürekli hareketine bağlı olarak bir miktar manyetik alan oluşur ve bu alan çekirdekte yeni akımlar oluşturur. Bu akımlar ise daha fazla manyetik alana sebep olarak geri beslemeli bir döngü yaratır. Dünya'nın çekirdeğinde oluşan bu manyetizma, şematik olarak, güney kutbu yakınlarında Dünya'dan çıkar ve gezegeninin etrafını dolaşarak kuzey kutbu yakınlarından tekrar çekirdeğe döner (<http://www.bilim.org/dunyanin-manyetik-alani>, 2014).

Dünyanın güneş tarafındaki manyetik alan çizgileri, güneşten gelen yüklü parçacıklardan dolayı sıkışarak diğer tarafa doğru yönelirler. Böylelikle güneş kökenli parçacıklar gezegene yaklaştıkça, artan manyetik alanın da etkisiyle aşamadıkları,

çevresinden dolaşmak zorunda kaldıkları bir boşluk oluşur. Bu boşluğa manyetosfer denir.



Şekil 2.7 Dünyanın etrafındaki manyetik alan çizgileri ve manyetosfer
(<http://history.nasa.gov/SP-4211/ch11-2.htm>, 2014)

Dünyanın manyetik alanı ve manyetosfer, kozmik ışınlar için bir kalkan görevi görür. Kozmik ışınların enerjilerine bağlı olarak dünyanın manyetik alanı parçacıkların hareket yönlerini saptırabilir. Ancak yeterli enerjilerdeki kozmik ışınlar atmosfere ulaşabilmektedir. Dünyanın manyetik alan şiddeti, çok büyük enerjilere sahip kozmik parçacıkların yörüngelerinde ve enerjilerinde bir değişim meydana getiremez.

Yeryüzünün farklı yerlerinde farklı değerler alan manyetik alan şiddeti, kutuplarda daha yüksektir, ekvatora inildikçe manyetik alan şiddeti azalmaktadır. Güneşten gelen parçacıklar manyetosferin saptırması sonucu kutup bölgelerine yakın yerlerde atmosfere girerler. Bu kozmik ışın parçacıklarının hava molekülleriyle etkileşimleri sonucu kutup bölgelerinde doğal kozmik ışımlar gözlemlenir (Aurora Borealis).

3. KOZMİK RADYASYON ve DOZ HESAPLAMALARI

3.1 Kozmik Radyasyon

Kozmik ışınların yoğunluğu güneşteki patlamalara, yerin manyetik alanına ve yerküreden yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir. Kozmik ışın yoğunluğu ekvator dan kutuplara gidildikçe artmakta böylece, insanların aldığı kozmik radyasyon, oranı da yükselmektedir. Uçuş yüksekliğindeki kozmik ışın yoğunluğu, yer seviyesine oranla daha fazla olduğundan, uçakla yapılan seyahatlerde daha çok kozmik ışına maruz kalmaktadır. Uçuşlarda alınan radyasyon dozu, uçuş süresine, uçuş rotasına ve irtifaya bağlı olarak değişim göstermektedir.

Amerikan Sivil Havacılık Otoritesi ve Avrupa Ortak Havacılık Otoritesi (JAA) gibi kuruluşlar kozmik radyasyon riskini en aza indirecek çalışmalar yürütmektedir. Yapılan ölçümlere göre 11 bin metre yüksekte 4 saat yolculuk yapan bir kişi, röntgen filmi çekilmiş kadar radyasyona maruz kalmaktadır. Mesleki açıdan uzun yıllar yüksek irtifalarda çalışan uçuş mürettebatının bazı kanser gruplarına yakalanma riski artmaktadır. Bu bakımdan uçuşla ilgili yönetmeliklere göre, bir pilotun ayda 110 saatin üzerinde uçuşu sakıncalı görülmektedir.

3.2 Doz Hesaplamaları

Günümüzde farklı araştırma merkezlerinde çeşitli detektör sistemleri kullanılarak kozmik radyasyon ölçümleri düzenli olarak yapılmaktadır. Ayrıca çeşitli kodlar geliştirilerek kozmik radyasyon simülasyonları da yapılmaktadır. Kozmik radyasyona maruz kalınan çeşitli iş kolları için alınan dozun, yönetmelik çerçevesinde tutulması amacıyla denetleme ve kontrol çalışmaları yapılmaktadır.

ICRP ve ICRU kuruluşları radyasyondan korunma, radyasyon tedavisi, diagnostik radyoloji ve nükleer tıp gibi alanlarda radyasyon çalışanlarının çalışma koşullarını belirlemektedir. Buna bağlı olarak da radyasyon ölçüm ve birim standartlarının

belirlenmesine yönelik çalışmalarını sürdürmektedir. Bu çalışmada da doz hesabında kullanılan insan modelinin standartları ICRP (2007)'ye göre seçilmiştir.

Bir insanın maruz kaldığı radyasyon miktarını tanımlamak için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bu amaçla insan vücudundaki tüm organlara ve dokulara ait ağırlık faktörleri belirlenerek, organların ve dokuların maruz kaldığı eşdeğer doza bağlı olarak efektif doz aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır (ICRP, 2007).

$$E = \sum w_T H_T = \sum w_T \sum w_R D_{T,R} \quad (3.1)$$

Burada w_R radyasyon ağırlık faktörü, w_T dokular ve organlar için ağırlık faktörü, $D_{T,R}$ organ ya da doku tarafından soğrulan enerji ve H_T ortam eşdeğer dozu olarak tanımlanır. D birim kütle başına soğrulan enerji,

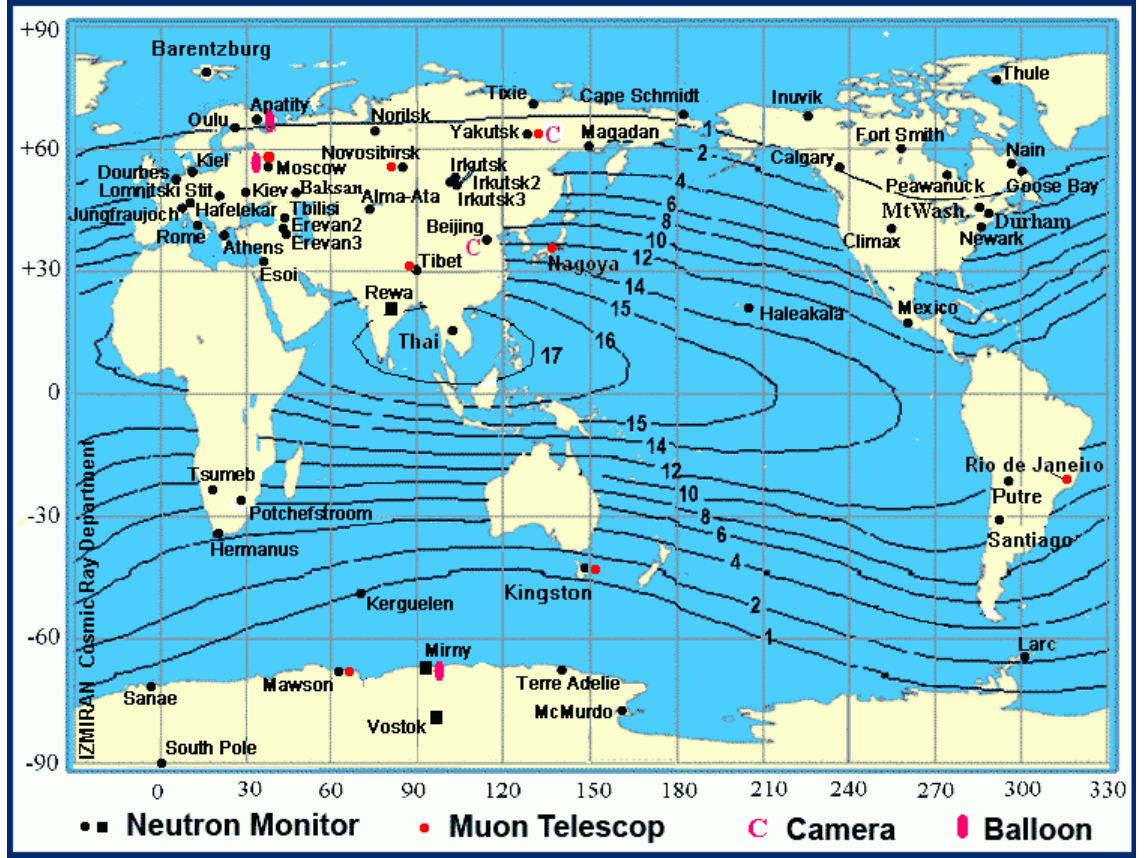
$$D = \frac{dE}{dm} \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır.

Sievert (Sv), canlı dokunun maruz kaldığı radyasyonun etkisini gösteren "doz eşdeğerinin" SI sistemindeki birimidir ve $\frac{J}{kg}$ boyutundadır.

Efektif doz değerinden akının hesaplanması için bir dönüşüm katsayısı (Conversion Coefficient) kullanılır, birimi $pSvcm^2$ 'dir (ICRP 2007).

$$CC = \frac{E}{\Phi} \quad (3.3)$$



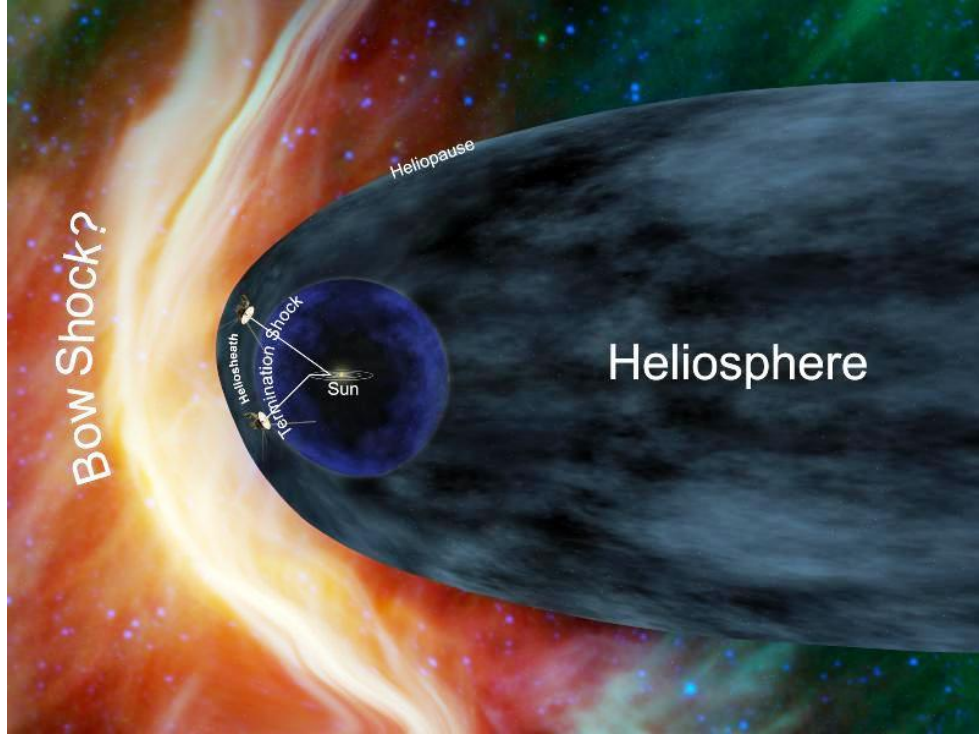
Şekil 3.1 Dünyada kozmik radyasyon ölçümü yapan dedektör istasyonları
(<http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>, 2014)

