



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ»**

MSc: “Environment and Health. Capacity Building for Decision Making”

Διευθυντής ΠΜΣ

Νικόλαος Καβαντζάς, Καθ. Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

«Δοσιμετρία κοσμικής ακτινοβολίας με χρήση υπολογιστικών μοντέλων»

“Cosmic radiation dosimetry with the use of calculation models”

Δημήτρης Αλεξανδρίδης

A.M. 20170662

Φυσικός

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη

Ομότιμη Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής, ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ»**

MSc: “Environment and Health. Capacity Building for Decision Making”

Διευθυντής ΠΜΣ

Νικόλαος Καβαντζάς, Καθ. Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

«Δοσιμετρία κοσμικής ακτινοβολίας με χρήση υπολογιστικών μοντέλων»

“Cosmic radiation dosimetry with the use of calculation models”

Δημήτρης Αλεξανδρίδης

20170662

Φυσικός

Τριμελής επιτροπή

Επιβλέπ. Καθηγ.: Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, Ομ. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Πρόεδρος καθηγητής ΜΔΕ: Νικόλαος Καβαντζάς, Καθ. Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

Μέλος καθηγητής ΜΔΕ: Κωνσταντίνος Γ. Χέλμης, Ομ. Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2020

Έχοντας πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικής ιδιοκτησίας, δηλώνω ότι είμαι αποκλειστικός/ή συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλώνω, επίσης, ότι αναλαμβάνω όλες τις συνέπειες, όπως αυτές νομίμως ορίζονται, στην περίπτωση που διαπιστωθεί διαχρονικά ότι η εργασία μου αυτή ή τμήμα αυτής αποτελεί προϊόν λογοκλοπής.

*Στην καθηγήτριά μου,
κα Ελένη Μαυρομιχαλάκη και
στην υποψήφια διδάκτορα Ιατρικής Φυσικής ΕΚΠΑ,
κα Αναστασία Τεζάρη,
Για την πολύτιμη βοήθειά τους,
Για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και
Για την άριστη συνεργασία που είχαμε*

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία, εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών “ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΥΓΕΙΑ. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ” της Ιατρικής Σχολής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, υπό την επίβλεψη της ομότιμης καθηγήτριας κ. Ελένης Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη, του ομότιμου καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Γ. Χέλμη καθώς και του καθηγητή της Ιατρικής Σχολής του ΕΚΠΑ και προέδρου κ. Νικόλαου Καβαντζά.

Στην εργασία αυτή, αναπτύσσονται οι έννοιες της Κοσμικής Ακτινοβολίας και του Διαστημικού Καιρού σε σχέση με τις παραγόμενες δόσεις ακτινοβολίας και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη. Αναφέρονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία κάνοντας ιδιαίτερη αναφορά στην επαγγελματική έκθεση, με κυριότερη αυτή των εργαζομένων στην αεροπλοΐα, και το θεσμικό πλαίσιο απ’ όπου προκύπτουν οι κανόνες ακτινοπροστασίας. Γίνεται χρήση των κυριότερων υπάρχοντων υπολογιστικών μοντέλων, καθώς και της εφαρμογής DYASTIMA και της επέκτασης του DYASTIMA-R που αναπτύχθηκε από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας (A.NE.MO.S) του Πανεπιστημίου Αθηνών και υποστηρίζεται από την ESA, μέσω του προγράμματος SSA Space Radiation Expert Service Centre.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την ομότιμη καθηγήτρια κα. Ελένη Μαυρομιχαλάκη, η οποία ήταν η κύρια επιβλέπουσα της εργασίας αυτής, που με εμπιστεύτηκε από την πρώτη στιγμή, δίνοντάς μου τις κατευθυντήριες γραμμές για την εκπόνηση αυτής της εργασίας καθώς για τις πολλές ώρες συζητήσεων και τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Καβαντζά και τον ομότιμο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γ. Χέλμη για την υποστήριξή τους.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών και συγκεκριμένα την Δρ. Μαρία Γεροντίδου, μέλος ΕΔΙΠ του ΕΚΠΑ, διδάκτωρ του ΜΔΕ, για την βοήθεια και την αμέριστη συμπαράσταση στο πρόσωπό μου.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Ιατρικής Φυσικής ΕΚΠΑ, κα Αναστασία Τεζάρη, για την άριστη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε,

την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας, για τις πολύ χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις της καθώς και για τον πολύτιμο ελεύθερο χρόνο της που μου διέθεσε.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Εισαγωγή.....	10
Abstract	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι	13
Κοσμική ακτινοβολία.....	13
1.1. Ορισμός.....	13
1.2. Προέλευση της Κοσμικής Ακτινοβολίας	13
1.2.1. Ηλιακή κοσμική ακτινοβολία	13
1.2.2. Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (Galactic cosmic rays).....	15
1.2.3. Εξωγαλαξιακές πηγές	16
1.2.3. Υπερσυμμετρικά σωματίδια	17
1.2.4. Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες	18
1.3. Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία	18
1.3.1. Σύσταση	18
1.4. Δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία	20
1.4.1. Μαλακή και σκληρή συνιστώσα	20
1.5. Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας	23
1.6. Διαμόρφωση Κοσμικής Ακτινοβολίας.....	30
1.6.1. 11-ετής ηλιακός κύκλος.....	32
1.6.2. 22-ετής Ηλιακός Κύκλος	32
1.6.3. Μείωση Forbush	34
1.6.4. 27ήμερη Μεταβολή	35
1.6.5. Ημερήσια Ανισοτροπία.....	37
1.6.6. Επίγεια Επαύξηση της Κοσμικής Ακτινοβολίας	38
1.7. Μαγνητική Δυσκαμψία	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ	43
Τρόποι ανίχνευσης της κοσμικής ακτινοβολίας-Μετρητές νετρονίων	43
2.1. Εισαγωγή.....	43
2.2. Μετρητής νετρονίων	44
2.2.1. Αναλογικός μετρητής αερίου.....	45
2.2.2. Επιβραδυντής.....	45
2.2.3. Παραγωγός σωματίων (Μόλυβδος).....	45
2.2.4. Ανακλαστήρας	46
2.3. Ο σταθμός του Πανεπιστημίου Αθηνών και πρόγνωση του Διαστημικού καιρού.....	47

2.4. Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων: έρευνα και εφαρμογές	48
2.5. Δίκτυα μετρητών νετρονίων και συναγερμοί διαστημικού καιρού	50
2.6. Η επίδραση της κοσμική ακτινοβολία στη ζωή μας	51
2.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ III.....	55
Ακτινοβολία και επιπτώσεις στην υγεία	55
3.1. Ορισμός.....	55
3.2. Μεγέθη υπολογισμού δόσεων.....	59
3.2.1. Δόση.....	59
3.2.2. Απορροφούμενη δόση	59
3.2.3. Ισοδύναμη Δόση (Equivalent Dose).....	60
3.2.4. Ενεργός δόση	61
3.3. Δοσιμετρία – Dosimetry.....	64
3.4. Βιολογικά αποτελέσματα των ιονίζουσων ακτινοβολιών.....	65
3.5. Η σημασία της βλάβης του DNA.....	66
3.6. Βιολογικά αποτελέσματα σε κυτταρικό επίπεδο	68
3.6.1. Γονιδιακές μεταλλάξεις	68
3.6.2. Χρωμοσωματικές ανωμαλίες.....	69
3.6.3. Κυτταρικός θάνατος	69
3.7. Κυτταρικός θάνατος και καμπύλες κυτταρικής επιβίωσης.....	70
3.8. Τροποποιητικοί παράγοντες των βιολογικών επιδράσεων	72
3.9. Βιολογική επίδραση σε συστηματικό επίπεδο: είδη αποτελεσμάτων.....	73
3.9.1. Καθορισμένα αποτελέσματα (deterministic effects)	74
3.9.2. Στοχαστικά αποτελέσματα.....	77
3.10. Επιδημιολογία και στοχαστικά αποτελέσματα	78
3.11. Επιδημιολογική μελέτη των επιζώντων από την έκρηξη των ατομικών βομβών στη Hiroshima και το Nagasaki	79
3.12. Χρονική εμφάνιση των στοχαστικών αποτελεσμάτων	80
3.13. Επιδημιολογία και εκτίμηση κινδύνου εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων	82
3.14. Επιπτώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας στο προσωπικό των αεροσκαφών	91
3.15. Θεσμικά Πλαίσια	96
3.16. Μέθοδοι μέτρησης της ακτινοβολίας σε αεροσκάφη	101
3.17. Η μελέτη των διδύμων της NASA: Πολυδιάστατη ανάλυση επανδρωμένης διαστημικής αποστολής, διάρκειας ενός έτους	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	107

Εφαρμογή των κυριότερων υπολογιστικών μοντέλων	107
4.1. Υπολογιστικά μοντέλα.....	107
4.2. SIEVERT	107
4.3. AVIDOS (AVIDOS 2.0).....	124
4.4. CARI	130
4.4.1. Γενικά	130
4.4.2. Μοντέλα GCR.....	131
4.4.3. Επιλογές προγράμματος	134
4.4.4. Επιλογές εξόδου-μετατροπή της σωματιδιακής ροής GCR σε δόση	134
4.4.5. Δόσεις πτήσεων	135
4.4.6. Αβεβαιότητες προγράμματος.....	135
4.4.7. Αποτελέσματα.....	136
4.4.8. Μετρήσεις σε υψόμετρο εμπορικής πτήσης	137
4.4.9. Συγκρίσεις με τα μοντέλα	137
4.5. DYASTIMA.....	142
4.5.1. Εκτέλεση προσομοίωσης	148
4.5.2. Συμπεράσματα από την χρήση του μοντέλου DYASTIMA / DYASTIMA-R.....	152
4.5.3. Δυνατότητες του προγράμματος DYASTIMA / DYASTIMA-R	153
4.6 Πειραματική διαδικασία.....	154
Έτος 2008	162
Έτος 2014	166
Έτος 2019	169
4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων Dyastima και Cari-7	173
ΚΕΦΑΛΑΙΟ V.....	175
Συμπεράσματα και Προοπτικές	175
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	183
Υπολογιστικό μοντέλο Sievert.....	183
Παράρτημα Β	190
Υπολογιστικό μοντέλο Cari-7A	190
Παράρτημα Γ	191
Υπολογιστικό μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R.....	191
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	217
Βιβλία:.....	217
Ιστοσελίδες:.....	218
Δημοσιεύσεις:	219

Εισαγωγή

Η εκπόνηση της εργασίας αυτής έχει ως σκοπό τη μελέτη της λαμβανόμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας, στην οποία εκτίθενται τα πληρώματα αεροσκαφών αλλά και οι επιβάτες κατά τη διάρκεια μιας αεροπορικής πτήσης. Η μελέτη των δόσεων αυτών θα γίνει τόσο όταν επικρατούν συνθήκες ήπιας ηλιακής δραστηριότητας όσο και έντονης, οι οποίες χαρακτηρίζονται πολλές φορές από την εμφάνιση γεωμαγνητικών καταιγίδων. Η μελέτη γίνεται με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων και εφαρμογών προσομοίωσης μιας αεροπορικής πτήσης, που έχουν κατασκευαστεί από πανεπιστήμια και ιδρύματα, και έχουν την πιστοποίηση διεθνών οργανισμών. Ακόμα, γίνεται παρουσίαση και χρήση της εφαρμογής υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας DYASTIMA καθώς και τη προέκτασής της DYASTIMA-R, σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα, η οποία αναπτύχθηκε από την ομάδα A.NE.MO.S (Δρ. Παύλο Πασχάλη) του Πανεπιστημίου Αθηνών. Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αναλύουμε τις επιπτώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας και του διαστημικού καιρού στην υγεία πληρωμάτων αεροσκαφών και των επιβατών, και φαίνεται η ανάγκη ύπαρξης ενός πρωτοκόλλου ακτινοπροστασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αντικείμενο που μελετήθηκε σε αυτήν την εργασία, μελετάται από διεθνείς οργανισμούς, όπως ο Οργανισμός Διαστήματος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (NASA) και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA), μέσω του προγράμματος SSA Space Radiation Expert Service Centre, στο οποίο συμμετέχει, ως Expert Group, η ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η εργασία αυτή αποτελείται από πέντε κεφάλαια, τρία Παραρτήματα και την βιβλιογραφία, στα οποία ακολουθούμε την ακόλουθη θεματολογία:

- Στο κεφάλαιο I, δίνονται ο ορισμός και η προέλευση της κοσμικής ακτινοβολίας, ανάλυση του ενεργειακού φάσματος, αναλυτική περιγραφή της διαμόρφωσης αυτής, καθώς και ο ορισμός της μαγνητικής δυσκαμψίας.
- Στο κεφάλαιο II, γίνεται αναφορά στους τρόπους ανίχνευσης της κοσμικής ακτινοβολίας, κάνοντας κυρίως περιγραφή των μετρητών νετρονίων και ιδιαίτερα του μετρητή νετρονίων που λειτουργεί στο Πανεπιστήμιο Αθηνών. Περιγράφεται

το Παγκόσμιο Δίκτυο μετρητών νετρονίων και αναγράφεται ο επιτακτικός λόγος ύπαρξής του, καθώς και της υπηρεσίας GLE alert.