3.3 Heliocentric Potansiyel ve Cut Off Rigidity

3.3.1 Heliocentric potansiyel

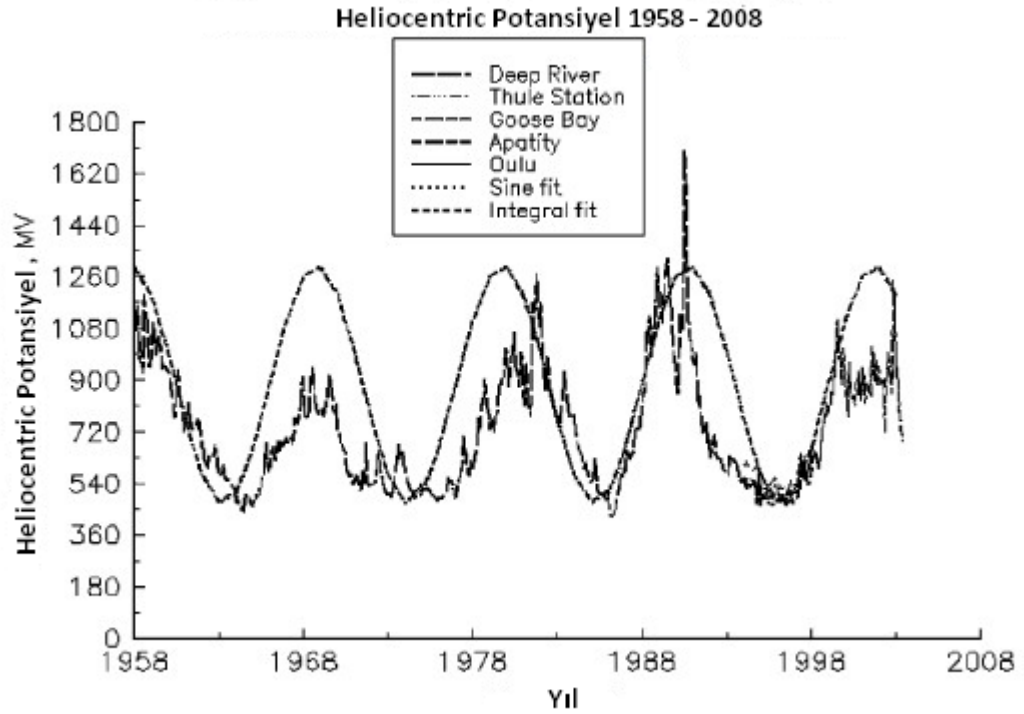
Heliocentric potansiyel güneş aktivitelerindeki değişikliklerden kaynaklanan galaktik radyasyon seviyelerindeki değişimi açıklamak için kullanılan bir terimdir. Güneş rüzgârları yoluyla oluşan kozmik radyasyon için yazılan kararlı-durum difüzyon denkleminin çözümünün bir sonucudur. Potansiyel, herhangi bir yükseklikte, herhangi bir enlem ve boylamda bulunan nötron monitöründen elde edilen gerçek zamanlı kozmik radyasyon spektrumundan belirlenebilir (O'Brien vd. 2005). Heliosphere içindeki kozmik ışınların akısından elde edilen bir *heliocentric* potansiyel, rüzgârının ulaşabildiği yıldızlar arası bölgeye kadar uzanan bir etki alanına sahiptir.

$$U = \frac{1}{3} \int_1^{RHP} \frac{V}{\kappa(r)} dr \quad (\text{O'Brien 2006}). \quad (3.4)$$



Şekil 3.2 Yıldızlararası gazın içindeki kozmik ışınların etkisinde bulunan heliosphere (http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/voyager-heliosheath-labeled.html, 2014) Voyager 1 ve Voyager 2 uzay araçları, heliosheath içinde güneş sistemi ve ötesine dair fotoğrafları ilk görünöleyen uzay araçlarıdır.)

Uzayda güneşin erişebildiği bölgede, (güneş sistemi) güneş rüzgârlarının yıldızlararası ortamdan gelen parçacıklar ile etkileşmesi sonucunda güneş rüzgârının hızı azalmaktadır. Bu azalma *Heliosheath* denilen bir oval yapı oluşturur. Böylece Şekil 3.2’de görüldüğü gibi *Heliosheath*’i de içine alan, dış sınırına *Heliopause* adı verilen *Heliosphere* oluşur. Güneş rüzgârının bittiği yerde yıldızlararası rüzgâr başlar. 13 Eylül 2013 tarihinde NASA tarafından yapılan açıklamaya göre, Voyager 1’in tamamen güneş sisteminden ayrılıp şimdiye kadar ulaşılamayan bu yıldızlararası bölgeye girdiği bildirilmiştir (http://www.nasa.gov, 2014).



Şekil 3.3 *Heliocentric* potansiyelin, çeşitli yerlerde bulunan detektörler yardımıyla alınan ölçümler sonucunda 1958–2008 yıllarındaki değişimi (O’Brien 2010)

Tez çalışmasında kullanılan CARI, CARI-6 ve CARI-6P programlarında *heliocentric* potansiyel kodların veritabanında kayıtlıdır. *Heliocentric* potansiyelin zamanla değişimi, “*cut off rigidity*” parametresini etkileyeceğinden, galaktik kozmik radyasyon da değişecektir. Kodlar, kullanıcının girdiği güne bağlı olarak uygun potansiyel değerini kullanır. Bu değerler kimi enstitüler veya resmi kurumlar tarafından düzenli olarak ölçülmekte ve internet üzerinden yayınlanmaktadır. Veri olarak girilen tarihler için *heliocentric* potansiyel değeri kullanılan programın veritabanında mevcut değilse, gerçek zamanlı verilere kolaylıkla ulaşılabilir.

3.3.2 *Cut off rigidity*

Jeomanyetik *cut off rigidity*, dünyanın manyetik alanı tarafından sağlanan koruma kalkanının nicel bir ölçüsüdür. Daha kesin olarak *cut off rigidity*, enerjetik yüklü parçacıkların manyetosferden geçerken oluşan yönelimini belirleyen, belli bir konuma göre tanımlanmış bir yön fonksiyonudur. Manyetik alan içinde yüklü parçacığın bükülme eğilimi için bir eşik değeri ölçüsüdür.

Dünyanın manyetik alanı içinde hareket eden yüklü parçacık Lorentz kuvveti etkisiyle sapma eğiliminde bulunacaktır. Parçacığın jeomanyetik alandan geçebilmesi için sahip olduğu momentuma bağlı olarak belirlenen eşik değer, *magnetic rigidity* olarak tanımlanır, genellikle GV (10^9 volt) mertebesinde dir.

$$\rho = \frac{pc}{Ze} \quad (3.5)$$

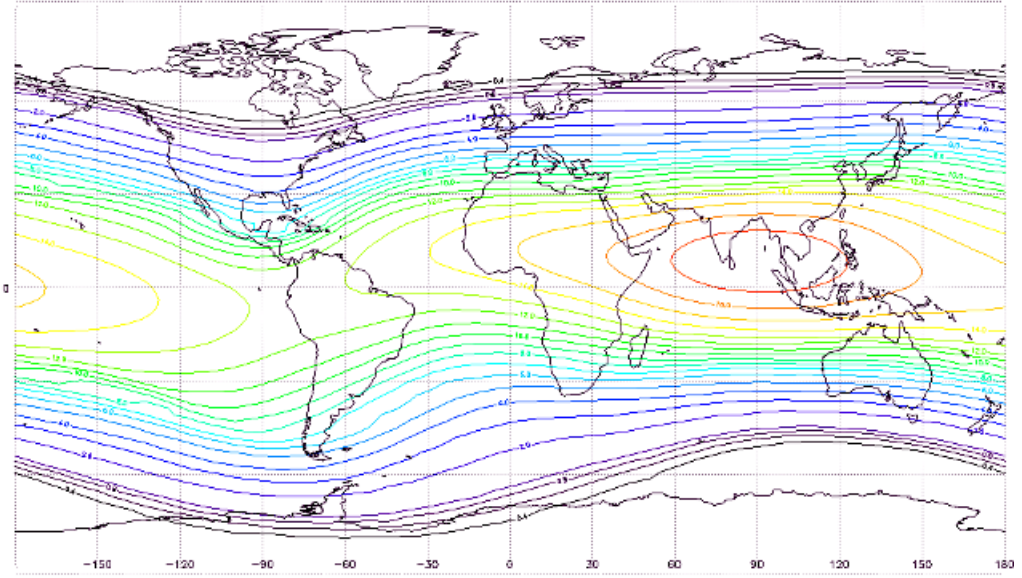
Burada ρ relativistik momentum (eV/c), c ışık hızı, e elementer yük ve Z atom numarasıdır.

Manyetosferin her bir noktasında minimum bir *rigidity* değeri olmak zorundadır. Bu değere *threshold* (eşik) ya da *cut off rigidity* adı verilir. Manyetosfere giren parçacığın sahip olduğu *rigidity* değeri, manyetosferin o noktada sahip olduğu *cut off rigidity* değerinden büyük olmalıdır. Böylelikle yüklü parçacık manyetosferden geçebilir. Dünyanın herhangi bir bölgesindeki *cut off rigidity* değerini belirleyebilmek için Störmer teorisinde verilen bağıntı kullanılır.

$$\rho_c = \frac{M \cos^4 \lambda}{R^2 \left[\sqrt{(1 + \cos a \cos^3 \lambda)} + 1 \right]^2} \quad (3.6)$$

Burada ρ_c *Cut-off Rigidity* (GV), M dünyanın normalize edilmiş manyetik dipol momenti, “a” pozitif iyonun geliş açısı, R jeosentrik yarıçap (km) ve λ ise manyetik enlem olarak adlandırılır.

Ayrıca *cut off rigidity*’leri belirlemek için manyetosfer içinde yüklü parçacıkların yerinin saptanmasına yönelik çeşitli modeller kullanılmaktadır (http://www.ph.surrey.ac.uk/satellites/main/tutorial2_1.html, 2014).



Şekil 3.4 Mart 2004 tarihinde alınan efektif dikey *cut off rigidity* eğrileri (Störmer teorisi, iyonun geliş açısı $\alpha = 90^\circ$) (<http://geomagsphere.mib.infn.it/geomag/>, 2014)

3.4 Kozmik Işınlardan Kaynaklanan Doz Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde kozmik radyasyon ve buna bağlı olarak ortam (ambient) doz eşdeğeri, efektif doz ve dönüşüm katsayılarının hesaplandığı ya da bu verilerin kullanılarak çeşitli simülasyonların yapıldığı kodlar karşılaştırılacaktır. Bu kodlardan bir kısmı bilimsel araştırmalarda bir kısmı ise sadece rutin uçuşlarda radyasyondan korunmak için alınabilecek önlemleri önceden belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Efektif doz, kullanılan kodlarda doğrudan hesaplanmayabilir. Efektif dozun en doğru biçimde elde edilebilmesi için kodların, farklı ortamlarda ya da farklı çalışma koşullarında değerlendirilerek amacına uygun şekilde kullanılması önemlidir.

AVIDOS, EPCARD, JISCARD EX, PANDOCA, PLANETOCOSMICS (Bern code), ve QARM kodları bir Monte Carlo simülasyonu kullanılan programlardır. Doz hesaplamalarında SIEVERT ve EPCARD kodları önde gelen programlardır. CARI programı LUIN99/LUIN2000 ve FREE programı ise PLOTINUS kodlarını kullanarak parçacığın atmosfer içindeki hareketini tanımlayan ve analitik hesaplamalar yapan kodlardır. FDOScalc, PCAIRE gibi diğer bazı kodlar sadece ölçümlere dayalıdır. Kimi

programlarda ise efektif doz ile ortam dozu arasındaki dönüşüm, Monte Carlo simülasyon teknikleri kullanılarak hesaplanabilir.

Bu kodlar çeşitli ülkelerde uçuş mürettebatının aldığı kozmik radyasyon dozunun hesaplanmasında kullanılmaktadır. Çeşitli kuruluşlarla bilgi paylaşımına gidilmekte ve dünya çapında ortak bir veri havuzu oluşturulmaya çalışılmaktadır. Radyasyondan korunmaya yönelik çözümler tartışılmaktadır. Örneğin; EPCARD sürümleri, FREE ve PCAIRE Almanya’da doz hesaplamaları için sivil havacılık otoriteleri tarafından onaylanmıştır. AVIDOS 1.0 ve FREE 1.3.0 Avusturya’da akredite edilmiştir. SIEVERT kodu ise Fransız havacılık otoriteleri tarafından başlatılan bir program ile havayolları şirketlerinde ortak olarak kullanılan bir koddur.

3.4.1 AVIDOS

AVIDOS kodu, nümerik hesaplamalara ve deneysel modellemelere dayalıdır. Sayısal hesaplamalar, (FLUKA) Monte Carlo kodu ile gerçekleştirilir. Birincil proton enerji spektrumunu ve dünya atmosferinin belli bir bölgesinde yoğunluk profilini göz önüne alarak dünyanın çevresel ve galaktik kozmik radyasyon modellemesini çıkarmaktadır [1]. AVIDOS programı ICRP 60’a göre Pelliccioni’nin dönüşüm katsayılarını kullanarak enerjiye bağlı akı değerini, ortam doz eşdeğerine ve efektif doza çevirmektedir (Pelliccioni, 2000).

AVIDOS kodu, uçuş sırasında rota üzerinde her mevkiin dozunu hesaba katarak dozunu hesaplamaktadır. Kod, rotanın dozunun hesaplanması için, dakika dakika uçuş süresi, coğrafik konum ve yükseklik bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca AVIDOS kodu yeryüzünde bulunan nötron monitörleri tarafından kaydedilen, güneşin aktivitesindeki değişiklikleri düzenli olarak sisteme dâhil eden verileri kullanır. AVIDOS Avusturya’da uçuş mürettebatının aldığı dozun hesaplanmasında yönelik olarak akredite edilmiştir. Bu akreditasyon Avrupa Birliği genelinde tanınmaktadır. İnternet sürümü AVIDOS - WEB1.0 olarak basitleştirilmiş bir biçimde kamuoyuna sunulmuştur. Seyahat edilecek iki nokta arasında tahmini uçuş süresi (1 saat, 15 saat 45 dakika arasında), uçuş yüksekliği (8–15 km) girilerek tahmini efektif doz değeri hesaplanmaktadır.