- Στο κεφάλαιο III, αναγράφονται τα μεγέθη δοσιμετρίας και οι βιολογικές επιπτώσεις της λαμβανόμενης δόσης, με ιδιαίτερη αναφορά στα πληρώματα αεροσκαφών. Γίνεται αναφορά των θεσμικών πλαισίων που διέπουν την έκθεση σε ακτινοβολία καθώς και των αρχών ακτινοπροστασίας.
- Στο κεφάλαιο IV, πραγματοποιείται εκτέλεση και μελέτη διαφόρων μοντέλων υπολογισμού δόσεων λόγω κοσμικής ακτινοβολίας, εκτελώντας διάφορα σενάρια, παίρνοντας πλήθος μετρήσεων που μας βοηθάει στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.
- Στο κεφάλαιο V, αναγράφονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται τα παραρτήματα, οι πηγές και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Λέξεις – κλειδιά: κοσμική ακτινοβολία, μετρητές νετρονίων, διαστημικός καιρός, δοσιμετρία, θεσμικό πλαίσιο, υπολογιστικά μοντέλα

Abstract

The purpose of the current Postgraduate Diploma Thesis is to study the received dose of cosmic radiation, in which the aircraft crews as well as the passengers are exposed, during a flight. The study of these doses is carried out under conditions of both mild and intense solar activity, which are often characterized by the occurrence of geomagnetic storms. This study is carried out using computer models and simulation applications of an airline flight, that are created by Universities and Institutions and certified by international organizations. Furthermore, the DYASTIMA calculation application of radiation dose, is presented and used, as well as its extension DYASTIMA-R, at various atmospheric altitudes, which were developed by the A. NE.MO.S team (and specifically by Dr. Pavlos Paschalis) of the University of Athens. After extracting the results, there is an analysis of the effects of cosmic radiation and space weather, on the health of aircraft crews and passengers, from which arises the need for a radiation protection protocol. It is worth mentioning that the subject of this paper, is being studied by international organizations, such as the United States Space Agency (NASA) and the European Space Agency (ESA), through the SSA Space Radiation Expert Service Center, in which the Team of Cosmic Radiation from the University of Athens participates, as an Expert Group.

Keywords: cosmic ray, neutron monitor, space weather, dosimetry, institutional framework, calculation models

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

Κοσμική ακτινοβολία

1.1. Ορισμός

Κοσμική ακτινοβολία ονομάζεται μία κατηγορία ακτινοβολίας που αποτελείται από σωματίδια υψηλών ενεργειών που κινούνται δηλαδή με υπερσχετικιστικές ταχύτητες τα οποία παράγονται σε κάποιο μέρος του Σύμπαντος, εντός ή εκτός του Γαλαξία μας, σε μεγάλη απόσταση από τη Γη, προσκρούουν στην ατμόσφαιρα της Γης και λόγω αυτού μπορούν να ανιχνευτούν με διάφορες πειραματικές διατάξεις που θα αναφέρουμε στη συνέχεια.

1.2. Προέλευση της Κοσμικής Ακτινοβολίας

Μπορούμε να πούμε ότι, ανάλογα με τις πηγές προέλευσης της, η κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε:

- Ηλιακή κοσμική ακτινοβολία
- Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία
- Ανώμαλη κοσμική ακτινοβολία

Η ηλιακή κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από σωματίδια που κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες και εντοπίζονται στο ενεργειακό φάσμα από μερικά keV μέχρι μερικές δεκάδες GeV.

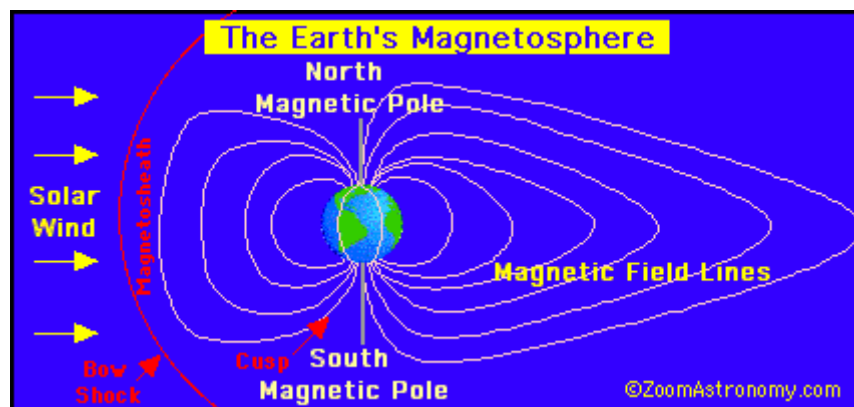
Η προέλευση των κοσμικών ακτινών που φτάνουν στη Γη είναι:

- Ηλιακή, από keV (ηλιακός άνεμος, CMEs) μέχρι GeV (εκλάμψεις)
- Γαλαξιακή, μέχρι PeV(=10¹⁵eV) από SNR (Supernova Remnant)
- Εξωγαλαξιακές πηγές, άνω των 10¹⁵eV. Από Active Galactic Nuclei (AGN), Gamma-Ray Bursts (GRB)
- Υπερσυμμετρικά σωματίδια, σε σενάρια top-down (αντί bottom-up)

1.2.1. Ηλιακή κοσμική ακτινοβολία

Οφείλεται σε διάφορα δυναμικά φαινόμενα που επηρεάζουν σε μικρό ή σε μεγαλύτερο βαθμό τον διαπλανητικό χώρο. Ο Ήλιος είναι ένας κίτρινος αστέρας νάνος που βρίσκεται στην κύρια ακολουθία και όπως είναι λογικό εκπέμπει ακτινοβολία σε

διάφορα μήκη κύματος, τόσο στο ορατό όσο και στο αόρατο φάσμα, η οποία είναι μεταβαλλόμενη λόγω κάποιων φυσικών μηχανισμών που προκαλούν διάφορα φαινόμενα. Μερικά από αυτά είναι ο ηλιακός άνεμος, οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας καθώς και οι ηλιακές εκλάμψεις. Ο ηλιακός άνεμος είναι ένα θερμό αέριο που παράγεται απ' τον Ήλιο, ταξιδεύει μέσα στο διαπλανητικό χώρο με μεγάλες ταχύτητες και φτάνει αρκετά μακριά ως τα όρια του ηλιακού συστήματος. Ο ηλιακός άνεμος είναι κύριο συστατικό της μαγνητόσφαιρας της Γης μαζί με το μαγνητικό της πεδίο. Η ισχύς του μαγνητικού πεδίου της Γης είναι περίπου 0,32 Gauss στον ισημερινό και περίπου 0,62 Gauss στους πόλους και ευθυγραμμίζεται με τον βόρειο και νότιο πόλο. Έχει αντιστραφεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας. Η ύπαρξη του πιθανότατα οφείλεται στον τεττηγμένο πυρήνα σίδηρο-νικέλιο, κύρια συστατικά του πυρήνα της Γης. Η μαγνητόσφαιρα είναι ο λόγος που υπάρχει η ζωή στον πλανήτη καθώς μας προστατεύει από τα εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα όπως ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Η μαγνητόσφαιρα λοιπόν είναι το στρώμα που αποτρέπει την είσοδο των φορτισμένων σωματιδίων στη γήινη ατμόσφαιρα. Βέβαια αν ένα ηλιακό φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο τότε η μαγνητόσφαιρα δεν μπορεί να αποτρέψει τα πιο ενεργητικά σωματίδια να εισχωρήσουν στην ατμόσφαιρα της Γης με αποτέλεσμα εκτός από την εκδήλωση φαντασμαγορικών φαινομένων όπως το Σέλας που εμφανίζεται ως επί το πλείστον στους πόλους να έχουμε και γεωμαγνητικές καταιγίδες με πλήθος επιπτώσεων στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στο περιβάλλον.



Εικόνα 1.1: Η μαγνητόσφαιρα της Γης.

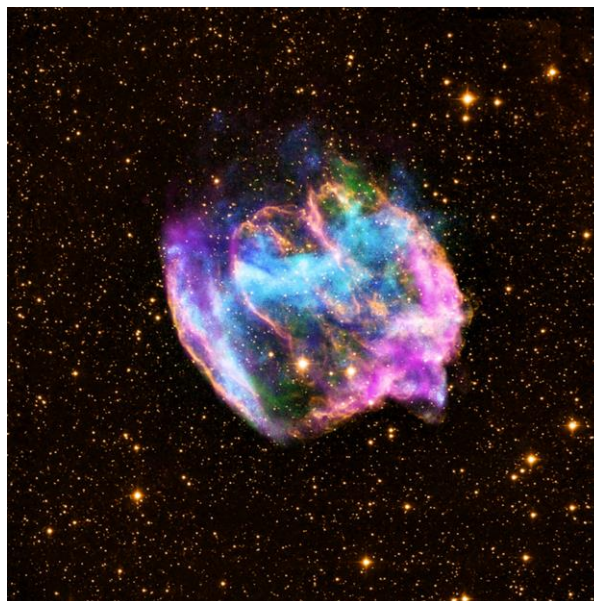
(Πηγή:<https://www.enchantedlearning.com/subjects/astronomy/planets/earth/Magnetosphere.shtml>)

1.2.2. Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (Galactic cosmic rays ή αλλιώς GCRs)

Είναι οι ακτίνες που έρχονται έξω από το ηλιακό μας σύστημα, από τον γαλαξία μας. Η σύσταση της είναι κυρίως πυρήνες ατόμων που έχουν φύγει τα ηλεκτρόνια τους καθώς ταξίδευαν μέσα στον γαλαξία μας. Παγιδεύονται στο μαγνητικό πεδίο του γαλαξία και επιταχύνονται για πολλά εκατομμύρια, ταξιδεύοντας πολλές φορές κατά μήκος του.

Κάποιοι πυρήνες εξ αυτών κατά το “ταξίδι” τους δια μέσω των αστεριών θα διασπαστούν με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων γ. Οι ακτίνες αυτές μπορούν να ανιχνευτούν και έχουμε πλέον την δυνατότητα να βγάλουμε συμπεράσματα για το πώς πέρασαν από το γαλαξία μας ή πιθανόν και από άλλους γαλαξίες.

- **supernova remnant-SNR:** Είναι επί της ουσίας ότι έχει απομείνει από την έκρηξη ενός υπερκαινοφανούς αστερά του Γαλαξία μας. Η μελέτη τους είναι πολύ σημαντική για την περαιτέρω κατανόηση του Γαλαξία μας αφού θεωρείται ότι ευθύνονται για την θέρμανση του διαστρικού χώρου, τον εμπλουτισμό του με βαριά στοιχεία καθώς και την επιτάχυνση των κοσμικών ακτίνων.



Εικόνα 1.2: Έντονα παραμορφωμένο κατάλοιπο σουπερνόβα που εμφανίζεται σε αυτήν την εικόνα. Ίσως περιέχει την πιο πρόσφατη μαύρη τρύπα που σχηματίστηκε στον Γαλαξία μας. Στην εικόνα αποτυπώνονται με διαφορετικό χρώμα οι συχνότητες ακτινοβολιών που ανιχνεύτηκαν κατά την έκρηξη (ακτίνες-X, υπέρυθρες, ραδιοσυχνότητες).

(Πηγή: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/w49b.html)

1.2.3. Εξωγαλαξιακές πηγές

Τα φορτισμένα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας με την υψηλότερη ενέργεια (άνω των 10^{15}eV) είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευθούν, επειδή υπολογίζεται ότι στη Γη φθάνουν ελάχιστα. Πλέον γνωρίζουμε ότι φθάνουν κατά μέσο όρο με ρυθμό ένα μόνο σωματίδιο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ετησίως.

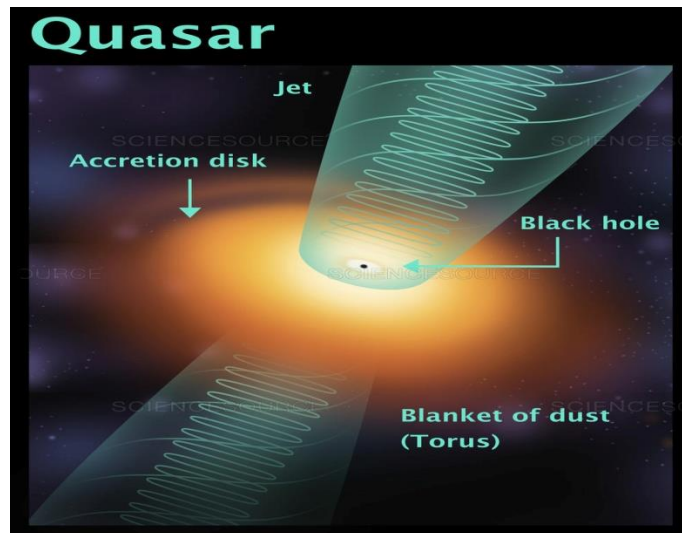
Όταν ένα από αυτά τα σπάνια σωματίδια προσκρούει στη γήινη ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρά μαζί της, μπορούμε να το ταυτοποιήσουμε την παρουσία του με μεγάλη πλέον ακρίβεια, επειδή η αλληλεπίδραση του με τα στρώματα της ατμόσφαιρας της Γης δημιουργεί μια «βροχή» σωματιδίων (ηλεκτρόνια, φωτόνια και άλλα υποατομικά σωματίδια).

Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξε μια μεγάλη ομάδα άνω των 400 επιστημόνων από 18 χώρες, που ανέλυσαν τα στοιχεία του Παρατηρητηρίου Πιέρ Οζέρ και έκαναν τη σχετική δημοσίευση στο περιοδικό Science (Pierre Auger Collaboration. 2015).

Το Παρατηρητήριο Πιέρ Οζέρ στη Δυτική Αργεντινή δημιουργήθηκε το 2001 ειδικά για να μελετήσει τις κοσμικές ακτίνες και είναι το μεγαλύτερο του είδους του στον κόσμο. Συλλέγει στοιχεία από 1.600 ανιχνευτές κοσμικών σωματιδίων, που είναι εξαπλωμένοι σε μια έκταση περίπου 3.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η ανίχνευση των κοσμικών σωματιδίων γίνεται από την λεγόμενη ακτινοβολία Τσερένκοφ, που εκπέμπεται όταν η κοσμική ακτινοβολία διαπεράσει δεξαμενές νερού. Τα νέα ευρήματα, που βασίζονται στην ανάλυση στοιχείων 12 ετών από το εν λόγω Παρατηρητήριο αποκαλύπτουν μια ασυμμετρία (θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ανισοτροπία) στην κατανομή των διευθύνσεων από όπου φαίνεται να προέρχονται τα κοσμικά σωματίδια, καθώς πλησιάζουν στη Γη.

Πιστεύεται ότι:

- **Ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες (Active Galactic Nuclei):** είναι ένας τύπος Γαλαξιών όπου έχει έναν πολύ ενεργό πυρήνα, τόσο ενεργό που παράγει περισσότερη ποσότητα ακτινοβολίας από ολόκληρο τον Γαλαξία. Ένας τέτοιος πυρήνας είναι τα κβάζαρ. Η πολύ μεγάλη ενέργεια τους πιστεύεται ότι παρέχεται από την πρόσπτωση υλικού σε μαύρες τρύπες στα κέντρα των φιλοξενούντων μακρινών γαλαξιών. Στους AGN ικανοποιούνται τα κριτήρια για να επιταχύνονται τα πρωτόνια σε ενέργειες της τάξης των 10^{20}eV .



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση ενεργοποίησης των Κβάζαρ από τεράστιας μάζας μαύρες τρύπες.

(Πηγή: <https://www.sciencesource.com/archive/Quasar-and-Black-Hole-SS2603395.html>)

- **Εκρήξεις ακτίνων γάμα (Gamma Ray Bursts):** είναι εκρήξεις που χαρακτηρίζονται από μικρής διάρκειας και μεγάλη ποσότητα ενέργειας (δίνουν φωτόνια ακτινοβολίας γάμα). Υπάρχει σύνθεση τους με κάποιες μορφές υπερκαινοφανούς σε μακρινούς Γαλαξίες. Ανιχνεύτηκαν τυχαία από αμερικανικούς στρατιωτικούς δορυφόρους την δεκαετία του 60 που έψαχναν για πυρηνικές δοκιμές της τότε σοβιετικής ένωσης.

Οι εκρήξεις ακτίνων γάμα είναι η φωτεινότερη πηγή κοσμικών φωτονίων γάμα σε ολόκληρο το σύμπαν.

Ανιχνεύονται το πολύ μία φορά την ημέρα και σε τυχαίες διευθύνσεις στην ατμόσφαιρα.

1.2.3. Υπερσυμμετρικά σωματίδια

Σε σενάρια top-down όπου οι κοσμικές ακτίνες προκύπτουν από την διάσπαση σωματίων με πολύ μεγάλη μάζα, που δημιουργήθηκαν στα πρώτα στάδια του σύμπαντος. Αυτά τα μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να δικαιολογήσουν την ύπαρξη κοσμικών ακτίνων ενέργειας μεγαλύτερης από 10^{21}eV , αλλά δυστυχώς έρχονται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει και έρχονται σε αντίθεση με τις φυσικές

αρχές. Το σύνολο αυτών των μοντέλων αυτά επικαλούνται μηχανισμούς παραγωγής σωματιδίων που δεν ακολουθούν το Καθιερωμένο Πρότυπο.

1.2.4. Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες

Η ύπαρξη τους οφείλεται στην ύπαρξη “γυμνών” ατόμων (πλάσμα) ηλίου, άνθρακα, οξυγόνου, υδρογόνου που δηλαδή έχουν χάσει τα ηλεκτρόνια τους και βρίσκονται στον μεσοαστρικό χώρο, πέρα από τα όρια της ηλιόπαυσης. Χαρακτηρίζονται με ταχύτητα που φτάνει τα 25Km/sec, σαν ηλιακός άνεμος. Όταν πλησιάσουν τον Ήλιο τότε παγιδεύονται από το μαγνητικό του πεδίο και με την συνεχόμενη κίνηση τους υπό την επίδρασή του αυξάνεται η ενέργεια τους μέχρις ότου να έχουν την δυνατότητα διαφυγής. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι ανώμαλες κοσμικές ακτίνες ή αλλιώς anomalous cosmic rays.

1.3. Πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία

1.3.1. Σύσταση

Όταν ένα σωματίδιο (πρωτογενές σωματίδιο) προσπίπτει πάνω στα ανώτατα όρια της ατμόσφαιρας (κυρίως πάνω σε μόριο αζώτου), προκαλεί καταιγισμό δευτερογενών σωματιδίων και τα παράγωγα αυτά σωματίδια αλληλεπιδρούν περαιτέρω δημιουργώντας τον λεγόμενο ατμοσφαιρικό καταιγισμό ο οποίος διακρίνεται σε δύο κυρίως τύπους καθώς και τον συνδυασμό αυτών.

Όταν το κύριο σωματίδιο που προκαλεί καταιγισμό είναι ακτίνες γ , ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο τότε ο καταιγισμός είναι αμιγώς ηλεκτρομαγνητικός. Όταν είναι αδρόνιο τότε ενεργοποιείται ο αδρονικός καταιγισμός που είναι ένας συνδυασμός αδρονικού και ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω είναι ηλιακής, γαλαξιακής και εξωγαλαξιακής προέλευσης. Τα σωματίδια τους, όλων των ειδών, έχουν πολύ υψηλές ενέργειες φτάνουν στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας όπου και αλληλεπιδρούν έντονα. Το πιο συνηθισμένο σωματίδιο πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα πρωτόνιο ενέργειας 1-10GeV.

Τα πρωτόνια ή αλλιώς πυρήνες H αποτελούν το 85% της κοσμικής ακτινοβολίας, το 12% είναι σωματίδια α (πυρήνες He) και το υπόλοιπο 3% αποτελείται κυρίως από πυρήνες στοιχείων όλου του περιοδικού πίνακα με πιθανότητα όμως που μειώνεται

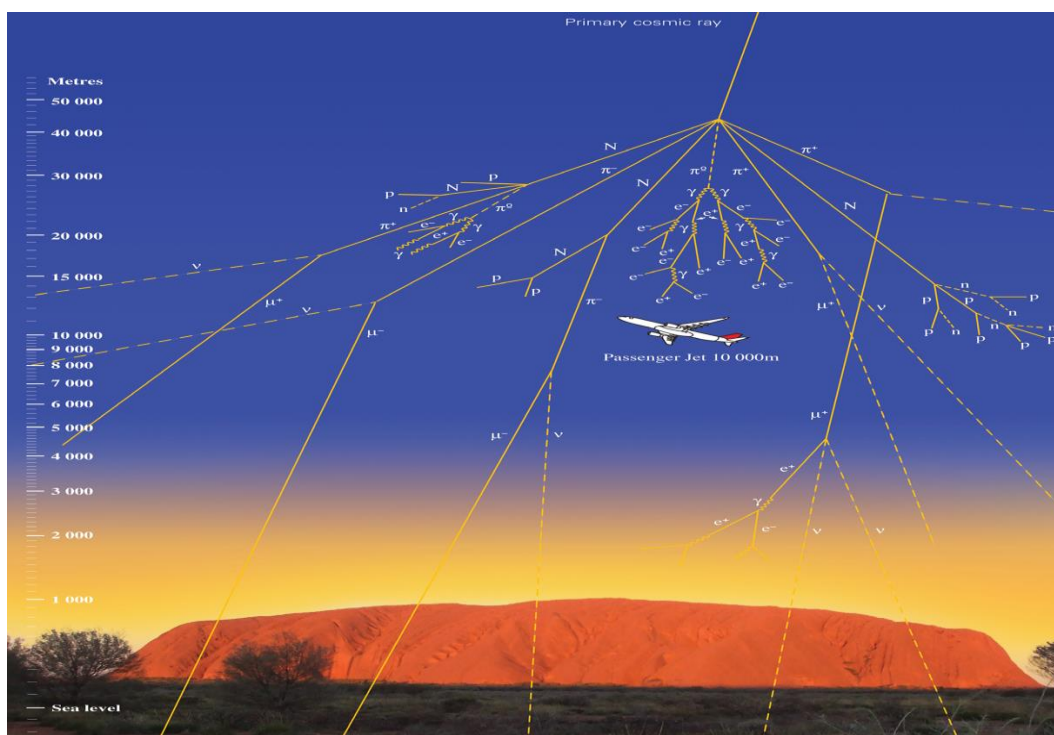
δραστικά με το Z των πυρήνων. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η σχετική περιεκτικότητα των βαρύτερων πυρήνων στη σύσταση της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμες με την ηλιακή.

Η κοσμική ακτινοβολία, εκτός από τους γυμνούς πυρήνες που δημιουργούνται στο εσωτερικό των αστέρων (εκτός από τους πολύ ελαφρούς H, He, Li, Be, B), αποτελείται σε μικρό ποσοστό και από πολλά άλλα σταθερά και μη σωματίδια που η παραγωγή τους οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πυρήνων μεγάλης ενέργειας με τη μεσοαστρική ύλη κατά τη διαδρομή τους από την πηγή προέλευσης τους μέχρι την Γη.

Αυτά τα σωματίδια είναι τα ηλεκτρόνια, τα αντιπρωτόνια, τα ποζιτρόνια αλλά και οι ελαφρείς πυρήνες Li, Be, B. Αυτά που απουσιάζουν από την σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι τα νετρόνια διότι όταν βρίσκονται έξω από τον πυρήνα του ατόμου, είναι ασταθή και έχουν μέσο χρόνο ζωής 885.8 ± 3.4 s (δευτερόλεπτα) (περίπου 15 λεπτά) και μετά διασπώνται προς ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino του ηλεκτρονίου. Τα νετρόνια σε αυτή την ασταθή κατάσταση ονομάζονται ελεύθερα νετρόνια. Γι' αυτό το λόγο δεν προλαβαίνουν να φτάσουν στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας για να μπορέσουν να ανιχνευτούν.

Ακόμα υπάρχει και ένα πλήθος αφόρτιστων σωματιδίων, όπως τα νετρίνα και τα φωτόνια γ με πολύ υψηλές ενέργειες.

Τέλος πιθανολογείται πως καταφθάνουν και σωματίδια σκοτεινής ύλης αλλά για την ώρα δεν έχουμε δυνατότητα ανίχνευσής τους.



Εικόνα 1.4: Σχέδιο ανάπτυξης ατμοσφαιρικού καταιγισμού από το ύψος των 50000 μέτρων μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας.

(Πηγή: http://www.redchairblogs.com/starstruck/files/2013/06/Uluru_Cosmic_Ray.jpg)

ΕΙΔΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ
Πρωτόνια (p)	85%
Σωματία α	12%
Ελαφρείς πυρήνες (Li, Be, B, C, N, O)	1%
Βαρείς πυρήνες ($Z > 8$)	<1%
Ηλεκτρόνια	1%
Ποζιτρόνια	0,2%
Αντιπρωτόνια	0,1%

Πίνακας 1.1: ποσοστιαία σύσταση της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας.

1.4. Δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία

1.4.1. Μαλακή και σκληρή συνιστώσα

Πρωτογενή κοσμικά σωματίδια, στην πλειοψηφία τους πρωτόνια, με ενέργεια μερικές δεκάδες GeV φτάνουν στην ατμόσφαιρα από το διάστημα. Αυτά που έχουν μικρότερη ενέργεια αποκόπτονται από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Η ατμόσφαιρα απορροφά την πλειοψηφία των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων μέσω διαφόρων μηχανισμών και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή πλήθους δευτερογενών σωματιδίων και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Έτσι δημιουργείται η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία και είναι αυτή που προκαλεί τον ιονισμό της ατμόσφαιρας που μέτρησε ο Hess τον Αύγουστο του 1912.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός σωματιδίου με το υλικό μέσον στο οποίο κινείται (στην περίπτωση μας την ατμόσφαιρα) είναι ανάλογη του μήκους ℓ της διαδρομής του και ανάλογη της πυκνότητας $\rho(\ell)$ του υλικού κατά μήκος της διαδρομής του, άρα είναι ανάλογη του γινομένου: $x = \ell \times \rho(\ell)$.

Θα πρέπει να τονίσουμε ό,τι στα πρώτα 30km της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια της θάλασσας περιλαμβάνεται το 99,9 % της συνολικής μάζας της! Άρα, το σύνολο των αντιδράσεων της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας συμβαίνει σε αυτό το κομμάτι της ατμόσφαιρας.

Οι δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες λοιπόν προκύπτουν από τις συγκρούσεις των πρωτογενών κοσμικών με τα μόρια των ανώτερων στρωμάτων της γήινης ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να παράγονται ελαφρότερα θραύσματα από τους αρχικούς πυρήνες. Έτσι, δημιουργούνται οι λεγόμενοι «καταιγισμοί» των δευτερογενών σωματιδίων, τα οποία είναι κυρίως πρωτόνια, νετρόνια, ακτινοβολία γ και ηλεκτρόνια, τα οποία καταγράφονται από επίγειους μετρητές. Στην επιφάνεια της θάλασσας, η σύσταση της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας είναι μίονια (80%), ηλεκτρόνια (18%) και πρωτόνια – νετρόνια (1-2 %).

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε τρεις συνιστώσες:

□ τη *νουκλεονική συνιστώσα*, που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια και είναι η πιο σταθερή συνιστώσα.



□ τη *σκληρή ή μεσονική συνιστώσα*, που αποτελείται από μίονια και πιόνια, και είναι πάρα πολύ διεσδυτική.



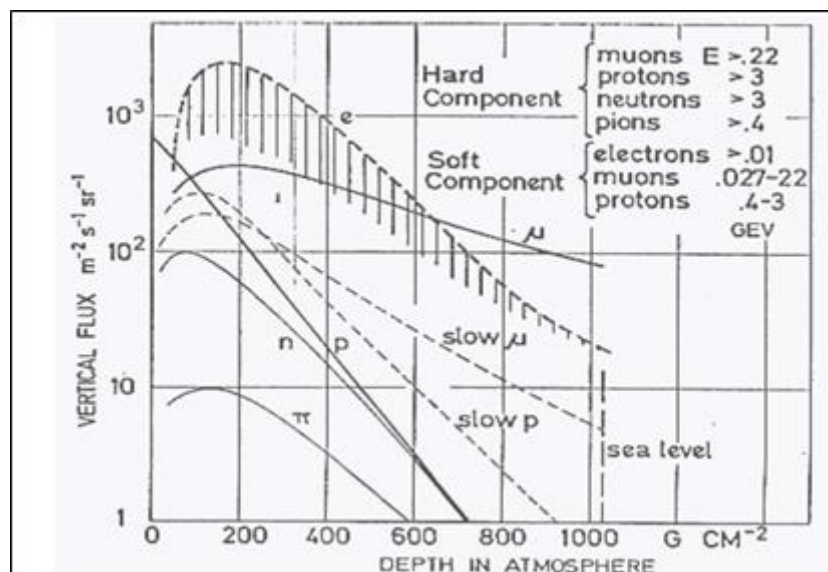
□ τη *μαλακή ή ηλεκτρο-φωτονική συνιστώσα*, η οποία αποτελείται από ηλεκτρόνια και φωτόνια.