3.4.2 CARI

CARI programı Amerika’da Ulusal Havacılık Dairesi Sivil Havacılık Sağlık Enstitüsü (F.A.A. Federal Aviation Administration Civil Aerospace Medical Institute) tarafından 1980’lerin sonlarında geliştirilmiştir. Bazı sürümlerinde 60000 feet (~18,3 km), bazı sürümlerinde 87000 feet’e (~26,5 km)’ye kadar galaktik kozmik radyasyondan kaynaklı efektif doz, uçuşta seyahat eden bir antropomorfik fantom (anthropomorphic phantom) için hesaplanmaktadır. CARI-2 ‘den itibaren CARI, LUIN radyasyon transport programına dayalı olarak geliştirilmiştir, güncel versiyonu olan CARI-6’da ise LUIN99 / LUIN2000 transport kodu kullanılmaya başlanmıştır (O’Brien vd. 2003). CARI-6: CARI-6, CARI-6M, CARI-6P, CARI-6PM, olmak üzere güncel olan 6 versiyonu bulunmaktadır. Bu sürümlerde efektif dozların hesaplanması için ICRP 60’daki radyasyon ağırlık faktörleri kullanılmaktadır. Ayrıca ICRP 60’a ek olarak P ve PM sürümlerinin çıktılarında NCRP 116 raporunda yer alan radyasyon ağırlık faktörleri kullanılarak tek bir bölge için efektif doz ve tüm fantom için soğrulan tahmini doz oranları hesaplanmaktadır. Doz değerleri, radyasyon dozuna katkıda bulunan her tür parçacık için (nötron, proton, müon, elektron...) ayrı ayrı hesaplanır.

CARI-6 ve CARI-6P kodlarında uçuş doz hesaplamaları için irtifa yükseklikleri, her bir farklı irtifada ne kadar sürede uçulduğu, tahmini kalkış ve iniş süreleri programa girilerek uçuş sırasında uçak mürettebatının maruz kaldığı doz değerleri hesaplanır. CARI kodu enlem ve boylamı yani jeodezik konumu da göz önünde bulundurarak kozmik ışın yoğunluğuna bağlı olarak efektif dozu hesaplamaktadır.

3.4.3 EPCARD

EPCARD.NET (The European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) tamamıyla yeni, nesne yönelimli programlama temelli, Microsoft Windows (NT/2K/XP/Vista..), Linux, Mac OS X ya da Solaris gibi Unix Kernel tipi işletim sistemleri platformlarında çalışan, grafik ara yüzlerle sahip, web hizmeti de sunan bir doz hesaplama kodudur (Mares vd. 2009). Helmholtz Zentrum München tarafından

geliştirilen EPCARD.NET 5.4.1 versiyonu Almanya’da sivil havacılık otoriteleri tarafından onaylanmıştır (Schraube vd. 2002).

EPCARD.NET’in çözümleri dünya atmosferi ile kozmik radyasyon arasındaki etkileşimi hesaba katan FLUKA programındaki Monte Carlo hesaplamalarına dayanmaktadır (Roesler vd. 2002). Kullanılan modelde dünya atmosferinin üst tabakalarında etkileşmeye başlayan birincil kozmik ışınların oluşturduğu, çoğunluğunu nötronların meydana getirdiği proton, elektron, müon gibi ikincil parçacıkların kozmik radyasyona katkısı, deniz seviyesine kadar çeşitli atmosfer derinliklerinde tüm fiziksel koşulları, güneş aktivitesini ve jeomanyetik konumu da göz önünde bulundurarak elde edilir. FLUKA hesaplamalarında akı–doz dönüşüm katsayıları kullanılarak ortam doz eşdeğeri ve efektif doz nötron, proton, elektron, müon, pion gibi parçacıklar için ayrı ayrı hesaplanır. EPCARD.NET ‘in veri tabanında dönüşüm katsayıları, uygun doz dönüştürme fonksiyonu ile barometrik yükseklik, *cut off rigidity* gibi parametreler hesaplamalara katılarak hesaplanır.

3.4.4 FDOScale

FDOScale, PTB tarafından ölçülen değerlerden ortam doz eşdeğeri oranlarını oluşturulan matematiksel temelli bir koddur. 1997–1999 yılları arasında 892 noktada iyonizasyon odası tipi ve daha gelişmiş detektörlerle yapılan ölçümler sonucunda bu veri tabanı oluşturulmuştur. 2003–2006 yılları arasında TEPC (Tissue-Equivalent Proportional Counter) ile 1537 noktada yapılan ölçümlerle veri tabanı güncellenmiştir (Wissmann 2006).

Bu modele dayalı ölçümlerde yükseklik, *vertical cut-off rigidity* ve nötron monitörlerinin hassasiyet oranları gibi parametreler göz önünde bulundurulur. Kodun amacı, doz oranları dağılımları için farklı yüksekliğe, farklı güneş aktivitelerine ve farklı coğrafik konumlara göre kullanımı basit bir fonksiyonel açıklama getirmektir.

3.4.5 IASON-FREE

IASON-FREE, K. O'Brien'nın Boltzmann transport denkleminin sayısal analitik çözümlerine yönelik çalışmalarına dayanmaktadır (<http://physics.nau.edu>, 2014). Ayrıca galaktik kozmik radyasyonun hesaplanmasına yönelik kodların bir karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu kodda olası veri azaltma yöntemine gidilmeden bir model düşünülerek uzay parametreleri, düzgün üçgen biçimli dört boyutlu bir ızgara üzerinde 1388650 noktada önceden hesaplanabilmektedir. Uçuş rotalarının sayısının sınırlı olmadığı bu modelde, standart uçuş yörüngeleri oluşturulmaktadır. Bu kod diğer kodlar ile karşılaştırıldığında, enerji, parçacık akı oranları ya da dönüşüm katsayıları verilerinin girilmesine ihtiyaç hissetmemektedir. Güneş aktiviteleri doz oranları, *vertical cutoff rigidity* ve zaman dilimlerine bağlı olarak değişkenlik gösteren *heliocentric* potansiyel hesaplamalarda kullanılır. Bu uçuş kodu 2004 yılında Almanya'da sivil havacılık otoriteleri tarafından tanınmıştır. Ayrıca IASON kodu uçuş mürettebatı doz ölçüm hizmet standardı sunan laboratuvar ISO IEC tarafından uygunluk ve yeterlilik onayı almıştır (O'Brien 2010).

3.4.6 JISCARD EX

2006 yılında Japonya Radyasyon Konseyi (MEXT) havayolları şirketleri için uçuş mürettebatının yıllık aldığı kozmik radyasyon miktarının 5 mSv'in altında kalması gerekliliği ile ilgili bir hüküm yayınlamıştır. Bu hüküm doğrultusunda Ulusal Radyolojik Bilimler Enstitüsü (NIRS) havayollarında rota doz ölçümlerinin takibi için kullanımı kolay JISCARD EX kodunu geliştirmiştir. JISCARD EX Excel VBA (Applications Visual Basic) ile yazılmıştır, Microsoft Excel 2003 ve 2007'de çalışmaktadır. PHITS tabanlı PARMA analitik modeli kapsamında geliştirilen kod ile uçuş boyunca doz oranları hesaplanmaktadır. JENDL veri bankası ile PHITS Monte Carlo kodu kullanılarak PARMA analitik modeliyle 20 km'ye kadar doz oranları ile ilgili simülasyonlar oluşturulmaktadır (Watanabe vd. 2005).

JISCARD EX sürümlerinde yedi temel parçacık için, (nötron, proton, fotonlar, elektronlar, pozitron, muon ve helyum iyonları) dönüşüm katsayıları kullanılarak ortam doz eşdeğeri ve efektif doz değerleri hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda PHITS kodu çerçevesinde, izotropik ışınlama geometrisi ve uçağın yapısının nötron spektrumuna bağlılığı göz önünde bulundurulur.

3.4.7 PANDOCA

PANDOCA (Professional Aviation Dose Calculator) kodu Almanya Havacılık Tıp Enstitüsü'ndeki (Institute of Aerospace Medicine) Almanya Havacılık Merkezi (DLR) tarafından sadece bilimsel amaçlarda kullanılmak için geliştirilmiştir. Geant 4.9.1 ve Planetocosmics kullanılarak atmosfer modellemesi ile dünyanın manyetik alanının da göz önünde bulundurulmasıyla maruz kalınan radyasyon doz hesaplamaları yapılabilir (<http://cosray.unibe.ch>, 2014).

Girilen uçuş bilgileri ve her bir coğrafi konum için efektif doz oranı ve ortam doz eşdeğeri hesaplanabilir. İkincil parçacıklar için verilen yükseklikte akı-doz dönüşümü kullanılarak efektif doz ve ortam dozu hesaplanabilir. Enlem ve boylama bağlı olarak modellemelerde *effective cut-off rigidity*, jeomanyetik koruma, manyetik alan değişimleri göz önüne alınır (<http://inf.infn.it>, 2014).

3.4.8 PCAIRE

PCAIRE (The Predictive Code for Aircrew Radiation Exposure) uçuş mürettebatı ve yolcular için maruz kalınan radyasyon dozunun modellenmesini sağlayan yarı deneysel bir koddur. www.pcaire.com sitesi -40° ile 85° enlemleri arasında yapılan uçuşların yayınlandığı dünyanın en büyük veri havuzuna sahip bir doz ölçüm portalıdır. PCAIRE ticari ve askeri uçuşlarda maruz kalınan kozmik radyasyon dozların ölçülmesine odaklanmıştır. TEPC (Tissue-Equivalent Proportional Counter) ile yapılan dakikalık ölçümler çerçevesinde, *heliocentric* potansiyel, güneş modülasyonu, rakım düzeltme işlevleri, küresel konum, yükseklik gibi verilerin birbirine olan ilişkisi sağlanır ve belirli

bir uçuş rotası üzerinde toplam doz eşdeğeri elde edilebilir. PCAIRE kodunun kullanımında uçuş rotası kalkış, iniş noktaları, uçuş tarihi, rakım bilgileri gibi veriler kullanıcı tarafından girildikten sonra ortam eşdeğer dozu ve efektif doz hesaplanabilir.

3.4.9 PLANTEOCOSMICS

PLANETOCOSMICS yazılım paketi Monte Carlo yöntemleri kullanarak parçacıklarının madde içerisinden geçişini simüle eden GEANT 4 programına dayanmaktadır (Desorgher 2005). Dünya atmosferine giren yüklü parçacıkların dünyanın manyetik alanında davranışı ve hadronik-elektromanyetik etkileşimler sonucunda oluşan parçacık duşu modellenmesi yapılabilir. PLANETOCOSMICS kod uygulaması ile kullanıcı tarafından belirlenen yüksekliklerde parçacıkların akı oranları ve enerjileri, güneşten gelen parçacıkların akı oranları, yüklü parçacıkların atmosferdeki iyonizasyon oranları hesaplanabilir.

3.4.10 QARM

QARM (The QinetiQ Atmospheric Radiation Model) Monte Carlo radyasyon koduna dayalı kozmik radyasyondan ve güneşten gelen parçacıklardan kaynaklı herhangi bir zaman ve herhangi bir yerdeki atmosferik tepki fonksiyonlarının hesaplanmasında kullanılır. Yeryüzünde ve uzayda bulunan nötron detektörleri ile yapılan ölçümler sonucunda alınan verileri kullanarak proton ve alfa parçacıklarının kozmik radyasyon spektrumları oluşturulabilir (O'Neill 2006). QARM'ın güncel sürümünde MCNPX kodu kullanılarak hem proton hem de alfa parçacıkları için tepki fonksiyonları hesaplanmaktadır (<http://mcnpx.lanl.gov>, 2014). Kodun geliştirilmesine devam edilmekte ve ağır iyonlar için de tasarlanması düşünülmektedir.

3.4.11 SIEVERT

Fransa'da hava taşımacılığında, uçakların izlediği rotalar göz önüne alınarak, uçuş mürettebatının maruz kaldığı kozmik radyasyon miktarının belirlenmesi ve yasal

dozimetrik seviyelerde olup olmadığının kontrolü için tasarlanan bir koddur (<http://sievert-system.org>, 2014). Güneş aktivitelerinin normal olduğu seviyelerde, EPCARD'ın kullandığı verilerle dozimetrik girdiler oluşturulur. Ayrıca güneşten kaynaklı kozmik radyasyonun da doz hesabını yapan bir model geliştirilmiştir. Bu hizmet Radyolojik Koruma ve Nükleer Güvenlik Enstitüsü (IRSN) tarafından sağlanmaktadır.

Dünya çapında 80000 feet (24,384 km) yüksekliğe kadar yani galaktik kökenli radyasyon noktasına kadar belli bir doz haritası oluşturulmuştur. Doz oranları güneş aktivitelerini de hesaba katarak her ay güncellenmektedir. Yeryüzünde belli noktalarda uçaklarda nötron monitörleri ya da diğer detektör sistemleriyle düzenli kozmik radyasyon ölçümleri yapılmaktadır. Bu ölçümler kod tarafından verilen değerlerin doğrulunu onaylamak ve gerekirse düzeltmek için kullanılmaktadır. Uçuş bileti üzerindeki bilgiler ile SIEVERT internet sitesine www.sievert-system.com erişim yapıldığında uçuş sırasında alınacak doz miktarı öğrenilebilir.

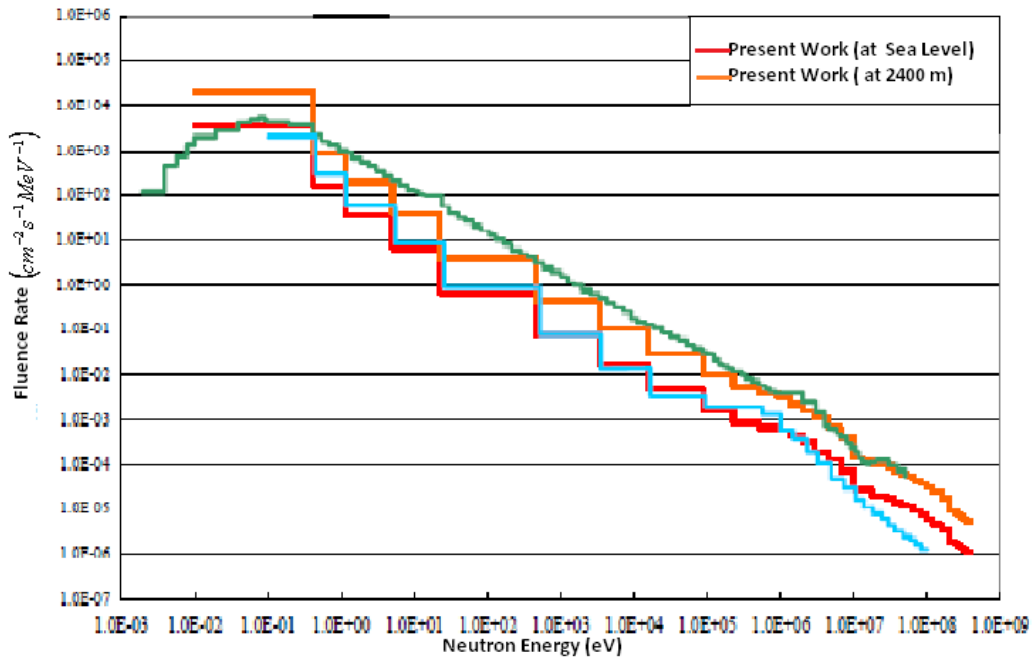
4. NÜMERİK HESAPLAMALAR

4.1 Nötron Doz Ölçümleri Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları

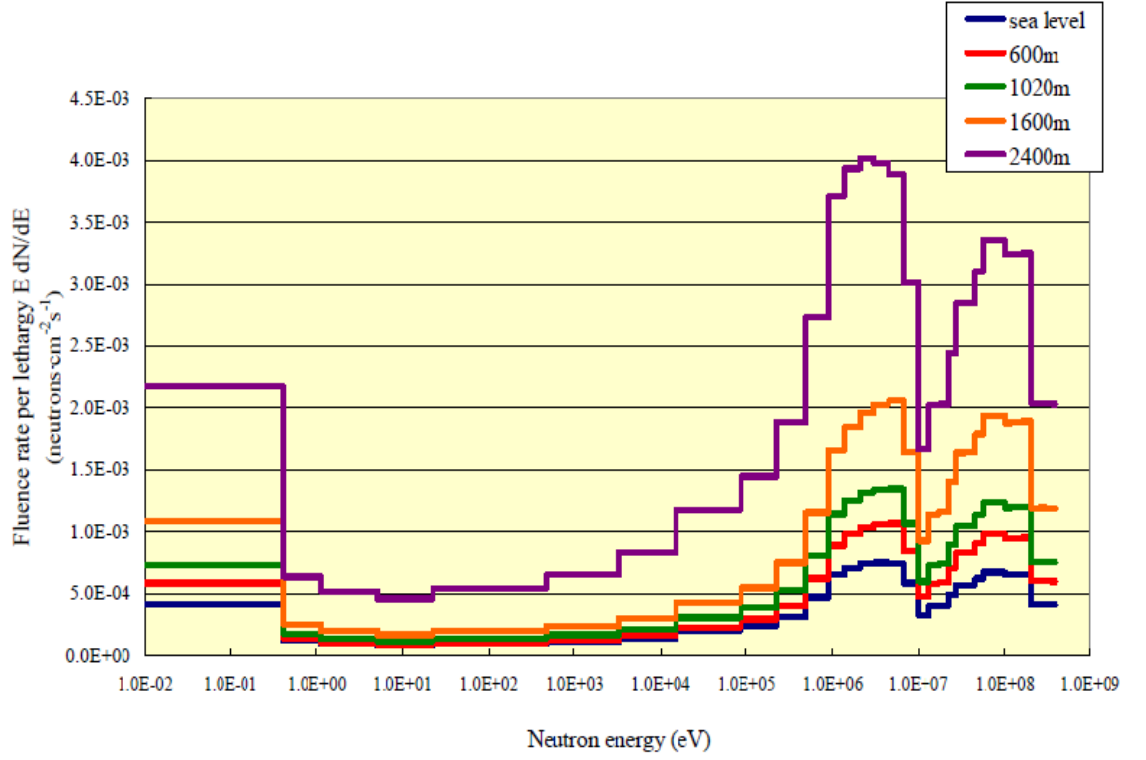
Bu bölümde CARI-6 programı ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı makalelerde yapılan çalışmalar özetlenecektir. Bu tür çalışmalarda

- Farklı yüksekliklerde, farklı uçuş sürelerinde, farklı enlem ve boylamlarda ortam doz eşdeğerinin ve efektif doz değerlerinin değişimleri,
 - Kozmik ışın kaynaklı nötronların enerjisinin akıya göre değişimi,
- incelenmektedir.

Kowatari vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, deniz seviyesinde, 2400 m civarında Fuji dağında *Multi-sphere neutron Spectrometer* (BS, çok yüzeyli nötron detektörü) ile yapılan ölçümler ile akının nötron enerjisine göre davranışı incelenmiş ve çeşitli çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Özellikle ikincil kozmik parçacık olan nötronun akısının, yüksek enerjilerde oldukça düşük olduğu gözlenmektedir. Buradan yüksek enerjili ikincil parçacıkların yeryüzüne nadiren ulaşabildiği sonucu çıkarılabilir.

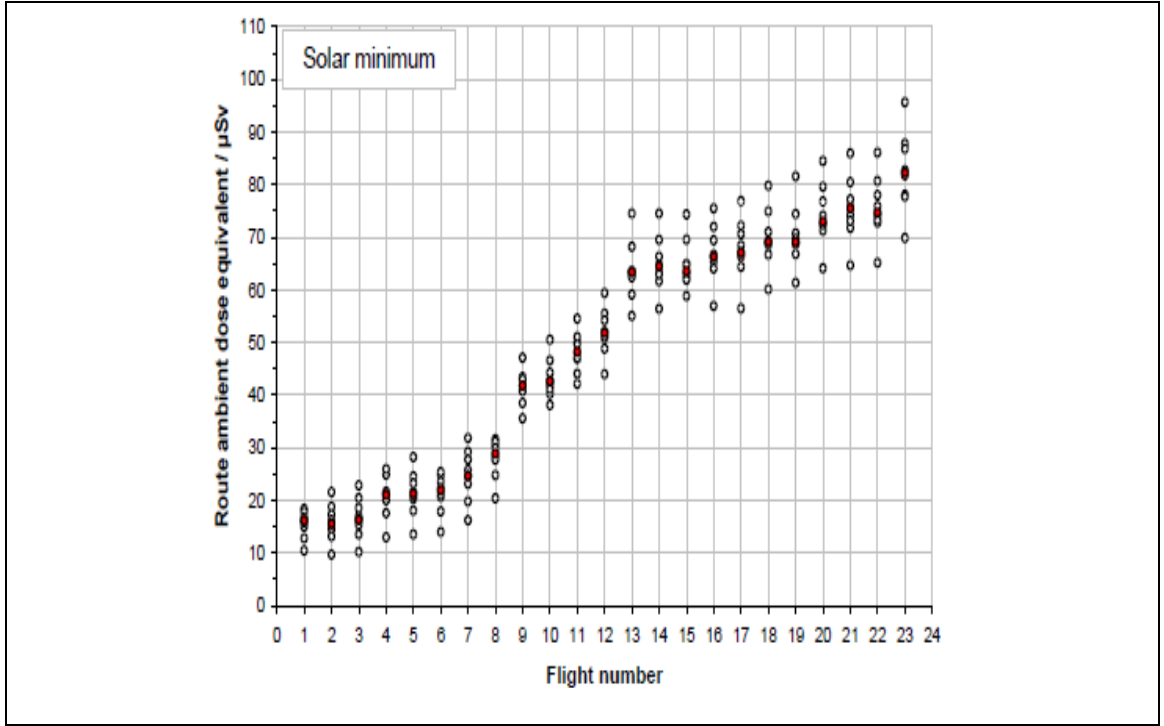


Şekil 4.1 Nötron akısının enerjiye göre değişimi, Burada kırmızı ve turuncu ile gösterilen değerler yazarların elde ettiği değerlerdir (Kowatari vd. 2005)

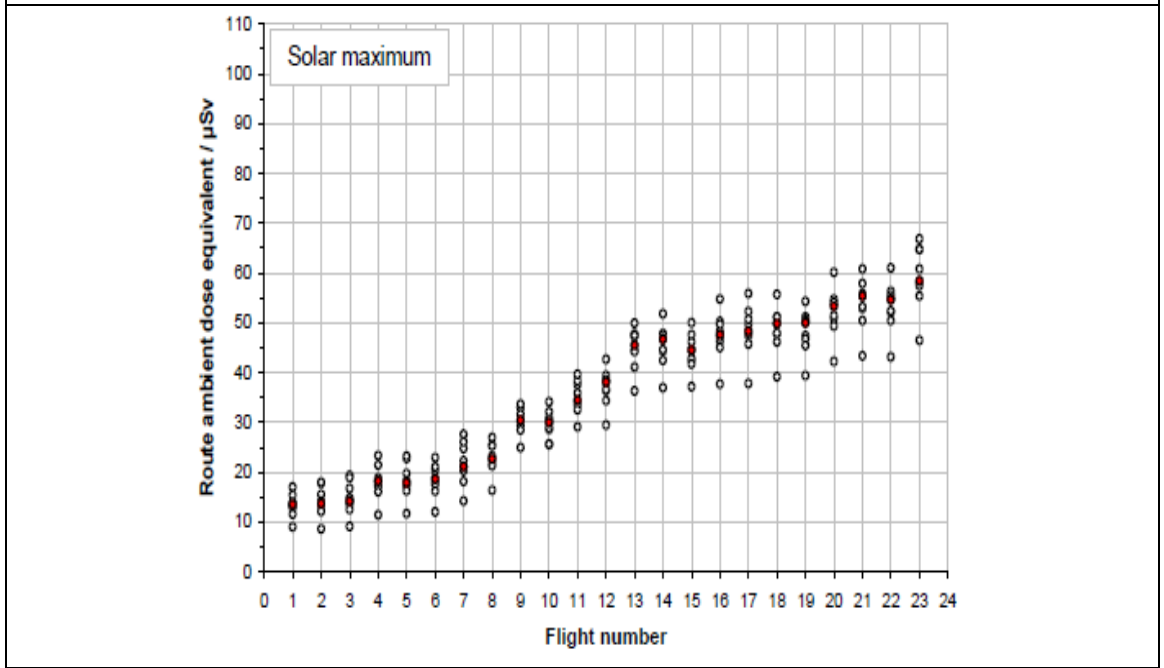


Şekil 4.2 Nötron akı oranının enerjiye göre değişimi (Kowatari vd. 2005)

European Commission tarafından yayınlanan Radiation Protection No 173 adlı raporda galaktik kozmik ışınlardan kaynaklanan radyasyondan dolayı, uçuş mürettebatının aldığı dozun hesaplanmasında kullanılan kodların bir karşılaştırılması yapılmıştır. Çeşitli kodlar kullanılarak 23 ayrı uçuş rotası için (uçuş süreleri de farklı olacak şekilde) solar maksimum (09/2007) ve solar minimum (08/2000) durumları ayrı ayrı göz önüne alınarak efektif doz ve ortam doz eşdeğerleri hesaplanmıştır (Bottollier vd. 2012). Uçuş rotalarına bakıldığında uçuş süresi arttıkça doz değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir.