Σωματίο	Αλληλεπίδραση			Μάζα (MeV)	Χρόνος ζωής	Ατμοσφαιρικό μήκος απορρόφησης (g cm^{-2})
	Ηλεκτρομαγνητική	Ισχυρή πυρηνική	Ασθενής πυρηνική			
Πιόνιο	X	X		134	26ns	115
Μιόνιο	X		X	106	2 μ s	260
Νετρόνιο		X		932	12min	140
Πρωτόνιο	X	X		938	σταθ.	110
Ηλεκτρόνιο	X			0.511	σταθ.	100
Φωτόνιο	X					

Πίνακας 1.2: τα σωματίδια των ατμοσφαιρικών καταιγισμών με όλες τις ιδιότητες τους.

Αυτό που αξίζει να προσέξουμε είναι ο χρόνος ζωής καθώς και το ατμοσφαιρικό μήκος απορρόφησης του καθενός. Με αυτό τον τρόπο γίνεται κατανοητό το διάγραμμα που συσχετίζει την κάθετη ροή ατμοσφαιρικών σωματιδίων με το ατμοσφαιρικό βάθος από τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 1.5: κατακόρυφη ροή των σωματιδίων της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους (σε g/cm^2) ή του υψομέτρου (σε km).

Παρατηρούμε ότι:

- ο αριθμός των πρωτονίων, κατά την διάρκεια ενός ατμοσφαιρικού καταιγισμού, ακολουθεί εκθετική πτώση και φτάνει τον αντίστοιχο αριθμό των πιονίων και των νετρονίων.

- b) οι ροές των δευτερογενών σωματιδίων μ^+ , μ^- , π^+ , π^- και ν_μ δημιουργούν το μέγιστό τους πολύ ψηλά, πάνω από το ύψος των 10 km. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε ότι οι ροές των πρωτονίων, νετρονίων και ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων έχουν το μέγιστό τους ήδη εκτός ατμόσφαιρας. Ιδιαίτερα για τα ηλεκτρόνια, ο αριθμός τους αρχικά παρουσιάζει εκθετική αύξηση (χαρακτηριστικό του ηλεκτροφωτονικού καταιγισμού) και στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Τα υψηλής ενέργειας μίονια εμφανίζουν αργή μείωση ενώ τα αντίστοιχα μίονια χαμηλής ενέργειας έχουν τον απαραίτητο χρόνο, ώστε να διασπαστούν προτού φτάσουν στην επιφάνεια της Γης
- c) όλες οι ροές (πλην των νετρίνων που δεν απορροφώνται καθόλου) μειώνονται εκθετικά μετά τα 10 km καθώς πλησιάζουμε στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα γνωρίζουμε ότι διατηρούν μία σχεδόν σταθερή ροή 200 νετρίνων ανά $\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$.
- d) στο επίπεδο της θάλασσας (σε μηδενικό υψόμετρο) φθάνουν περίπου (με $E > 1 \text{ GeV}$): λιγότερα από 100 μίονια, 1 νετρόνιο και ένας πολύ μικρός ηλεκτρονίων (υποδιαίρεση της μονάδας) ανά $\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{sec}$.

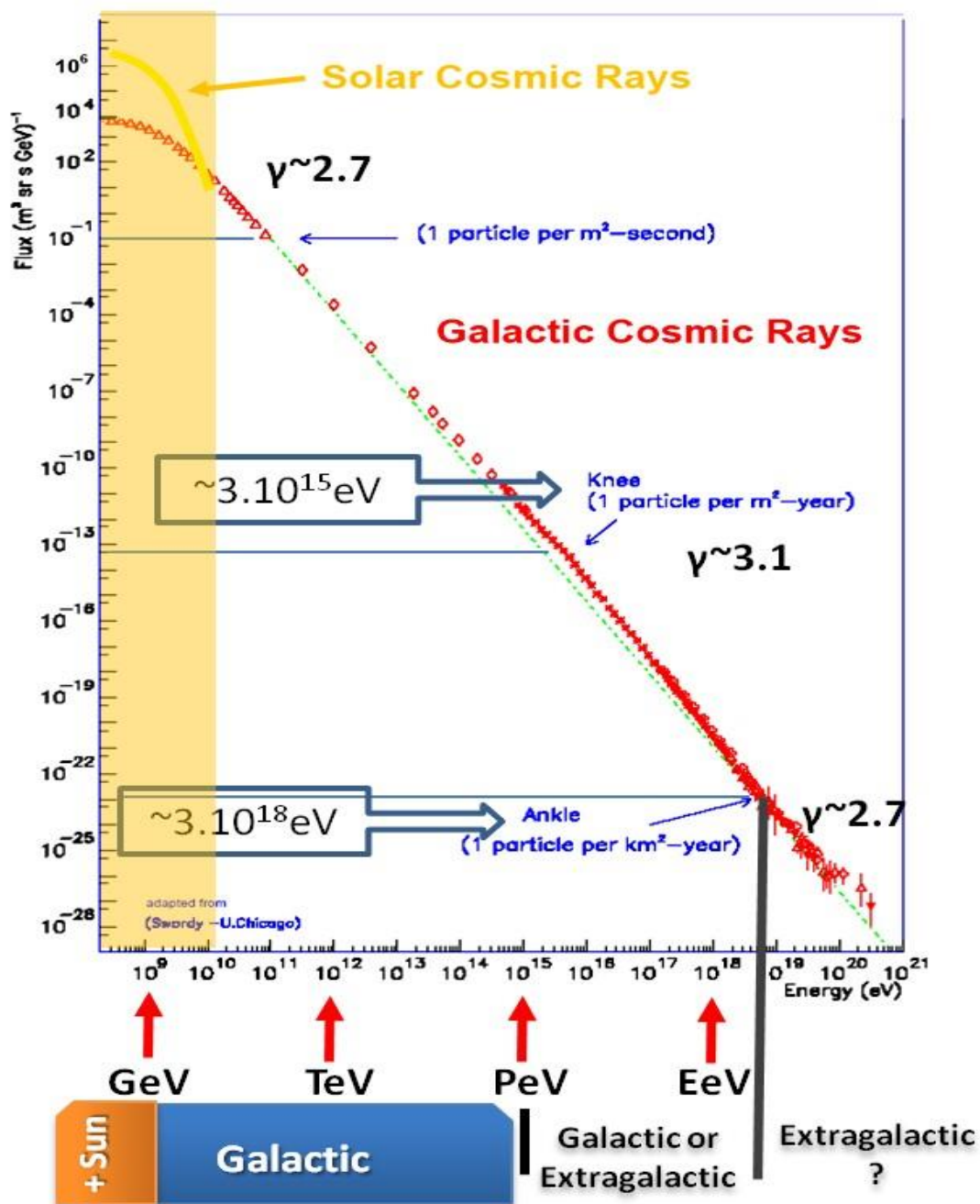
1.5. Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας

Στο διάγραμμα που ακολουθεί μας δείχνει το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα μεταβολής της έντασης J της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ενέργειας E η οποία ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης:

$$J(E) = k \cdot E^{-\gamma}$$

όπου με γ συμβολίζεται ο φασματικός δείκτης και k μία σταθερά

Επειδή η ένταση $J(E)$ καλύπτει μια τεράστια περιοχή, χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα στους δύο άξονες διότι η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας καλύπτει μια πολύ μεγάλη έκταση ενεργειών και ροής (δηλαδή έχουμε λογαριθμική κλίμακα και στους δύο άξονες). Οπότε αν λογαριθμίσουμε την παραπάνω σχέση παίρνουμε το διάγραμμα της εικόνας 1.6, όπου η κλίση της ευθείας $\log J(E) = f(\log E)$ δίνει τον φασματικό δείκτη γ . Η τιμή του γ δεν είναι σταθερή όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω και μεταβάλλεται σε περιοχές του φάσματος των ενεργειών των κοσμικών ακτίνων από 10^{10} eV έως 10^{21} eV .



Εικόνα 1.6: Ροή Κοσμικών Ακτίνων σαν συνάρτηση της ενέργειας. Η κλίμακα είναι λογαριθμική και στους δύο άξονες. Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων υποδηλώνει τα διαφορετικά συστατικά και πηγές (Α. Παπαϊοαννου, adopted from the CR spectrum by [S. Swordy](#)).

(Πηγή: <https://blogs.egu.eu/divisions/st/2018/03/19/cosmic-rays-messengers-from-space/>)

Τα κύρια χαρακτηριστικά του φάσματος είναι τα εξής:

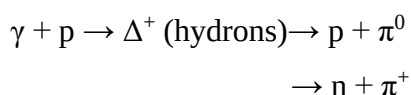
1. Στις μικρές ενέργειες $E < 10^{10}$ eV, το φάσμα χαρακτηρίζεται από μικρή κλίση. Σημαντική είναι η επιρροή της ηλιακής δραστηριότητας. Η ροή των εισερχόμενων κοσμικών σωματιδίων σε αυτές τις ενέργειες επηρεάζεται έντονα από το μεσοπλανητικό μαγνητικό πεδίο και τον ηλιακό άνεμο με αποτέλεσμα τα χαμηλής ενέργειας σωματίδια από το εσωτερικό του ηλιακού συστήματος, τις περισσότερες φορές, να μην έχουν την δυνατότητα εισέλθουν στην γήινη ατμόσφαιρα. Πλέον έχει επιβεβαιωθεί η ‘αντι-συσχέτιση’ μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες χαμηλής τάξης μεγέθους μέχρι 10^{10} eV. Για μεγαλύτερες ενέργειες η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας είναι πολύ μικρή και η ροή αντιπροσωπεύει την ροή στο διάστημα.
2. Για ενέργειες μεγαλύτερες των 10^{10} eV η κλίση αλλάζει τιμή και γίνεται $\alpha=2,75$. Η τιμή αυτή παραμένει η ίδια για 5 τάξεις μεγέθους (δηλαδή περίπου μέχρι την τιμή 10^{15} eV). Σε αυτήν την περιοχή του φάσματος βρίσκεται ο κύριος όγκος των κοσμικών ακτίνων.
3. Στην συνέχεια, για ενέργειες πάνω από τα $5 \cdot 10^{15}$ eV η κλίση γίνεται απότομη και παίρνει την τιμή $\alpha=3$. Το σημείο στο οποίο η κλίση αλλάζει τιμή είναι γνωστό ως ‘‘γόνατο’’ (knee).
4. Για $E \geq 5 \cdot 10^{18}$ eV η κλίση αλλάζει και γίνεται πιο ήπια και παίρνει την τιμή $\alpha \cong 2,5$. Το σημείο αλλαγής της κλίσης λέγεται ‘αστράγαλος’ (ankle).
Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε για λόγους ακριβείας ότι στο φάσμα παρατηρείται ένα δεύτερο γόνατο για $E \sim 3 \cdot 10^{17}$ eV, δηλαδή αναφερόμαστε σε σημείο όπου αυξάνεται η κλίση περισσότερο.
5. Μετά τον αστράγαλο βρίσκεται η περιοχή των Υπερ-Υψηλής Ενέργειας Κοσμικών Ακτίνων (Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR). Το ποσοστό των κοσμικών ακτίνων σε αυτήν την περιοχή είναι μικρότερη από ένα σωματίδιο ανά έτος (λιγότερα από 1 στα 10^{26} κοσμικά σωματίδια). Τέλος, στην περιοχή ενεργειών πέρα από την UHECR τα γεγονότα που έχουν παρατηρηθεί είναι λιγότερα από πέντε! Η περιοχή κλείνει με την υψηλότερη ενέργεια που έχει ποτέ μετρηθεί δηλαδή $E=10^{21}$ eV όπου το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε από το πείραμα Fly’s Eye.

Οι αλλαγές στην κλίση του ενεργειακού φάσματος μπορούν να εξηγηθούν με τους παρακάτω μηχανισμούς:

Το “γόνατο” μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι στον Γαλαξία μας υπάρχουν μηχανισμοί που επιταχύνουν τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας όπως είναι τα κατάλοιπα των σουπερνόβα. Αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ένα μέγιστο που μπορούν να επιταχύνουν τη ενέργεια των κοσμικών σωματιδίων τους και πιθανόν ένα μέρος αυτών των σωματιδίων λόγω της τόσο μεγάλης τους ενέργειας έχουν την δυνατότητα να διαφύγουν από το μαγνητικό πεδίο του Γαλαξία και να διαφεύγουν στον εξωγαλαξιακό χώρο.

Στην περιοχή ενεργειών πάνω από τα 10^{15} eV θεωρούμε ότι σταματά να αποδίδει ο μηχανισμός επιτάχυνσης που σχετίζεται με τα υπολείμματα σουπερνόβα. Στην περιοχή αυτή συναντάμε περισσότερους πυρήνες σιδήρου (στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη ενέργεια είναι ανάλογη του φορτίου οπότε η ενέργεια των πυρήνων σιδήρου είναι 24 φορές μεγαλύτερη από του πρωτονίου).

Ο “αστράγαλος” είναι ουσιαστικά το όριο όπου οι κοσμικές ακτίνες αλλάζουν προέλευση και από γαλαξιακής προέλευσης γίνονται εξωγαλαξιακής. Βέβαια αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα όριο που ονομάζεται όριο ή αποκοπή GZK (Greisen-Zatsepin-Kusmin) (αντίδραση των πρωτονίων με το κοσμικό μικρο-κυματικό υπόβαθρο), όπου απαγορεύει σε σωματίδια με ενέργεια πάνω από $5 \cdot 10^{19}$ eV να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις. Αναφέρουμε επιγραμματικά ότι η βασικότερη αλληλεπίδραση είναι αυτή με την Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου που οδηγεί στο κατώφλι GZK. Περίπου σε ενέργεια $4 \cdot 10^{19}$ eV, τα πρωτόνια των κοσμικών ακτίνων παράγουν ένα συντονισμό όταν αλληλεπιδρούν με τα μικροκυματικά φωτόνια των 2,7 Kelvin. Από το συντονισμό αυτό προκύπτει η παραγωγή ενός πιονίου μέσω της αντίδρασης:

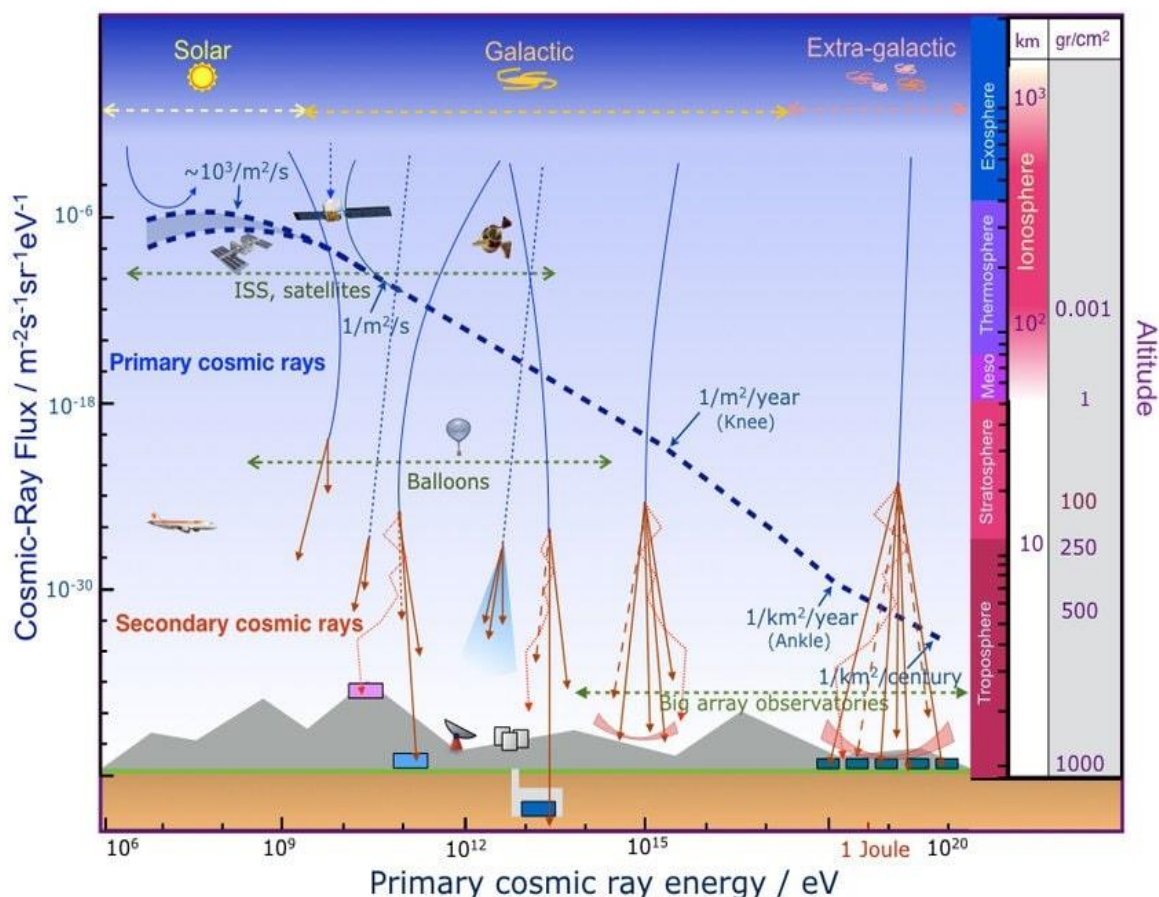


με την κοσμική ακτινοβολία να χάνει περίπου το 1/6 της αρχικής ενέργειας.

Για το δεύτερο “γόνατο” για $E \sim 3 \cdot 10^{17}$ eV, υπάρχουν πολλά σενάρια που να δικαιολογούν την ύπαρξη του. Ένα σενάριο είναι τα κοσμικά σωματίδια με ενέργεια μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^{15}$ eV, δεν έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και κατά την διάσπαση τους παράγουν ένα νέο είδος σωματιδίων που δεν μπορεί να ανιχνευτεί ακόμα από τους σημερινούς ανιχνευτές. Η μάζα ενός τέτοιου σωματιδίου πρέπει να είναι πολύ μεγάλη (της τάξης των 10^{12} eV). Στην περίπτωση αυτή και για ενέργειες της τάξης $\sim 10^{18}$ eV, το φάσμα μπορεί να ερμηνευτεί με τον κύριο μηχανισμό επιτάχυνσης των κοσμικών σωματιδίων αυτών των ενεργειών που δεν είναι άλλο από το κέντρο του Γαλαξία. Έτσι, η ανακάλυψη ενός νέου σωματιδίου στην κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη

φυσική στοιχειωδών σωματιδίων πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο. Αναφέρουμε την ενδιαφέρουσα πρόταση των Καζανά-Νικολαΐδη ότι η ύπαρξη του γόνατου μπορεί να οφείλεται σε επιπλέον διαστάσεις του χώρου στις οποίες είναι δυνατόν να απάγεται ένα μέρος της ενέργειας των κοσμικών ακτινοβολιών με τη μορφή γκραβιτονίων.

Από την μελέτη του διαγράμματος καταλαβαίνουμε ότι δεν αρκεί ένα τύπος ανιχνευτών για να γίνει ανίχνευση και μελέτη του ολοκληρωμένου φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1.7: Πρωτογενές φάσμα κοσμικών ακτίνων ως συνάρτηση της ενέργειας. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει τη ροή κοσμικών ακτίνων σε κλίμακα μονάδων που εμφανίζονται στον αριστερό κατακόρυφο άξονα. Κάτω από ενέργειες 10^{14} eV, οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες μετριοούνται απευθείας με ανιχνευτές τοποθετημένους σε δορυφόρους και μπαλόνια. Σε υψηλότερες ενέργειες χρησιμοποιούνται έμμεσες μετρήσεις που γίνονται από επίγειες διατάξεις ανιχνευτών. Ο δεξιός κατακόρυφος άξονας δείχνει τα στρώματα της ατμόσφαιρας, τα ύψη τους και την αντίστοιχη πίεση αέρα.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/312914838>)

Στις χαμηλές ενέργειες δηλαδή περίπου στην ενεργειακή περιοχή του 1 GeV η ροή είναι μεγαλύτερη και φτάνει στα 110 σωματίδια το δευτερόλεπτο, οπότε η ανίχνευση τους δεν απαιτεί μεγάλες επιφάνειες. Για την λεπτομερή ανίχνευσή τους αρκεί ένα τηλεσκόπιο με δύο ανιχνευτές επιφανείας 100 cm^2 σε απόσταση 20 cm^2 μεταξύ τους. Ένας τέτοιου είδους ανιχνευτής μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα μέσο που μπορεί να βρίσκεται στα όρια της ατμόσφαιρας όπως ένα μπαλόνι ή σε ένα διαστημόπλοιο-διαστημικό δορυφόρο και οι πληροφορίες που θα μας δώσει να επαρκούν για την ανίχνευση και την μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας σε αυτό το ενεργειακό φάσμα.

Όσο μεγαλώνουν οι ενέργειες των κοσμικών ακτίνων είναι απαραίτητη η χρήση ανιχνευτών μεγάλων διαστάσεων οι οποίοι πρέπει να είναι εκτεθειμένοι για μεγάλα χρονικά διαστήματα στην επίδραση της ακτινοβολίας. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε πως καταμετράται περίπου ένα σωματίδιο/ km^2 το χρόνο με ενέργεια 10^{19} eV και ένα σωματίδιο/ km^2 στα 100 χρόνια με ενέργεια 10^{20} eV .

Για τα πρωτογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες μικρότερες από 1 GeV/πυρήνα το φάσμα διαφοροποιείται γιατί η ροή παύει να αυξάνει όσο ελαττώνεται η ενέργεια λόγω της ύπαρξης αυτού που ονομάζουμε κατώφλι του φάσματος ή αλλιώς cut-off. Αυτός είναι ο λόγος όπου παρατηρούνται σωματίδια με τέτοιες μικρές ενέργειες μόνο σε μεγάλα γεωμαγνητικά πλάτη, σε περιοχές κοντά στους πόλους.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη του διαφορικού ενεργειακού φάσματος.

Διαφορίζοντας παραπάνω σχέση παίρνουμε το αντίστοιχο διαφορικό φάσμα που μας δείχνει πως μεταβάλλεται η ένταση των κοσμικών σωματιδίων σε μια συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή μεταξύ ενέργειας E και $E+dE$:

$$dJ(E) = -k\gamma E^{(\gamma+1)} dE$$

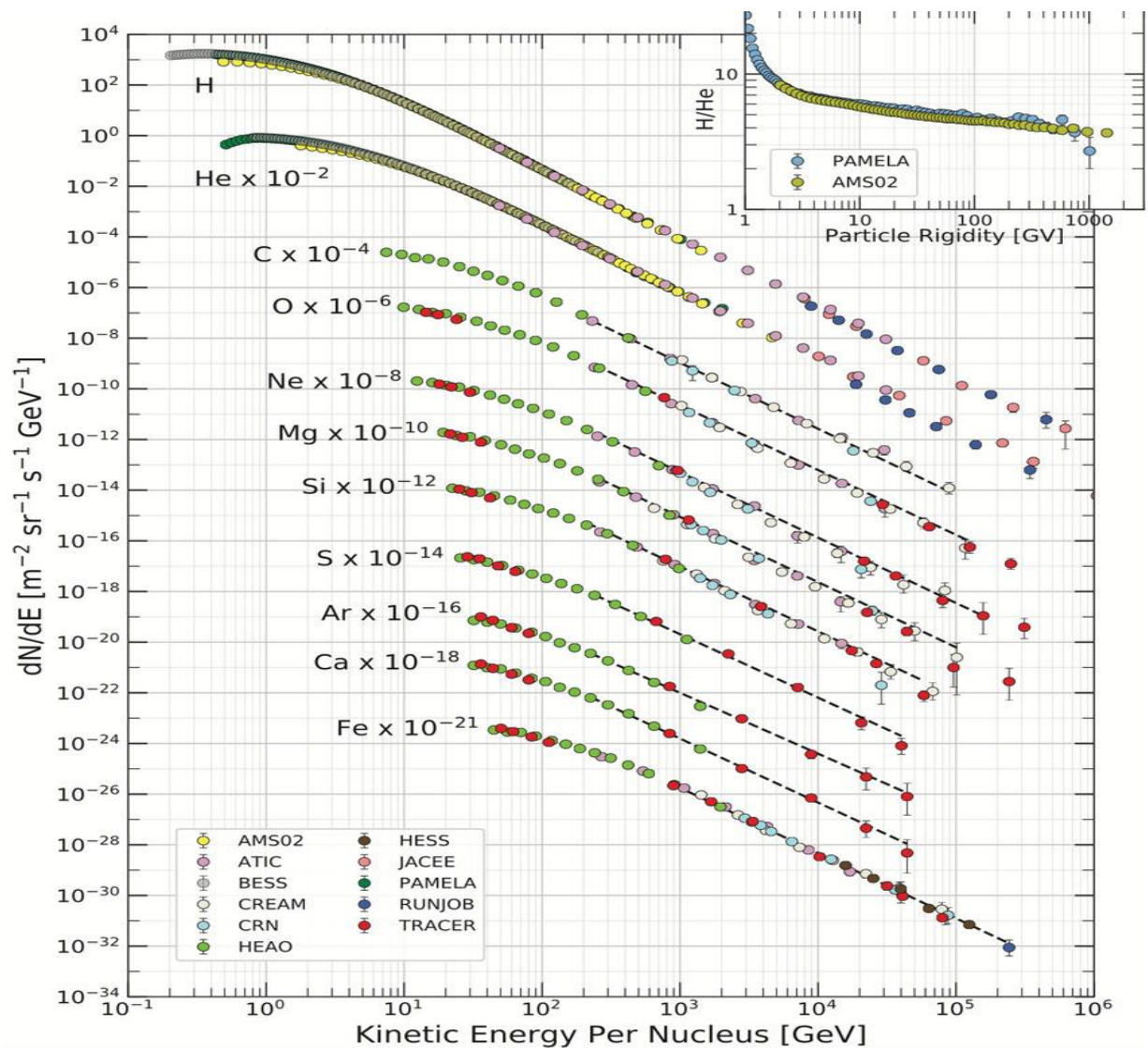
Στην εικόνα 1.7 διαφορικό ενεργειακό φάσμα πυρήνων άλλων στοιχείων (κοσμικών σωματιδίων) που φτάνουν στην ατμόσφαιρα ως συνάρτηση της κινητικής ενέργειας ανά νουκλεόνιο. Το φάσμα αναπαράγεται από δυναμικές ενεργειακές κατανομές.

Στο διάγραμμα βλέπουμε τις αντίστοιχες καμπύλες για διάφορους πυρήνες στοιχείων σε σύγκριση με τα πρωτόνια (πυρήνες υδρογόνου) και παρατηρούμε ότι έχουν την ίδια κλίση. Η μεγάλη διαφορά στις ενέργειες υποδεικνύει τη μεγάλη ποικιλία των πηγών της κοσμικής ακτινοβολίας.

Για τους πυρήνες που προκύπτουν από τις κρούσεις (spallation) με την διαστρική ύλη το φάσμα είναι πιο απότομο.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι στον άξονα των τετμημένων η ενέργεια E αντιστοιχεί στην ενέργεια του κάθε πυρήνα ανά νουκλεόνιο δηλαδή $E=E_{\text{πυρ}}/A$ με A να αντιστοιχεί στον μαζικό αριθμό του.