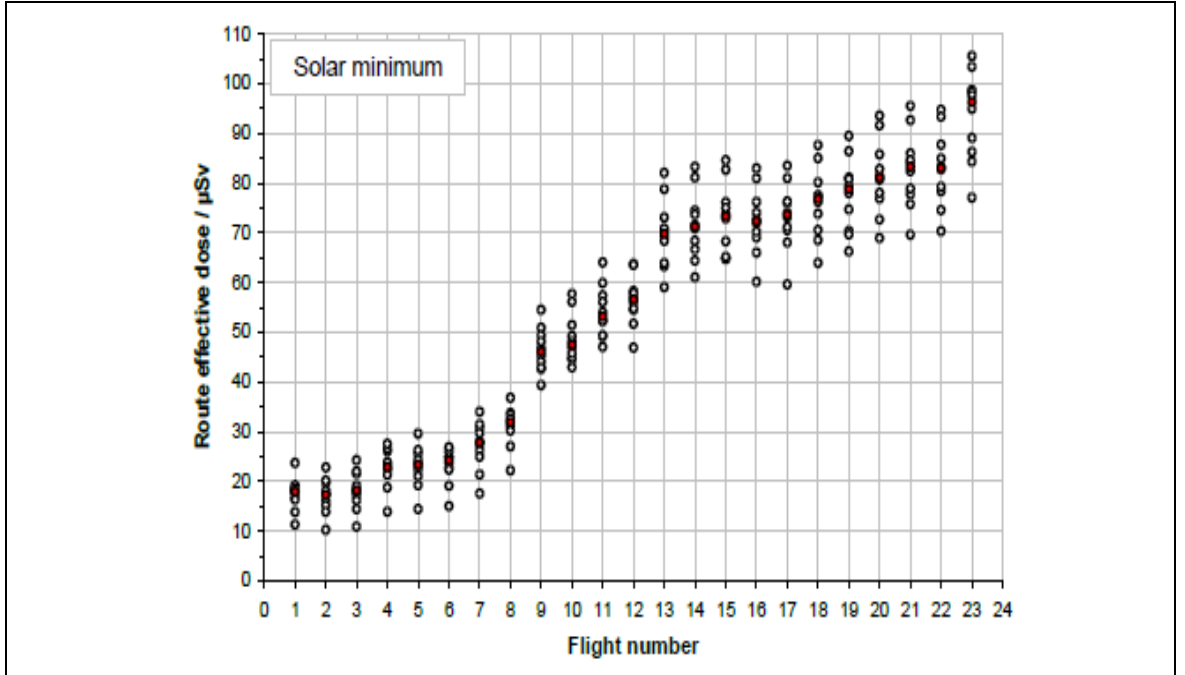
(a)



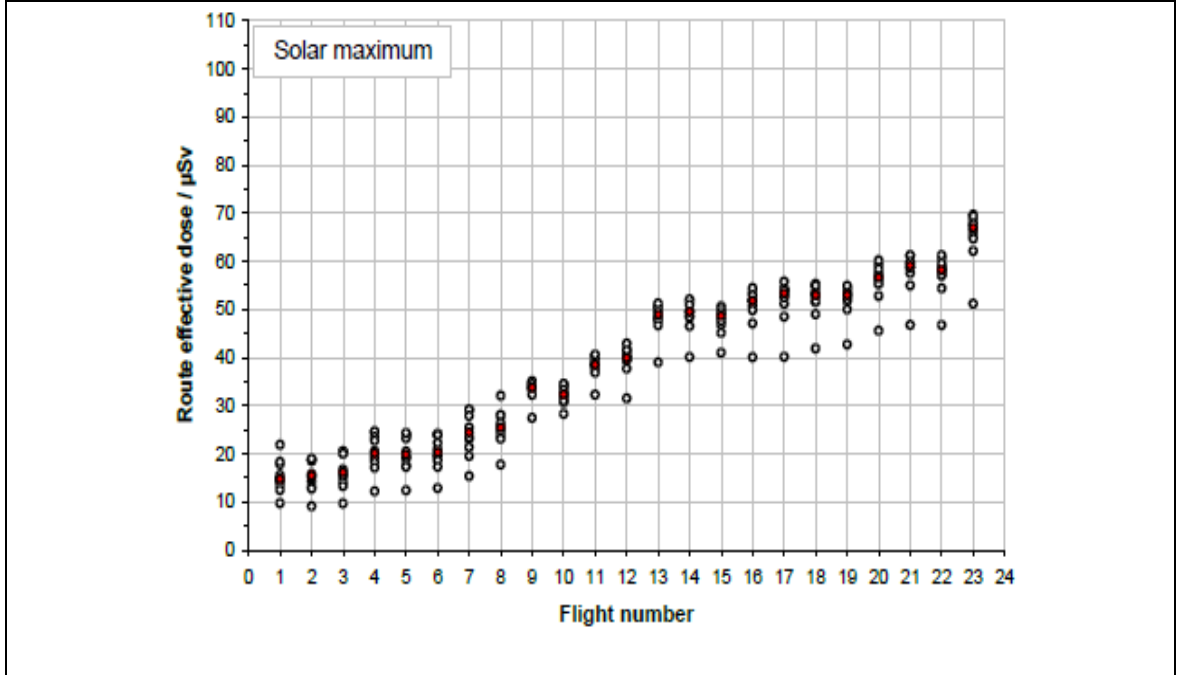
(b)

Şekil 4.3 Ortam doz eşdeğerinin uçuş sayısına göre değişimi (Bottollier vd. 2012)

- Solar minimum durumunda maruz kalınan ortam doz eşdeğerinin orta ve uzun uçuş süreli uçuş sayılarına göre değişimi
- Solar maksimum durumunda maruz kalınan ortam doz eşdeğerinin uçuş sayısına göre değişimi



(a)

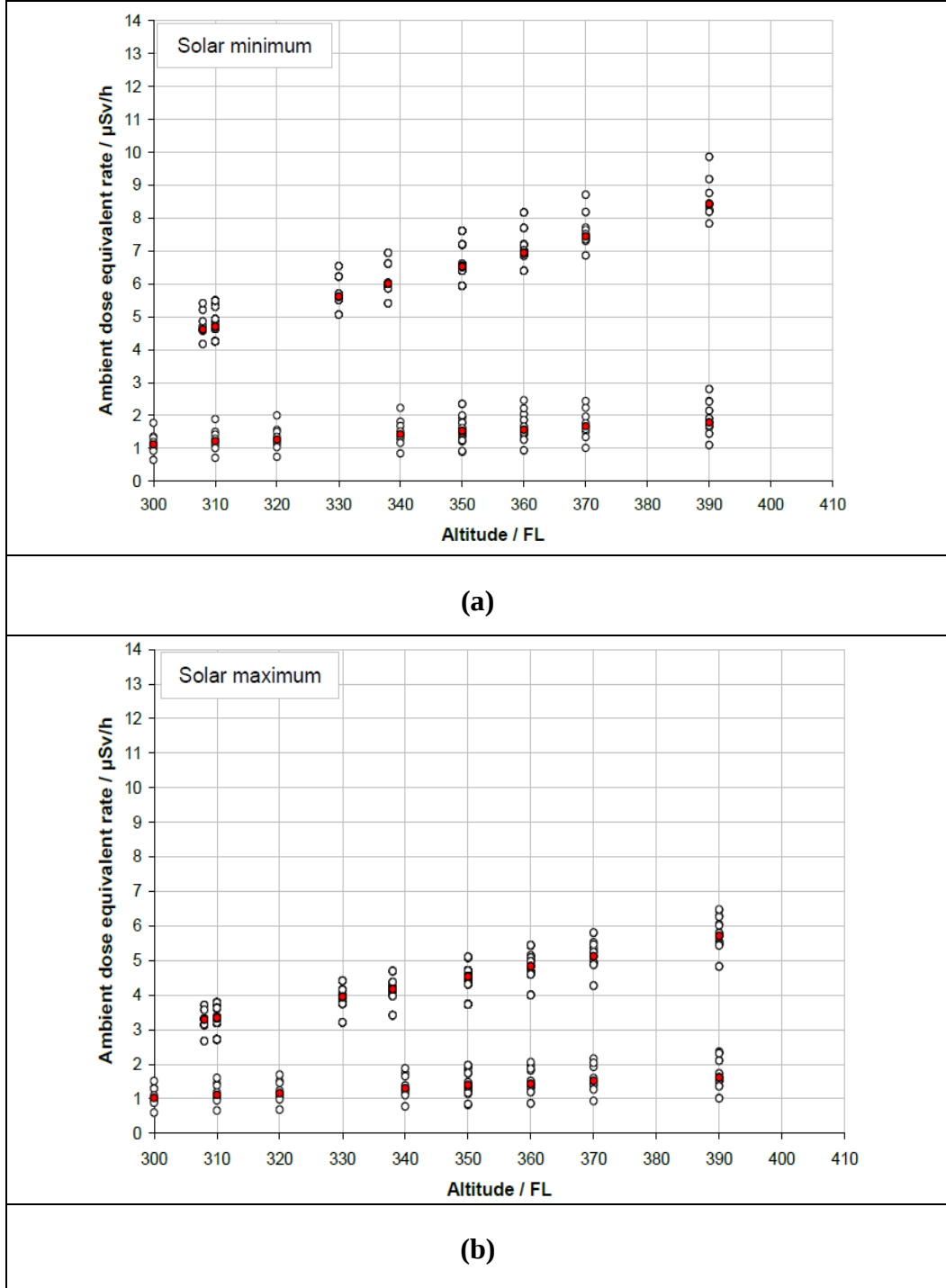


(b)

Şekil 4.4 Efektif dozun uçuş sayısına göre değişimi (Bottollier vd. 2012)

- a. Solar minimum durumunda efektif dozun uçuş sayısına göre değişimi
- b. Solar maksimum durumunda efektif dozun uçuş sayısına göre değişimi

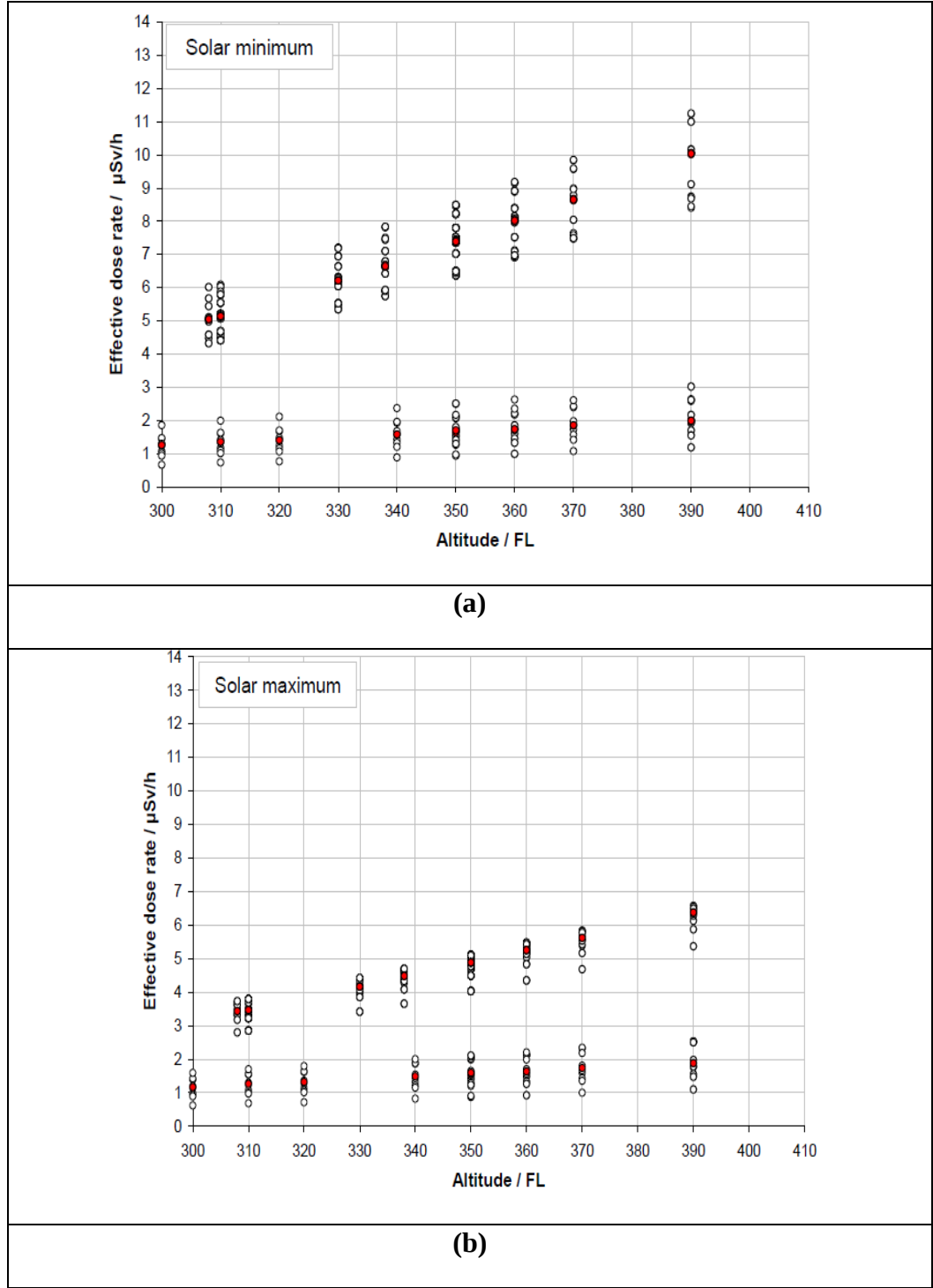
Bu çalışmada ayrıca efektif doz ve ortam doz eşdeğerinin yüksekliğe bağlı grafikleri, solar minimum ve solar maksimum durumları için ayrı ayrı elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Ortam doz eşdeğerinin yüksekliğe bağlı değişimi (Bottollier vd. 2012)

a. Solar minimum için ortam doz eşdeğerinin yüksekliğe bağlı grafiği

b. Solar maksimum için ortam doz eşdeğerinin yüksekliğe bağlı grafiği



Şekil 4.6 Efektif dozun yüksekliğe bağlı değişimi (Bottollier vd. 2012)

a. Solar minimum için efektif dozun yüksekliğe bağlı grafiği

b. Solar maksimum için efektif dozun yüksekliğe bağlı grafiği

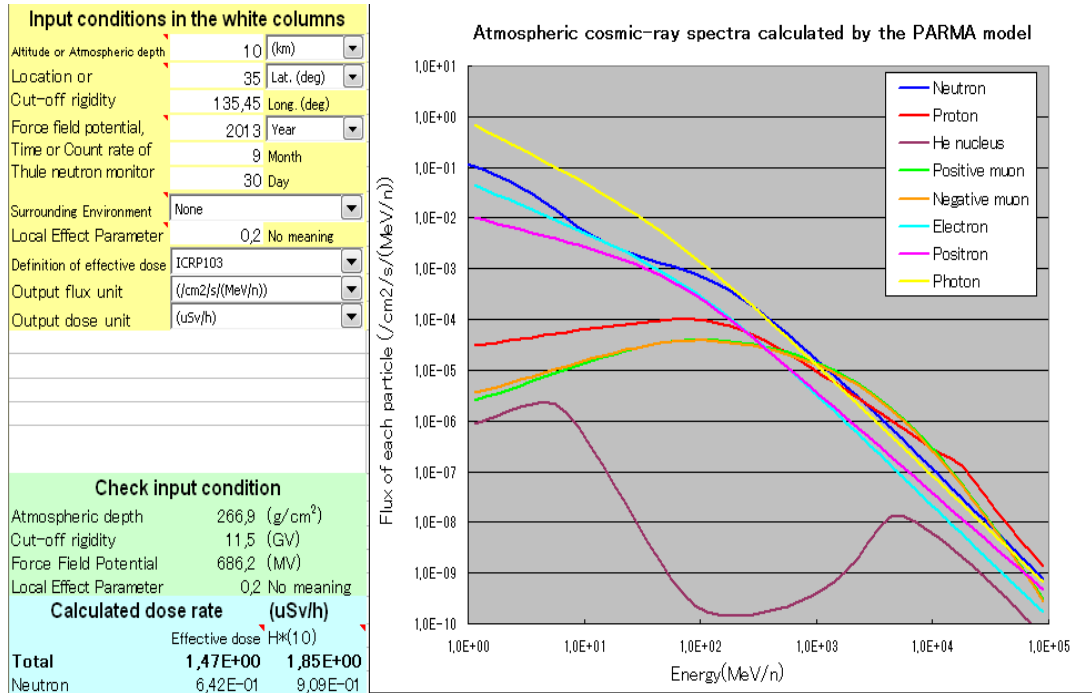
4.2 Hesaplamalar ve Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada CARI programı ile 2013 yılına ait veriler kullanılarak, kozmik ışın kaynaklı nötron enerjileri göz önüne alınarak

- Ankara için nötron enerjisinin akıya göre değişimi
- Ankara için farklı yüksekliklerde efektif doz hesabı
- Solar aktivite ve efektif doz arasındaki ilişkinin incelenmesi

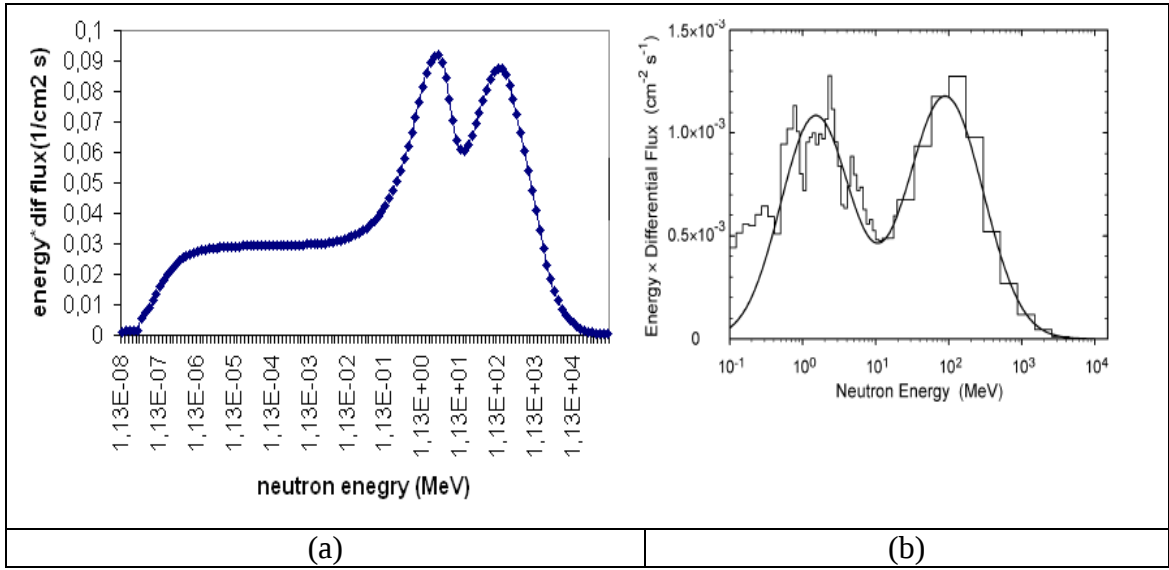
hesaplanmıştır.

Nötron akısının enerjiye bağlı değişimini elde etmek için EXPACS programı kullanılır. EXPACS (Excel Based Program for Calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum) nötron spektrumunun atmosferik derinliğe ve enerjiye bağlı olarak analitik fonksiyonunun belirlenmesi için Japonya Atom Enerji Ajansı'nda Tatsuhiko Sato tarafından PHITS kodu kullanılarak geliştirilmiş bir programdır. Bu programda kullanılan veriler Thule-Greenland'da bulunan nötron monitörü ile alınmıştır. Programa enlem, boylam ve ölçüm alınması istenilen zaman dilimi veri olarak girilebilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 EXPACS programının çalışma ara yüzü

Ankara için enlem ve boylam veri olarak girilerek 2013 Ekim ayında 10000m’de nötron enerjisinin akıya göre davranışı incelenmiştir. (Şekil 4.8). Elde edilen grafiğin davranışı literatürle uyum içerisindedir. Bu grafik yardımıyla olası nükleer reaksiyonlar, enerjilerine bağlı olarak tanımlanabilir (Şekil 4.8.a,b). 1 MeV civarında *evaporation* (buharlaşıma) piki ve daha yüksek enerjilerde 100 MeV civarında nükleer *spallation* reaksiyon bölgesi mevcuttur (Gordon vd. 2004). 10^{-7} MeV civarında ise termal nötronlar için bir pik gözlenmiştir.



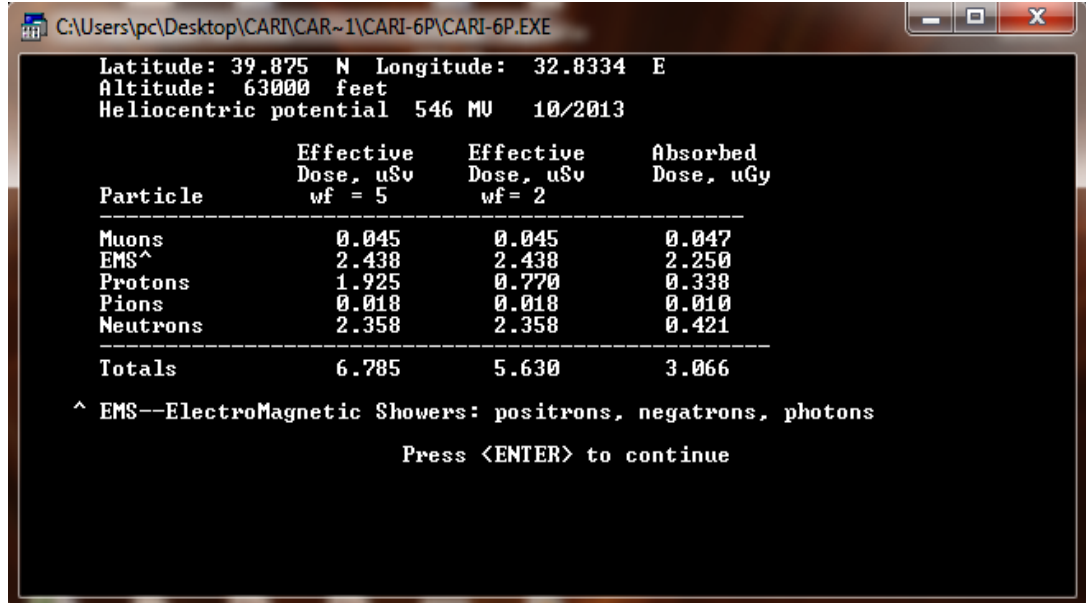
Şekil 4.8 Nötron akı oranının enerjiye göre değişimi

- a. Bu çalışmada EXPACS programı kullanılarak elde edilen akı değerleri.
b. “Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground”
(Gordon vd. 2004) başlıklı çalışmada elde edilen sonuçlar.

İkinci bir çalışma olarak, CARI-6 ve CARI-6P kodları kullanılarak Ankara için enlem, boylam ve yükseklik bilgileri veri olarak girilerek, 1000 feet–60000 feet yükseklikleri arasında 1000 feet aralıklarla nötron efektif doz oranları hesaplanmış, yüksekliğe bağlı olarak nötron efektif doz grafiği elde edilmiştir.

CARI-6P’de hesaplama yaparken ICRP 60 (1991)’da verilen ağırlık faktörleri kullanılmıştır. Ekim 2013 için *heliocentric* potansiyel, kodun veritabanında bulunmadığından gerekli potansiyel değeri FAA’nın web sitesinden bulunarak veritabanına eklenmiştir

(http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/heliocentric, 2014).



The screenshot shows the output of the CARI-6P program. The window title is 'C:\Users\pc\Desktop\CARI\CAR~1\CARI-6P\CARI-6P.EXE'. The output text is as follows:

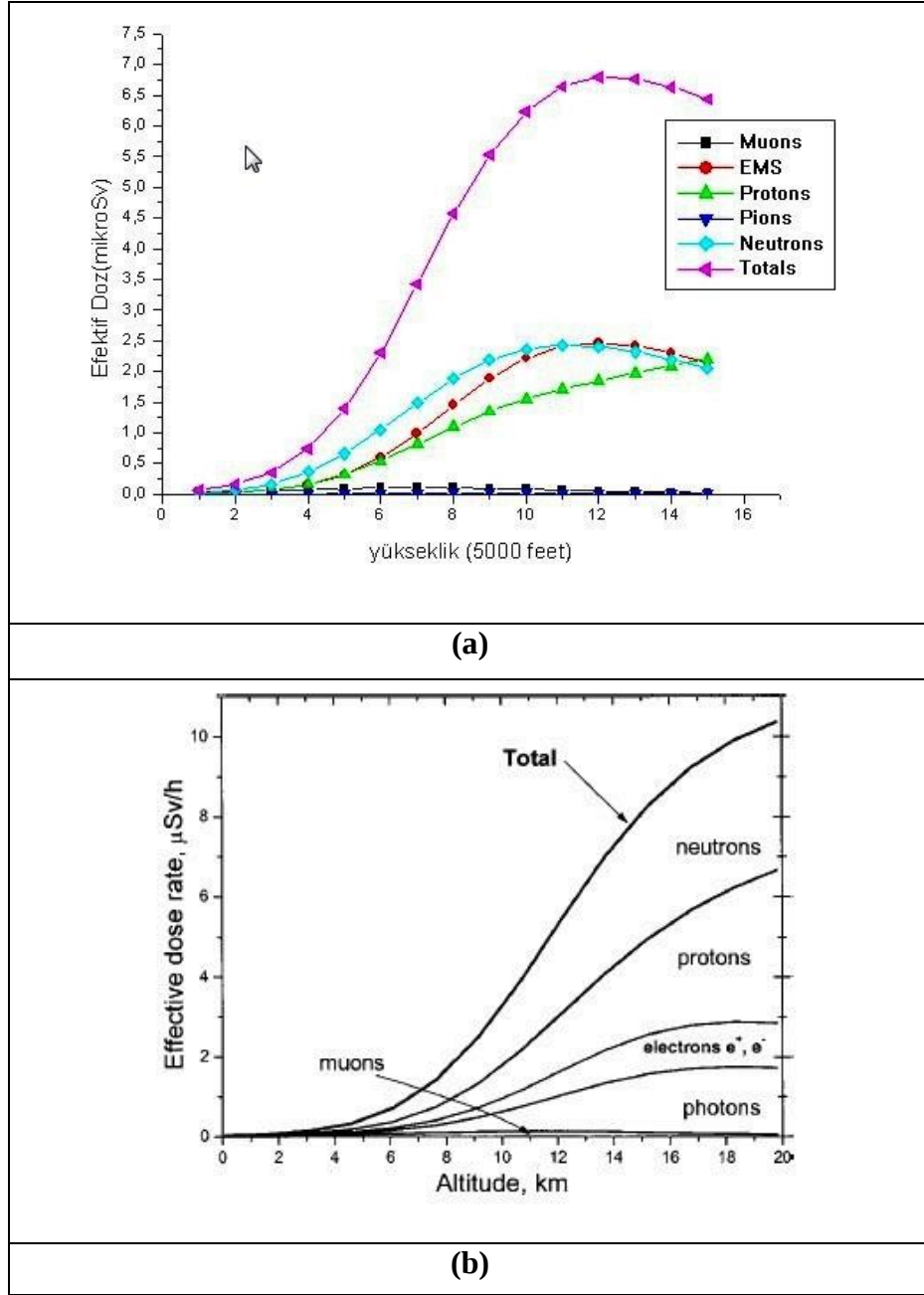
```
Latitude: 39.875 N Longitude: 32.8334 E
Altitude: 63000 feet
Heliocentric potential 546 MU 10/2013
```