Ακόμα, όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα, η ροή των κοσμικών ακτίνων με ενέργεια μεγαλύτερη από 1 GeV ελαττώνεται με την αύξηση της ενέργειας, ενώ αυτό δεν συμβαίνει για σωματίδια με ενέργειες μικρότερες από 1 GeV/πυρήνα όπου η ροή παύει να αυξάνει όσο ελαττώνεται η ενέργεια.



Εικόνα 1.8: Η ροή των ατομικών πυρήνων από κοσμική ακτινοβολία ως συνάρτηση της κινητικής ενέργειας ανά πυρήνα που μετρήθηκε απευθείας από δορυφόρους ή μπαλόνια.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/334014044>)

Η ροή των σωματιδίων ανά m^2 , sterad και sec ως προς την ενέργεια E σε περιοχές εύρους $\Delta E = 1\text{GeV}$.

Παρατηρείται κατώφλι στις χαμηλές ενέργειες δηλαδή για $E \leq 10^6 \text{ eV}$ λόγω εξάρτησης της αλληλεπίδρασης και διάχυσης των κοσμικών ακτίνων από τον ηλιακό άνεμο κατά την πορεία τους προς την Γη (ηλιακή διαμόρφωση). Μάλιστα όσο πιο έντονη είναι η ηλιακή δραστηριότητα τόσο πιο έντονες είναι οι διαταραχές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που εμποδίζουν τη διάδοση των σωματιδίων χαμηλών ενεργειών ($E < 1\text{GeV}$) ως την επιφάνεια της Γης.

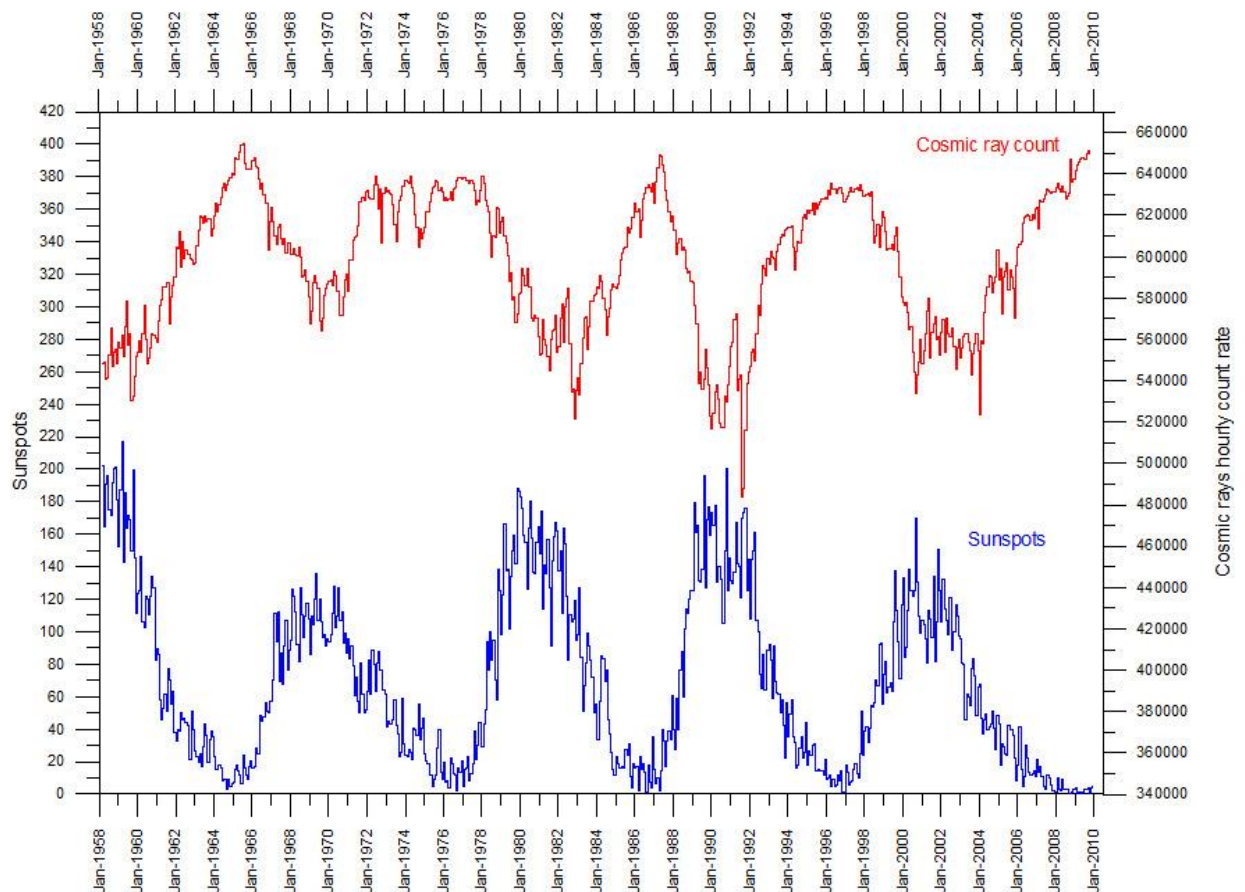
Ο λόγος για τον οποίο τα φάσματα δίνονται περίπου μέχρι την ενέργεια των 10^{13}eV , είναι ότι για σωματίδια με μικρές ροές (όπως Fe, αντιπρωτόνια κ.λ.π.), μόνο μέχρι αυτή την ενέργεια υπάρχουν αρκετά δεδομένα και έτσι δικαιολογείται η απόκλιση του φάσματος από την κατανομή.

Τέλος, στις ενέργειες μέχρι 10^{12}eV μπορεί να γίνει ταυτοποίηση του πυρήνα και η ενέργεια αναφέρεται ανά νουκλεόνιο ενώ στις πιο υψηλές ενέργειες αναφέρεται ανά πυρήνα.

1.6. Διαμόρφωση Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η κοσμική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ισοτροπία και σταθερότητα σε γαλαξιακή κλίμακα. Ο ήλιος και ο ενδοπλανητικός χώρος από όπου περνά για να φθάσει στη Γη η κοσμική ακτινοβολία επιδρούν σημαντικά ακόμη και σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις της τάξης των 10AU (Η αστρονομική μονάδα είναι μια μονάδα μήκους, περίπου η απόσταση από τη Γη έως τον Ήλιο). Το αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης είναι η εμφάνιση μεταβολών και ανισοτροπιών στο ενεργειακό φάσμα και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ορίζουμε ως διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας το σύνολο των μεταβολών αυτής ως συνάρτηση του χώρου, του χρόνου και της ενέργειας (Axford, 1965).

Η κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα η ένταση των κοσμικών ακτίνων να παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο ελάχιστο του ηλιακού κύκλου και αντίστροφα (Parker, 1965). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και με μία χρονική υστέρηση αρκετών μηνών όπως φαίνεται και στο επόμενο γράφημα.



Εικόνα 1.9: Μεταβολή της έντασης των κοσμικών ακτίνων και της μηνιαίας δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων από το 1958, σύμφωνα με το Γερμανικό σύστημα παρακολούθησης κοσμικών ακτίνων στο Kiel (GCRM) και το Εθνικό Κέντρο Γεωφυσικών Δεδομένων (NGDC) της NOAA, αντίστοιχα. Η υψηλή δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων συσχετίζεται με χαμηλή ένταση κοσμικών ακτίνων και αντίστροφα.

(Πηγή: <https://www.climate4you.com/Sun.htm>)

Οι μεταβολές της κοσμικής Ακτινοβολίας διακρίνονται σε ισότροπες και ανισότροπες. Ισότροπες μεταβολές, όπως:

- Ο ενδεκαετής ηλιακός κύκλος (μακρόχρονη διαμόρφωση)
- Η μείωση τύπου Forbush και
- 27-ήμερη διαμόρφωση

Και ανισότροπες μεταβολές, όπως:

- Η ημερήσια μεταβολή
- Η ημιημερήσια μεταβολή και
- Οι μικρής κλίμακας μεταβολές (π.χ. GLE)

Η μελέτη των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμεύει για την έρευνα των ενδοπλανητικών μετεωρολογικών συνθηκών. Επίσης αξιόλογες μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση του χώρου και του χρόνου δημιουργούν οι κινήσεις του ηλίου και της γης. Η μελέτη των μεταβολών της γίνεται από τις παρατηρήσεις των επίγειων σταθμών.

1.6.1. 11-ετής ηλιακός κύκλος

Ο Ήλιος είναι ένα ενεργό, δραστήριο αστέρι με ένα ισχυρό, μεταλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιούμε τον όρο ηλιακή δραστηριότητα για να περιγράψουμε την κατάσταση του Ήλιου κατά την οποία παρατηρείται στην ατμόσφαιρά του εκδήλωση έκτακτων και βίαιων φαινομένων. Η ηλιακή δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των ηλιακών εκλάμψεων που παρατηρούνται στη χρωμόσφαιρα ή από τις στεμματικές εκπομπές μάζας, ενώ μέτρο της αποτελεί ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων, οι οποίες εμφανίζονται στη φωτόσφαιρα (Hathaway, 2010). Τα φαινόμενα αυτά λαμβάνουν χώρα σε δύο ζώνες εκατέρωθεν του ισημερινού του ηλίου, σε ηλιογραφικά πλάτη από 5° έως 40°. Σχετίζονται με την ανάπτυξη πολύ ισχυρών μαγνητικών πεδίων πάνω στην επιφάνεια του, οι μαγνητικές γραμμές των οποίων βρίσκονται στην ζώνη μεταφοράς.

Τα φαινόμενα έχουν περιοδικό χαρακτήρα και πολλές φορές οι μεταβολές τους είναι εκρηκτικές. Η περίοδος εμφάνισής τους, που είναι κατά μέσο όρο 11.6 χρόνια και στην οποία εμφανίζεται μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή, ονομάζεται ηλιακός κύκλος ή κύκλος ηλιακής δραστηριότητας. Η χρονική απόσταση των ελαχίστων δύο διαδοχικών ηλιακών κύκλων ονομάζεται ενδεκαετής ηλιακός κύκλος (11ετής κύκλος). Κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου, παρατηρείται μεταβολή στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο που έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των χαρακτηριστικών των κοσμικών ακτίνων λόγω της μακρόχρονης διαμόρφωσης.

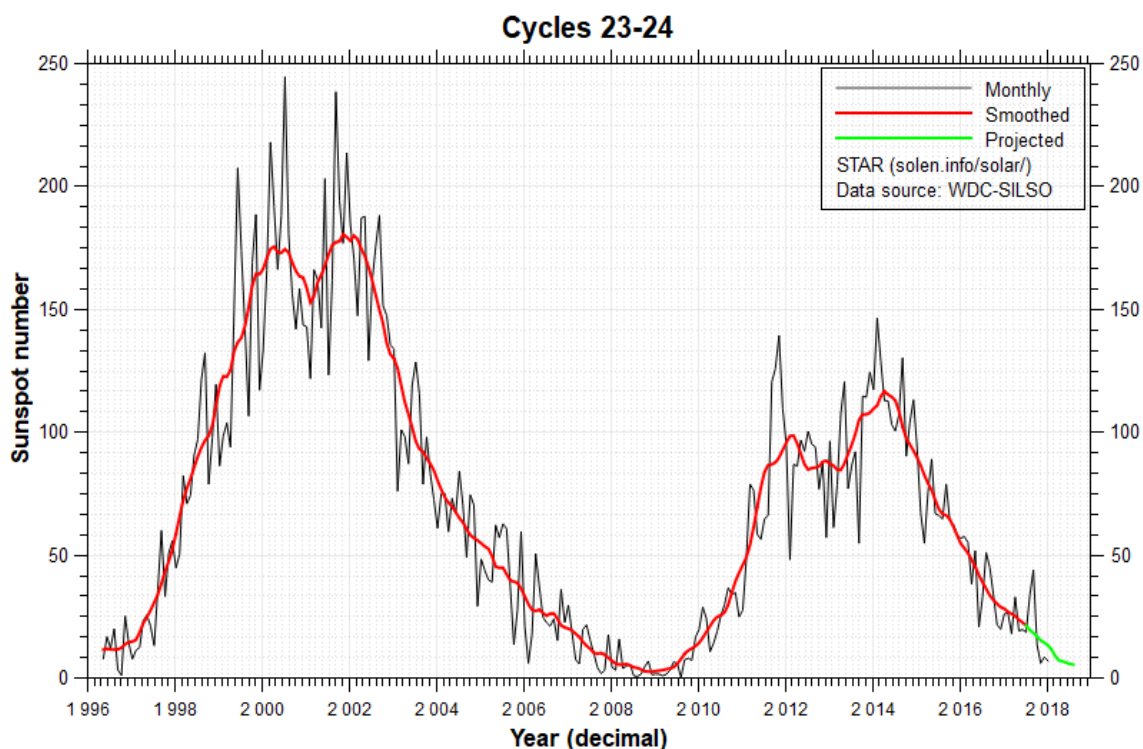
1.6.2. 22-ετής Ηλιακός Κύκλος

Οι ηλιακοί κύκλοι που χαρακτηρίζονται από περιττό αριθμό διαφοροποιούνται από τους άρτιους λόγω της αντιστροφής της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου του ηλίου. Οπότε εμφανίζεται μια περιοδικότητα 22 ετών στην ηλιακή δραστηριότητα και κατά συνέπεια στην κοσμική ακτινοβολία (Gnevyshev and Ohl, 1948).

Οι περιττοί κύκλοι χαρακτηρίζονται από ένα “οξύ” μέγιστο με απότομη άνοδο, μεγάλο χρόνο επαναφοράς και μεγάλη χρονική υστέρηση. Εν αντιθέσει, οι άρτιοι κύκλοι

εμφανίζουν 2 μέγιστα με πιο “πλατύ” μέγιστο, γρήγορη σχετικά επαναφορά και σημαντικά πιο μικρή χρονική υστέρηση.

Ακολουθεί το παράδειγμα των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων, τον 23ο και 24ο.