Particle	Effective Dose, uSv wf = 5	Effective Dose, uSv wf = 2	Absorbed Dose, uGy
Muons	0.045	0.045	0.047
EMS^	2.438	2.438	2.250
Protons	1.925	0.770	0.338
Pions	0.018	0.018	0.010
Neutrons	2.358	2.358	0.421
Totals	6.785	5.630	3.066

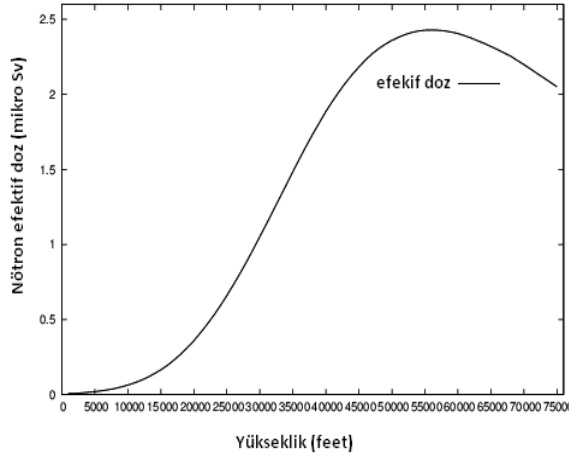
^ EMS—ElectroMagnetic Showers: positrons, negatrons, photons
Press <ENTER> to continue

Şekil 4.9 CARI-6P programının çıktısı Ankara için CARI-6P programı kullanılarak hesaplanan farklı parçacıklar için efektif dozlar

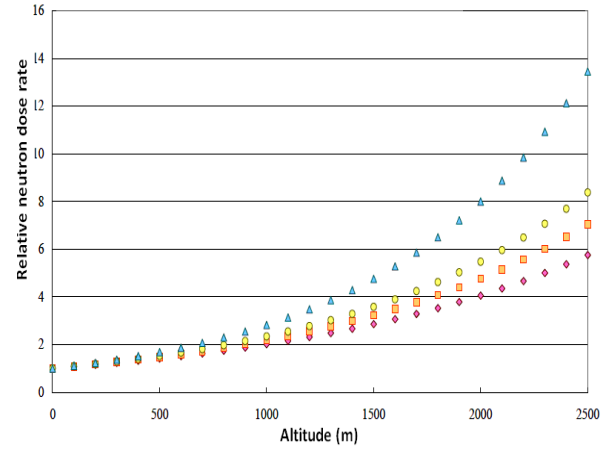
Ankara için yapılan hesaplamalarda, her bir kozmik parçacık türünün yüksekliğe göre toplam efektif doza katkısı Şekil 4.10'de görülmektedir. Nötron için efektif dozun yüksekliğe bağlı davranışı, Kowatari vd. (2005) tarafından yapılan çalışmanın sonucu ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.11.a,b). Grafikte yükseklik arttıkça, efektif dozun azaldığı görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, yükseklik arttıkça ikincil kozmik parçacık olan nötron yoğunluğunda bir azalma görülür. Nötronlar, birincil ve ikincil kozmik ışınların havadaki oksijen ve nitrojen atomlarıyla çarpışması sonucunda üretilir. Yapılan tüm bu hesaplamalarda sonuçların literatürle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10 Efektif dozun yüksekliğe göre değişiminin literatür ile karşılaştırılması
a. CARI-6P ile hesaplanan efektif dozun yüksekliğe göre değişimi Ankara için,
b. Warszawa-Okęcie havaalanında CARI ile hesaplanan efektif dozun yüksekliğe göre değişimi (Bilski vd. 2004)



(a)



(b)

Şekil 4.11 Nötron efektif dozun literatür ile karşılaştırılması

- a. CARI-6P ile hesaplanan nötron efektif dozun yüksekliğe göre değişimi,
b. Nötron dozunun yüksekliğe göre değişimi (Kowatari vd 2005)

4.3 Örnekleme: Bir Pilotun Aylık Uçuş Planına Göre Doz Hesabı

Bu çalışmada uçuş mürettebatının maruz kaldığı nötron radyasyon dozunun belirlenmesine yönelik olarak, bir pilotun aylık uçuş planına göre CARI-6P kodu ile doz hesabının yapılması da düşünülmüştür. Ancak pilot uçuş planlarının elde edilmesinde zorluklarla karşılaşmış ve bu verilerin akademik bir çalışmada kullanılacağına belirtilmesine rağmen, yetkili kurumlar bilgi paylaşımında bulunmak istememişlerdir. Bu nedenle gerçek bir uçuş planı yerine, pilot için bir aylık rasgele bir uçuş modeli oluşturularak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Uçuş rotaları rasgele seçilse bile, bu rotalarla ilgili gerçek veriler kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 Örnek CARI-6P çıktısı, IST-DLM uçuşu (“prwf” prorton için ağırlık fonksiyonunu,, uGy ise μ Gy birimini göstermektedir

ISTANBUL, TURKEY (LTBA)
TO
DALAMAN TURKEY (LTBS)
Date of flight 2013/10
Heliocentric potential 546 MV

Particle	Effective Dose, uSv		Absorbed Dose, uGy
	prwf = 5	prwf= 2	
Muons	0.14455	0.14455	0.14540
EMS	0.87700	0.87700	0.80931
Protons	0.76920	0.30768	0.13607
Pions	0.02172	0.02172	0.01255
Neutrons	1.45790	1.45790	0.24768
Totals	3.27038	2.80886	1.35101

DLM-IST
DALAMAN TURKEY (LTBS)
TO
ISTANBUL, TURKEY (LTBA)
Date of flight 2013/10
Heliocentric potential 546 MV

Particle	Effective Dose, uSv		Absorbed Dose, uGy
	prwf = 5	prwf= 2	
Muons	0.14510	0.14510	0.14608
EMS	0.96619	0.96619	0.89161
Protons	0.82680	0.33072	0.14671
Pions	0.02319	0.02319	0.01338
Neutrons	1.54420	1.54420	0.26345
Totals	3.50548	3.00940	1.46123

Çizelge 4.2 Ekim - Kasım 2013 aylarında bir pilotun yaptığı uçuşlara göre CARI-6P programında hesaplanan efektif doz miktarları

Uçağın Kalkış ve İniş Yerleri	Uçuş Günü	Tahmini Uçuş Süresi	Ortalama İrtifa (feet)	Nötrondan Kaynaklanan Kozmik Radyasyon Dozu (μSv)	Alınan Toplam Kozmik Radyasyon Dozu (μSv)
IST-TXL Istanbul, Turkey (LTBA) Berlin, Germany (EDDT)	10/2013	3 SAAT	36000	6.18	13.47
TXL-IST Berlin, Germany (EDDT) Istanbul, Turkey (LTBA)	10/2013	3 SAAT	37000	6.20	13.61
IST-YNB Istanbul, Turkey (LTBA) Yenbo, Saudi Arabia (OEYN)	10/2013	3 SAAT	37000	4.36	10.76
YNB-IST Yenbo, Saudi Arabia (OEYN) Istanbul, Turkey (LTBA)	10/2013	3 SAAT	36000	4.41	11.00

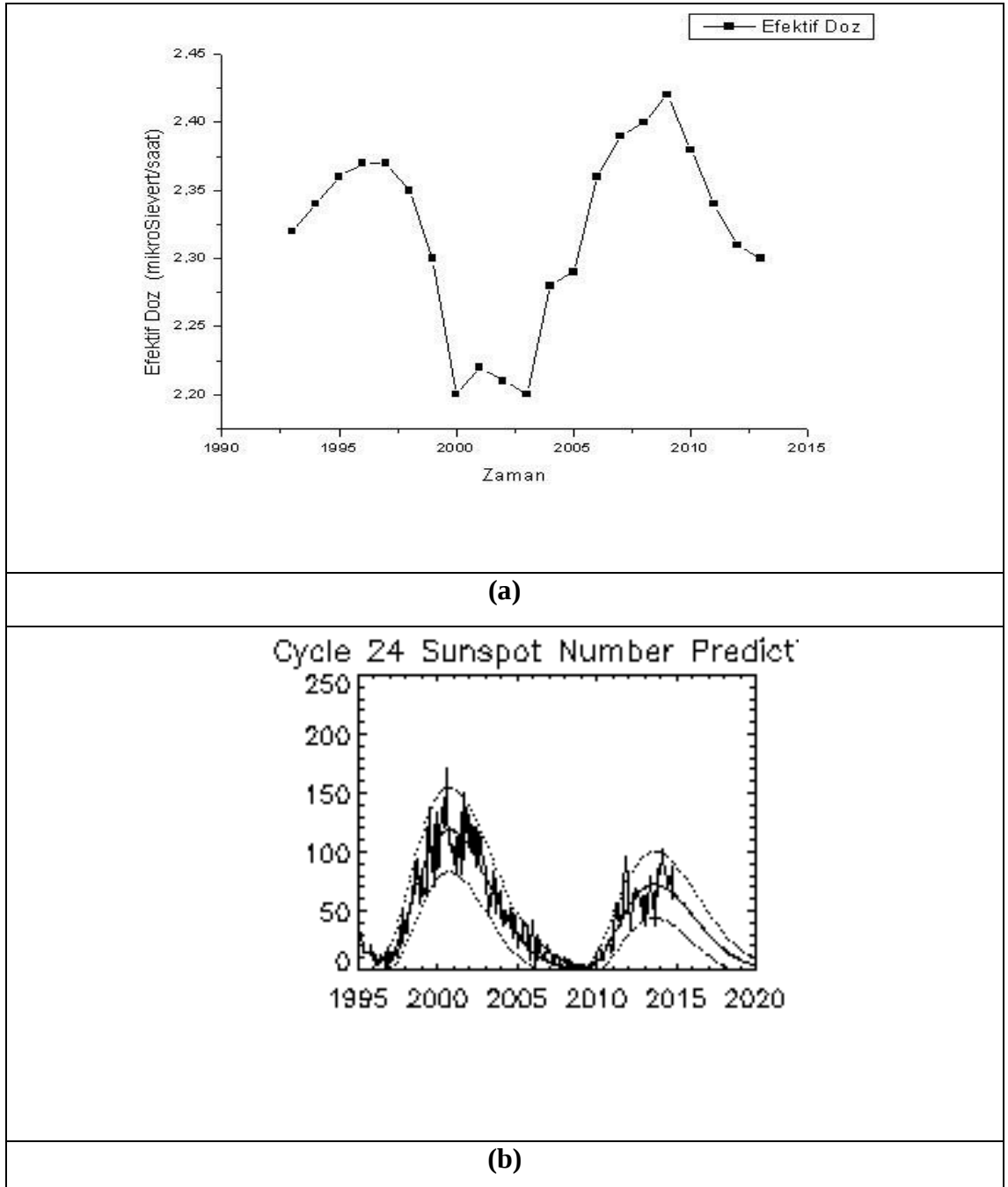
Belirtilen uçuş rotaları özellikle batı-doğu ve doğu-batı doğrultularında seçilmiştir (Çizelge 4.2). Kozmik ışın yoğunluğunun değişen enlemlere bağlı olarak farklılık göstermesi göz önünde bulundurularak bir uçuş profili oluşturulmuştur. Pilotun aylık 82 saat uçuş yaptığı göz önüne alınarak maruz kaldığı efektif doz miktarları her bir uçuş için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 4.2’de uçuş profilinden birkaç örnek verilmiştir.

4.4 Solar Aktivite ve Kozmik Işınlardan Kaynaklı Radyasyon Arasındaki İlişki

Amerikalı fizikçi Scott E. Forbush 1930 ve 1940'lı yıllarda kozmik ışınlar üzerine yürüttüğü çalışmalar sırasında solar aktivitenin yüksek olduğu zamanlarda ikincil kozmik ışınlardan kaynaklı radyasyon dozunda bir azalma gözlemlemiştir.

Solar aktivitenin yüksek olduğu dönemlerde güneşte meydana gelen patlamalar sonucunda, güneşten püsküren ağır iyonlardan oluşan bir gaz bulutu meydana gelir. CME (coronal mass ejection) adı verilen bu gaz bulutu kuvvetli bir manyetik alanda oluşturur. Bu manyetik alandaki artış, kozmik parçacıkların atmosfere girmeden sapmasına sebep olmaktadır. CME sayesinde elektrik yüklü parçacıklar atmosfere girmeden galaksimizden uzaklara süpürülmektedir. Bu nedenle yeryüzüne ulaşan kozmik radyasyondan kaynaklı efektif doz miktarında da bir azalma meydana gelmektedir. Bu etkiye “Forbush decrease” etkisi denir (http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/07oct_afraid, 2014). Forbush etkisi uzay istasyonlarında uzun zaman geçiren astronotlar için hayati bir öneme sahiptir.

Solar aktivitede meydana gelen değişim, yeryüzüne ulaşan kozmik ışınların yoğunluğunda değişime sebep olmaktadır. On bir yılda bir gerçekleşen solar aktivitedeki azalma ya da artma, *heliocentric* potansiyelde de paralel bir değişime sebep olmaktadır. Yıllara göre *heliocentric* potansiyel değerleri göz önüne alınarak CARI-6P ile yaptığımız hesaplamalar sonucunda solar aktivitedeki değişim ile yeryüzüne ulaşan kozmik radyasyondan kaynaklı efektif doz arasında ters bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.12.a,b). Solar aktivitenin maksimum olduğu dönemlerde efektif doz azalmış, minimum olduğu dönemlerde artmıştır.



Şekil 4.12 Efektif dozun yıllara göre değişiminin solar döngü ile karşılaştırılması
a. Yıllara göre solar aktivite de meydana gelen değişim gözetilerek efektif dozun zamanla değişimi, Ankara için,
b. On bir yılda bir meydana gelen solar döngünün ileri yıllarda ki tahmini
(<http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>, 2014)

5. SONUÇ

Atmosfere giren birincil kozmik ışınların gaz molekülleriyle yaptığı ardışık etkileşmeler sonucunda ikincil parçacıklar olarak da adlandırılan, nötron, proton, foton, elektron, pozitron, pionlar ve mesonlar gibi çeşitli reaksiyon ürünleri açığa çıkar. Atmosfer bu ikincil kozmik radyasyona karşı bir kalkan görevi görür, bu parçacıkların pek çoğunu yavaşlatır veya durdurur. Atmosferde üst kısımlara doğru gidildikçe kozmik ışınların şiddeti artmaktadır. Bu durumda özellikle yüksek irtifada seyreden uçak yolculuklarında yolcuların maruz kaldığı kozmik ışınlar tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir.

Yüksek irtifalı uçuşlarda maruz kalınan kozmik ışının %60'ını ikincil nötronlar oluşturmaktadır. CARI-6 ve CARI-6P kodu ile hesaplanan efektif doz değerleri *heliocentric* potansiyel de göz önünde bulundurularak yüksekliğe bağlı olarak hesaplanmıştır. Nötron enerjisinin akıya göre grafiğini çizmek için EXPACS programı kullanılmıştır. EXPACS kodu sayesinde akı, enlem ve boylam değerleri de girilerek, kozmik parçacıkların manyetosferden geçerken oluşan yönelimini belirleyen, bir eşik değer ölçüsü olan *cut off rigidity* de göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır, literatürdeki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir.

CARI-6 ve CARI-6P kodu ile Ankara üzerinde 1000–75000 feet yükseklikleri arasında efektif doz hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar sırasında galaktik radyasyon seviyelerindeki değişimi açıklamak için, veri alınması istenilen zaman diliminde kullanılması gereken *heliocentric* potansiyel, kodun içerisinde tanımlanmıştır.

Ankara için efektif dozdaki değişim, 23. periyot ve 24. periyodu kapsayan 1993–2014 yılları arasında CARI-6P programı ile incelenmiştir. *Heliocentric* potansiyel, solar aktivite ile paralel bir değişim gösterdiğinden programı yıllara göre çalıştırmak, sonucu görmek açısından yeterli olmuştur. Efektif doz 30000 feette hesaplanmıştır. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi kozmik radyasyondan kaynaklı efektif dozun solar döngü ile ters orantılı olduğunu gözlenmiştir.

Bir pilotun aylık uçuş planı çerçevesinde, CARI-6P kodu ile ilgili uçuş rotaları ve süreleri girilerek, uçuş mürettebatının bir uçak yolculuğu sırasında aldığı toplam efektif doz ve nötron efektif doz hesaplanmıştır. Batı-Doğu ve Doğu-Batı doğrultularında maruz kalınan efektif doz oranları farklılık gösterse de yıllık ortalama 1000 saat uçuş yapan bir pilotun, yıllık yaklaşık 4.08 milisievert kozmik radyasyona maruz kaldığı hesaplanmıştır.

Türkiye Sivil Havacılık Genel Müdürlüğünün, uçakla ticari hava taşıma işletmeciliği operasyon usul ve esasları talimatları gereğince, bir yıl içerisinde alınabilecek maksimum kozmik radyasyon dozunun 6 mSv'i aşamayacağı belirtilmiştir. Ayrıca bu talimatlar gereğince yılda 1 mSv'in üzerinde kozmik radyasyona maruz kalan uçuş personelinin maruz kaldığı düzeyin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılması ve personelin karşılaşabileceği sağlık riskleri ile ilgili olarak bilgilendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Uçuş planını kullandığımız pilotun maruz kaldığı kozmik radyasyon, istenilen sınırlar içerisindedir.

KAYNAKLAR

- Arslan, H. 2011. Dünya'nın Elektrik ve Manyetik Alanının Deniz Seviyesindeki Kozmik Müon Akısı Üzerine Etkisinin Geant4 ile İncelenmesi, Yüksek lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Anonymous. 1991. Web Sitesi : [http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP Publication 60](http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060), Erişim tarihi:20.07.2014
- Anonymous. 2001. Web Sitesi : <http://history.nasa.gov/SP-4211/ch11-2.htm>, Erişim tarihi: 10.04.2014
- Anonymous. 2004. Web Sitesi : <http://geomagsphere.mib.infn.it/geomag/>, Erişim tarihi: 13.04.2014
- Anonymous. 2005. Web Sitesi : http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/07oct_afraid, Erişim tarihi: 17.12.2014
- Anonymous. 2006. Web Sitesi : <http://www.p-ng.si/public/pao/history.php>, Erişim Tarihi: 17.05.2014.
- Anonymous. 2006. Web Sitesi : <http://cosray.unibe.ch>, Erişim tarihi:12.06.2014
- Anonymous. 2007. Web Sitesi : [http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP Publication 103](http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103), Erişim tarihi:21.07.2014
- Anonymous. 2009. Web Sitesi : <http://www.nmdb.eu/?q=node/172>, Erişim Tarihi: 16.05.2014
- Anonymous. 2009. Web Sitesi : <http://www.nmdb.eu/?q=node/134>, Erişim Tarihi: 16.05.2014
- Anonymous. 2011. Web Sitesi : http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/voyager-heliosheath-labeled.html, Erişim tarihi: 09.10.2014
- Anonymous. 2013. Web Sitesi : <http://sievert-system.org>, Erişim tarihi: 09.03.2014
- Anonymous. 2013. Web Sitesi : <http://www.bilim.org/dunyanin-manyetik-alani>, Erişim tarihi: 05.07.2014
- Anonymous. 2014. Web Sitesi: <http://inf.infn.it>, Erişim tarihi: 17.05.2014
- Anonymous. 2014. Web Sitesi :<http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Cosmic+Ray+Energies>, Erişim Tarihi: 20.05.2014.
- Anonymous. 2014. Web Sitesi: <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>, Erişim tarihi:12.07.2014
- Anonymous. 2014. WebSitesi : http://www.ph.surrey.ac.uk/satellites/main/tutorial2_1.html, Erişim Tarihi: 12.08.2014

- Anonymous. 2014. Web Sitesi : http://pdg.lbl.gov/2014/tables/contents_tables_mesons.html, Erişim tarihi: 15.09.2014.
- Anonymous. 2014. Web Sitesi : http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/, Erişim tarihi: 09.10.2014
- Anonymous. 2014. Web Sitesi : <http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>, Erişim tarihi: 29.10.2014
- Anonymous. 2014. Web Sitesi : <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>, Erişim tarihi: 17.12.2014
- Anonymous. 2014. Web Sitesi: <http://www.faa.gov//data/research/research/medhumanfacs/aeromedical/radiobiology/heliocentric/>, Erişim tarihi: 23.12.2014
- Beatty, J.J., J. Matthews 2011. <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-cosmic-rays.pdf> Erişim tarihi: 19.09.2014
- Bilski, P., Paweł Olko, Tomasz Horwacik. 2004. Air-crew exposure to cosmic radiation on board of Polish passenger aircraft. NUKLEONIKA 2004;49(2):77–83
- Bottollier-Depois, J.F., P. Beck, M. Latocha, V. Mares, D. Matthiä, W. Rühm, F. Wissmann. 2012. European Commission Radiation Protection N° 173 Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic Cosmic Radiation
- Desorgher, L. 2005. PLANETOCOSMICS Software User Manual <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics> Erişim tarihi: 20.10.2014.
- Ferrari, A., Sala, P.R. Fasso, A., and Ranft, J. 2005. FLUKA: A Multi Particle Transport Code. 386. Geneva, Switzerland, CERN, INFN, SLAC
- Gordon, M.S., Watson, T. J., Goldhagen, P., Rodbell, K.P., Zabel, T.H. 2004. Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground Nuclear Science, IEEE Transactions on Volume:51 , Issue: 6
- Holy F. 2007. Cosmic Rays Diagnostics at the Highest Energies http://www.mpa-garching.mpg.de/lectures/ADSEM/WS0708_Holy.pdf Erişim tarihi: 22.03.2014
- Konrad, Bernlöh, 2014, Web Sitesi : <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/Showers.html> Erişim tarihi: 12.10.2014
- Kowatari, M., Nagaoka, K., Satoh, S., Ohta, Y., Abukawa, J. 2005. Altitude Variation of cosmic-ray neutron energy spectrum and ambient dose equivalent at Mt. Fuji in Japan, J .Nucl. Sci. Technol., 495–502

- Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G., Rühm, W., 2009. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD, *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 136, No. 4, pp. 262-266.
- O'Brien, K., Smart, D.F., Shea, M.A., Felsberger, E., Schrewe, U., Friedberg, Copeland, K. 2003 World-wide radiation dosage calculations for air crew members. *Advan Space Res* 31(4): 835-840
- O'Brien, K., Felsberger, E., Kindl, P., 2005. Application of the heliocentric potential to aircraft dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry*; 116(1-4 Pt 2):336-42.
- O'Brien, K. 2006. Cosmic-ray propagation through the disturbed heliosphere, *Acta Astronautica* Volume 60, Issues 4–7, Pages 541–546
- O'Brien, K. 2010. The local all-particle cosmic-ray spectrum. *The Astrophysical Journal*. 716, 544-549
- O'Neill, P.M. 2006. "Badhwar–O'Neill galactic cosmic ray model update based on advanced composition explorer (ACE) energy spectra from 1997 to present," *Adv. SpaceRes*, 37, p. 1727.
- Pelliccioni, M. 2000. Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using FLUKA code. *Radiat. Prot. Dosim.* 88(4), 279–297
- Ridgen, J. S. 2003. *Building Blocks Of Matter*, Macmillan Reference USA, 143-145, USA
- Roesler, S., Heinrich, W. and Schraube, H. 2002. Monte Carlo calculation of the radiation field at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* 98(4), 367-388
- Schlaepfer, H. 2003. *Cosmic Rays*, Spatium ISSI, 1, 11,
- Schraube, H., Leuthold, G., Heinrich, W., Roesler, S., Mares, V. and Schraube, G. 2002. EPCARD – European program package for the calculation of aviation route doses, User's manual. GSF-National Research Center, Neuherberg, Germany ISSN 0721 - 1694. GSF-Report 08/02.
- Stenkin, V. 2005 129th International Cosmic Ray Conference Pune 1-4 Power Law Spectra in the Nature: Analogies with the Cosmic Ray Spectrum Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences 60th October Anniv. prospect 7a, 117312 Moscow, RUSSIA
- Watanabe, Y., Fukahori, T., Kosako, K., Shigyo, N., Murata, T., Yamano, N., Hino, T., Maki, K., Nakashima, H., Odano, N., Chiba, S. 2005. Nuclear data evaluations for JENDL High-Energy File. In *Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*. pp.326-331, AIP CP769; Melville, NY; American Institute of Physics
- Wissmann, F. 2006. Long-term measurements of $H^*(10)$ at aviation altitudes in the northern hemisphere. *Radiat. Prot. Dosim.* 121(4), 347-357

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan ERGİ
Doğum Yeri : Ayvalık / BALIKESİR
Doğum Tarihi : 19 Eylül 1986
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ayvalık Lisesi (Süper Lise), 2000-2004.
Lisans : Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 2004-2010.
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı,
Eylül 2011 - Aralık 2014 .