Εικόνα 1.10: Κατανομή των αριθμών των ηλιακών κηλίδων στον 23ο και 24ο ηλιακό κύκλο.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/326041650>)

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω γράφημα ο 23ος κύκλος είχε διάρκεια περίπου 12,5 χρόνια. Ξεκίνησε τον Μάιο του 1996 και τελείωσε τους τελευταίους μήνες του 2008. Το μέγιστο του παρατηρήθηκε το 2000. Στην καθοδική φάση του κύκλου (2001-2006) συνέβησαν πολλά φαινόμενα που χαρακτηρίστηκαν από υψηλή ένταση (μαγνητοσφαιρικά γεγονότα, μειώσεις Forbush, επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας) (Mavromichalaki et al., 2006). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μεγάλης χρονικής διάρκειας ελάχιστο, από το 2006 μέχρι το 2009, που παρατηρήθηκε ανάμεσα στον 23ο και 24ο κύκλο. Μάλιστα, ασυνήθιστα χαμηλή δραστηριότητα παρατηρήθηκε το 2008 και το 2009 (Paouris et al., 2012). Ο 24ος ηλιακός κύκλος ξεκίνησε ουσιαστικά το 2010 και εμφανίστηκε το πρώτο μέγιστο το 2012 και το δεύτερο μέγιστο το 2014. Τώρα, όπως δείχνουν τα δεδομένα βρισκόμαστε στην καθοδική του φάση. Από τα παραπάνω γίνεται

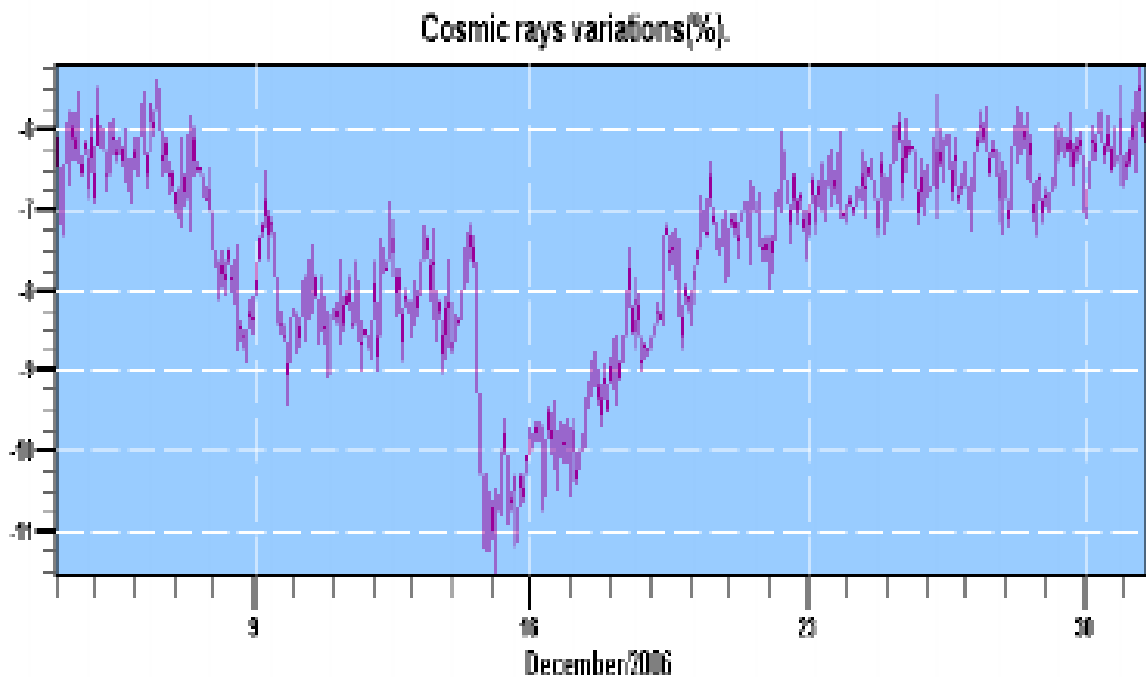
αντιληπτό ότι ο 24ος ηλιακός κύκλος εμφανίζει μια ιδιαίτερα χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα (Svalgaard et al., 2005).

1.6.3. Μείωση Forbush

Η μείωση Forbush είναι ένα ηλιοσφαιρικό φαινόμενο, που αφορά στις μεταβολές της πυκνότητας και της ανισοτροπίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, οι οποίες προκαλούνται από διαδιδόμενες διαταραχές του ηλιακού ανέμου μεγάλης κλίμακας. Επί της ουσίας είναι μία μικρής χρονικής διάρκειας ελάττωση της κοσμικής ακτινοβολίας, όπου παρατηρείται μείωση της τάξης του 5% μέσα σε χρονικό διάστημα λίγων ωρών έως 2-3 ημερών. Οι μειώσεις Forbush διακρίνονται σε μη περιοδικές (non-recurrent decreases) και σε σποραδικές (recurrent decreases). Οι πρώτες οφείλονται σε παροδικά διαπλανητικά γεγονότα σχετιζόμενα με στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας από τον ήλιο (coronal mass ejections – CME). Οι δεύτερες σχετίζονται με τον ηλιακό άνεμο μεγάλης ταχύτητας (Lockwood J., 1971). Οι αλληπάλληλες μειώσεις Forbush συνιστούν εμφάνιση ηλιακής καταιγίδας.

Πρόκειται για ένα φαινόμενο παγκόσμιου χρόνου, που μπορεί να λαμβάνει χώρα σε διάφορες περιοχές της Γης ταυτόχρονα και εμφανίζεται μετά από μία ηλιακή έκλαμψη. Οι ηλιακές εκλάμψεις εμφανίζονται ως αιφνίδιες, αστραπιαίες και έντονες μεταβολές της φωτεινότητας σε κάποιες περιοχές του Ηλίου και απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας από την ηλιακή ατμόσφαιρα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται ενεργοποιεί σχεδόν ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες-X και γ.

Μια μείωση Forbush χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση δυο βημάτων (Barnden L., 1973). Το πρώτο βήμα παρουσιάζεται εξαιτίας του κρουστικού κύματος, ενώ το δεύτερο εξαιτίας της εκτοξευμένης μάζας από το στέμμα του Ήλιου όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Παρατηρείται σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη, με διαφορές που οφείλονται στο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας και τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις κάθε τόπου που θα αναφέρουμε πιο κάτω.



Εικόνα 1.11: Μείωση Forbush όπως καταγράφηκε από τον σταθμό ανίχνευσης νετρονίων στην Αθήνα τον Δεκέμβριο του 2006.

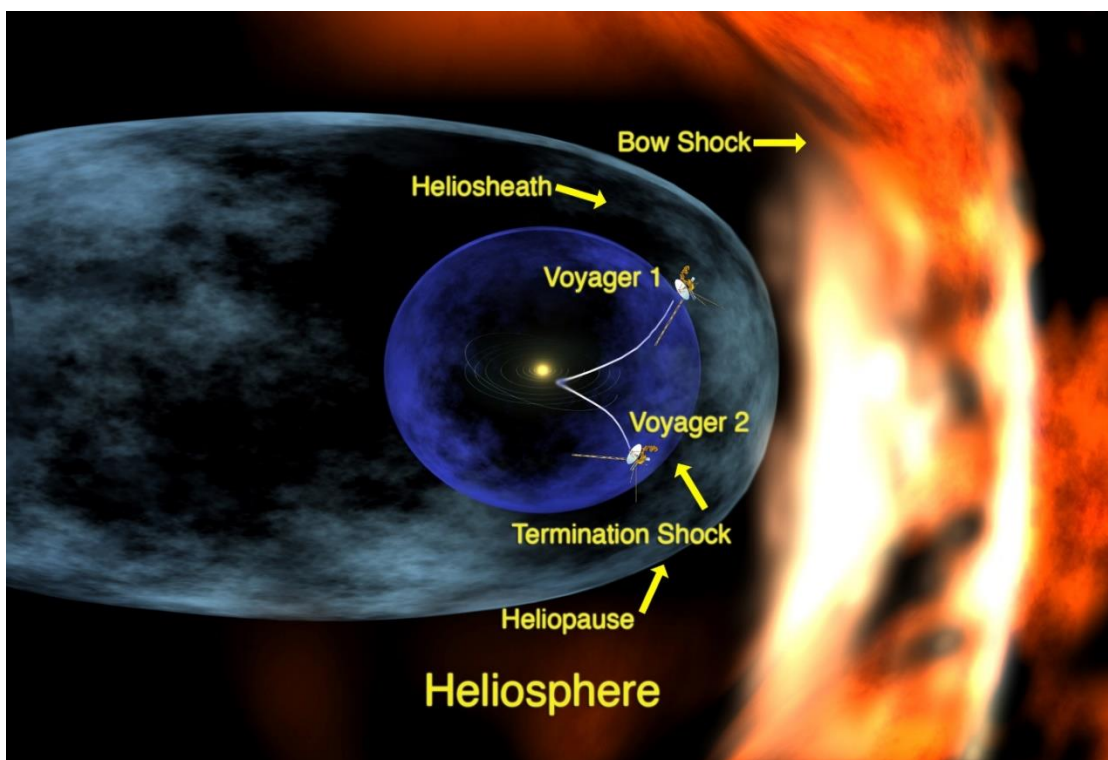
(Πηγή: <http://cosray.phys.uoa.gr>)

1.6.4. 27ήμερη Μεταβολή

Η περιστροφή του Ήλιου γύρω από τον άξονά του έχει διάρκεια 27 ημέρες (αριθμός περιστροφής Bartel) και ως επόμενο προκαλεί μία αντίστοιχη 27-ήμερη διαμόρφωση στην κοσμική ακτινοβολία (Mavromichalaki et al., 2016). Ο αριθμός περιστροφής του Bartels είναι ένας σειριακός αριθμός που αριθμεί τις φαινομενικές περιστροφές του Ήλιου όπως φαίνεται από τη Γη και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση ορισμένων επαναλαμβανόμενων ή μεταβαλλόμενων προτύπων ηλιακής δραστηριότητας. Για το σκοπό αυτό, κάθε περιστροφή έχει διάρκεια ακριβώς 27 ημερών και συνδέεται άμεσα με την επανάληψη των ηλιακών και γεωφυσικών παραμέτρων. Το ηλιακό μαγνητικό πεδίο δεν είναι ιδανικό. Προσεγγίζεται από ένα μοντέλο που ταιριάζει περισσότερο σε ένα μη ιδανικό μαγνητικό πεδίο με άξονα περιστροφής που δεν συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής του ήλιου. Οι αντίθετης πολικότητας μαγνητικές γραμμές του διαχωρίζονται από τον ηλιοσφαιρικό μανδύα (λεπτό στρώμα κατά μήκος του ηλιακού ισημερινού του μαγνητικού πεδίου). Ο μανδύας αυτός περιστρέφεται μαζί με τον ήλιο με περίοδο κατά μέσο όρο 27 ημέρες η οποία διαφέρει για κάθε ηλιογραφικό πλάτος. Ηλιόσφαιρα είναι μια εκτεταμένη περιοχή που κυριαρχείται από τη ροή του ηλιακού

ανέμου (δηλαδή σωματιδίων υψηλής ενέργειας). Περιλαμβάνει το ηλιακό μας σύστημα και εκτείνεται σε αποστάσεις έως και 120 φορές μεγαλύτερες της απόστασης Γης-Ήλιου. Πρόκειται για μια δομή συμμετρική, σχεδόν σφαιρική, η οποία αλληλεπιδρά με το μεγάλης κλίμακας μεσοαστρικό μαγνητικό πεδίο. Οι επιστήμονες αποδεικνύουν ότι οι μεταβολές του ηλιακού ανέμου εκτείνονται έως τα όρια της ηλιόσφαιρας κατά τη διάρκεια του 11ετούς ηλιακού κύκλου και δείχνουν πως η ηλιόσφαιρα αλληλεπιδρά με το μεσοαστρικό αέριο, ως μία διαμαγνητική «φυσαλίδα» πλάσματος (Krimigis et al., 2019).

Σε αυτό το χρονικό διάστημα των 27 ημερών, η Γη όπως είναι λογικό δεν βρίσκεται σε μια σταθερή θέση σε σχέση με τον μανδύα. Άλλοτε βρίσκεται πάνω και άλλοτε κάτω από τον ηλιοσφαιρικό μανδύα. Έτσι ο κάθε παρατηρητής, που βρίσκεται στο ίδιο ημισφαίριο της Γης να παρατηρεί 4 φορές αλλαγή στην πολικότητα του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου καθώς αυτό περιστρέφεται με τον Ήλιο.



Εικόνα 1.12: Διάγραμμα της ηλίοσφαιρας καθώς ταξιδεύει μέσα από το διαστρικό μέσο.

(Πηγή: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2008/09/The_heliosphere)

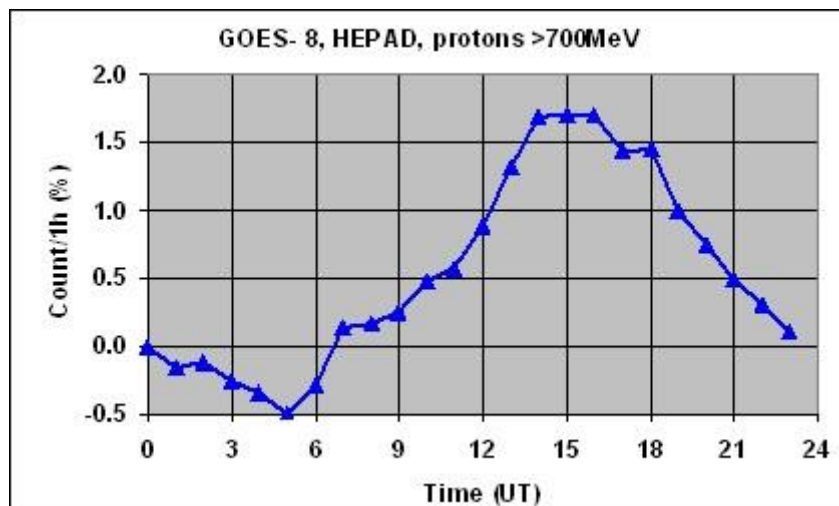
1.6.5. Ημερήσια Ανισοτροπία

Η ημερήσια διαμόρφωση των κοσμικών ακτίνων είναι μία βραχύχρονη ανισότροπη μεταβολή, τοπικού χρόνου, με περίοδο 24 ώρες δηλαδή όσο διαρκεί μια περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της. Καθώς η Γη περιστρέφεται, περιστρέφεται μαζί της και ο κώνος υποδοχής κάθε περιοχής πάνω στην επιφάνεια της γης όπου μπορεί να βρίσκεται ένας σταθμός καταγραφής κοσμικής ακτινοβολίας όπως αυτός της Αθήνας. Ο λόγος που εμφανίζεται αυτή η μεταβολή είναι πολύπλοκος και οφείλεται σε φαινόμενα που έχουν την βάση τους στη θεωρία μεταφοράς και διάχυσης.

Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αναπαρίσταται με μία ημιτονοειδή συνάρτηση περιόδου 24 ωρών. Κύρια χαρακτηριστικά της ημερήσιας ανισοτροπίας αποτελούν το πλάτος (η μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή της έντασης μέσα σε μία ημέρα) και η φάση (η ώρα της ημέρας που παρατηρήθηκε το μέγιστο πλάτος).

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα έχει σημειωθεί η ύπαρξη ενός μεγίστου στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας τις πρώτες απογευματινές ώρες. Πρόκειται για μεταβολή με περιοδικότητα 24 ωρών και αποτελεί φαινόμενο τοπικού χρόνου. Η ανισοτροπία των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, που προκαλούν και την ημερήσια μεταβολή στη Γη, έχει μεταβλητό χαρακτήρα και συσχετίζεται με τον 11-ετή κύκλο. Το μέσο πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας είναι 0.4%, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να φτάσει και το 1.5%. Η διεύθυνση της μέγιστης έντασης είναι η 18:00hr ως προς τη γραμμή Γης- Ήλιου (Μαυρομιχαλάκη 2005). Η θεωρία μεταφοράς- διάχυσης όπως έχει επεκταθεί σήμερα και στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες δίνει μια ικανοποιητική εξήγηση στις μεταβολές και στην ποικιλία των χρόνων της μέγιστης έντασης της αυξημένης ημερήσιας ανισοτροπίας.

Οφείλεται σε ασυμμετρίες χώρου, ανεξάρτητα της γήινης ατμόσφαιρας και του γεωμαγνητικού πεδίου (Nagashima 1971).



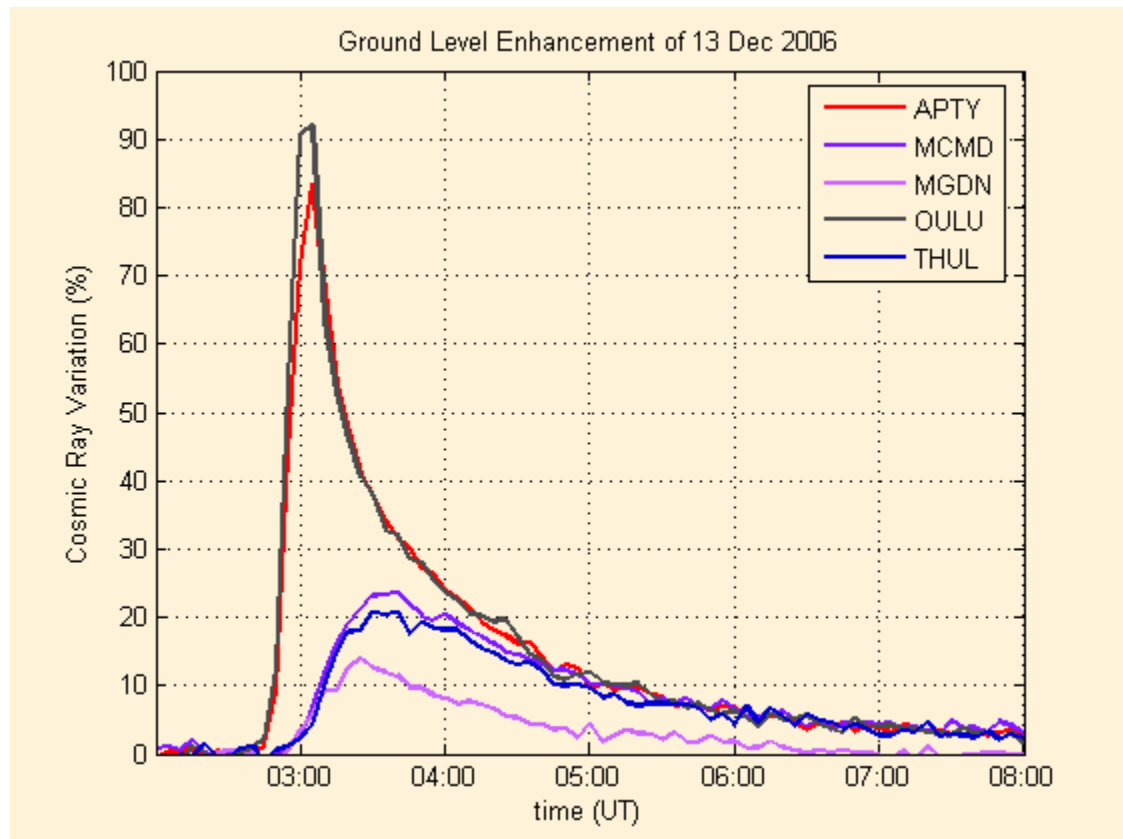
Εικόνα 1.13: Βραχυπρόθεσμη και ημερήσια μεταβολή ροής πρωτονίων κατά την διάρκεια της πτήσης του BESS-Polar I balloon (T.Hams et al., 31st ICRC).

(Πηγή: https://www.researchgate.net/scientific-contributions/35511034_T_Hams)

1.6.6. Επίγεια Επαύξηση της Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement – GLE) είναι μία κατακόρυφη αύξηση στο ρυθμό καταμέτρησης των καταγραφόμενων σωματιδίων από τους επίγειους ανιχνευτές εξαιτίας της άφιξης σχετικιστικών σωματιδίων που κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες και προέρχονται από τον Ήλιο (Plainaki et al., 2007). Οφείλεται κυρίως σε ηλιακές εκλάμψεις όπου η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να αυξηθεί 100% και πάνω (Usoskin and Mursula, 2003). Πρόκειται για γεγονότα πολύ μικρής διάρκειας και είναι πολύ σπάνια η εμφάνισή τους. Η ένταση επιστρέφει στα κανονικά επίπεδα μέσα σε δέκατα του λεπτού έως και μέσα σε μερικές μέρες, όταν πλέον η διαδικασία επιτάχυνσης των σωματιδίων θα έχει σταματήσει και αυτά θα έχουν διασκορπιστεί στο διαπλανητικό χώρο. Χαρακτηρίζονται από υψηλή επικινδυνότητα τόσο για την τεχνολογία (π.χ. δορυφόροι, μετασχηματιστές σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας κτλ.) όσο για τον άνθρωπο και τα έμβια ζώα γενικότερα (π.χ. αστροναύτες, πληρώματα αεροσκαφών, καρδιακές αρρυθμίες κ.ά.). Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε πόσο σημαντική είναι η έγκαιρη πρόβλεψή τους. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε την σπουδαιότητα του GLE-Alert, μια υπηρεσία που μας δίνει την δυνατότητα πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο και παρέχεται και από τον Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας (Mavromichalaki et al., 2007, 2010; Souvatzoglou 2014).

Επειδή τα ηλιακά σωματίδια έχουν ενέργειες μέχρι το πολύ 1 GeV, τέτοια γεγονότα δεν είναι παρατηρήσιμα από σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας που βρίσκονται σε μικρά ή μεσαία γεωγραφικά πλάτη όπως κοντά στον ισημερινό ή της Αθήνας. Τα σωματίδια αυτά με τις χαμηλές ενέργειες δεν μπορούν να διασχίσουν το γεωμαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, αυτά τα γεγονότα είναι ανιχνεύσιμα από τους μετρητές νετρονίων σε πολικούς σταθμούς.



Εικόνα 1.14: GLE70 (13 Δεκεμβρίου 2006) όπως καταγράφηκε από το παγκόσμιο δίκτυο σταθμών μετρητών νετρονίων.

(Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/228818985_Application_of_the_NM-BANGLE_model_to_GLE70)

1.7. Μαγνητική Δυσκαμψία

Η μαγνητική δυσκαμψία R (Rigidity) είναι ένα μέγεθος που είναι χαρακτηριστικό για κάθε μετρητή νετρονίων και καθορίζει την τροχιά που διαγράφει ένα φορτισμένο σωματίδιο καθώς εισέρχεται στο γήινο μαγνητικό πεδίο και φτάνει στο έδαφος ώστε να γίνει ανιχνεύσιμο από τους επίγειους μετρητές. Η μαγνητική δυσκαμψία ισούται με τον λόγο της σχετικιστικής ορμής του σωματιδίου p επί της ταχύτητας του φωτός c , προς το φορτίο του Ze :

$$R = \frac{cp}{Ze}$$

ή αλλιώς, γράφοντας τις ενέργειες των σωματιδίων σαν συνάρτηση της κινητικής τους ενέργειας ανά νουκλεόνιο:

$$R = \left(\frac{A}{Z}\right)\left(\frac{m_{\mu} c}{e}\right)$$

Από την τελευταία σχέση μπορούμε να εξάγουμε μερικά συμπεράσματα.

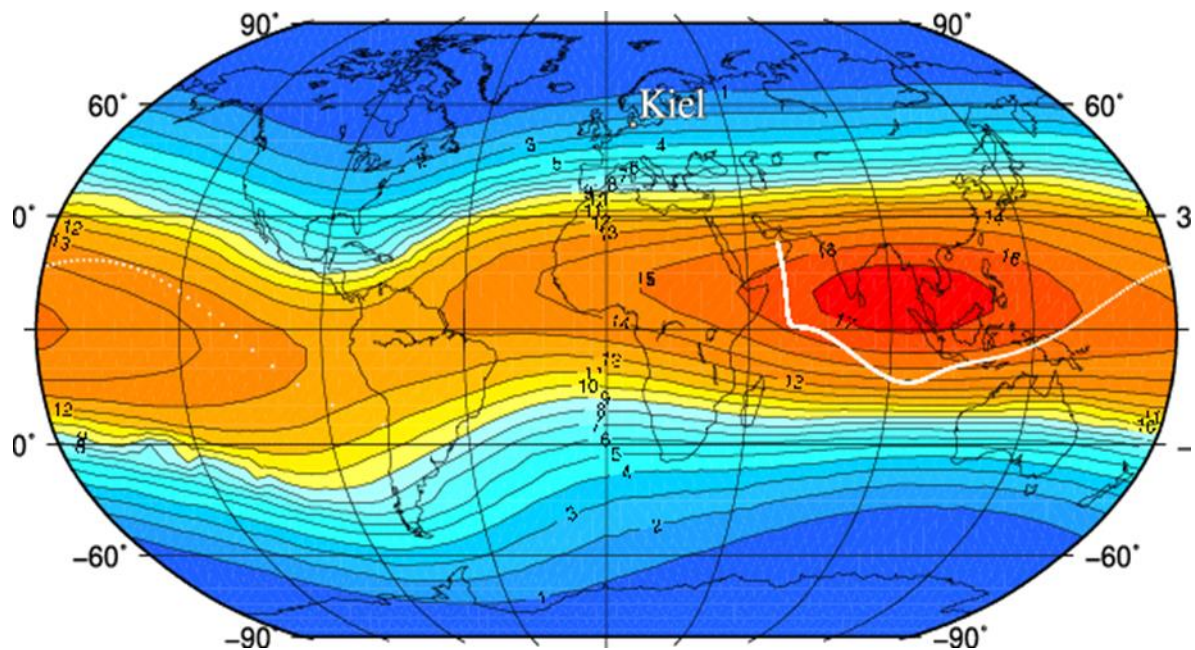
Σωματίδια με ίδια μαγνητική δυσκαμψία αλλά διαφορετική μάζα και φορτίο συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου.

Σωματίδια με την ίδια κινητική ενέργεια, η μαγνητική δυσκαμψία θα παρουσιάζει εξάρτηση μόνο από το λόγο A/Z , όπου A και Z ο μαζικός και ατομικός αριθμός του στοιχείου αντίστοιχα. Γνωρίζουμε ότι για όλα τα στοιχεία μέχρι τον σίδηρο Fe, ο λόγος A/Z είναι ~ 2 , οπότε αυτά τα στοιχεία αυτά θα εμφανίσουν παρόμοια συμπεριφορά όταν κινούνται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης και οπότε θα διακρίνονται από το ίδιο ενεργειακό φάσμα.

Όταν η ενέργεια των μετρούμενων φορτισμένων σωματιδίων γίνει μεγαλύτερη από την ενέργεια (μάζα) ηρεμίας των σωματιδίων, η κινητική τους ενέργεια ταυτίζεται σε αριθμό με την μαγνητική δυσκαμψία.

Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής δυσκαμψίας είναι gigavolts (GV).

Τώρα μπορούμε να ορίσουμε το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας (R_c) που εκφράζει την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται να έχει ένα πρωτογενές σωματίδιο της κοσμικής ακτινοβολίας για να μπορεί να φτάσει μέχρι το έδαφος και να μπορεί να καταγραφεί από επίγειους μετρητές. Είναι χαρακτηριστικό του κάθε τόπου και η τιμή του κυμαίνεται από **0** στους γεωγραφικούς πόλους **μέχρι 15 GV** για τις περιοχές πλησίον του γήινου ισημερινού. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στη φύση του μαγνητικού πεδίου της Γης που φαίνεται να είναι πιο «ανοιχτό» στους πόλους. Γι' αυτό τον λόγο ένας σταθμός που βρίσκεται στις περιοχές των πόλων και μετράει κοσμική ακτινοβολία με πολύ μικρές ενέργειες (που έχουν συνήθως τα ηλιακά σωματίδια) που δεν μπορεί να φτάσει σε περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, όπως ο ισημερινός.

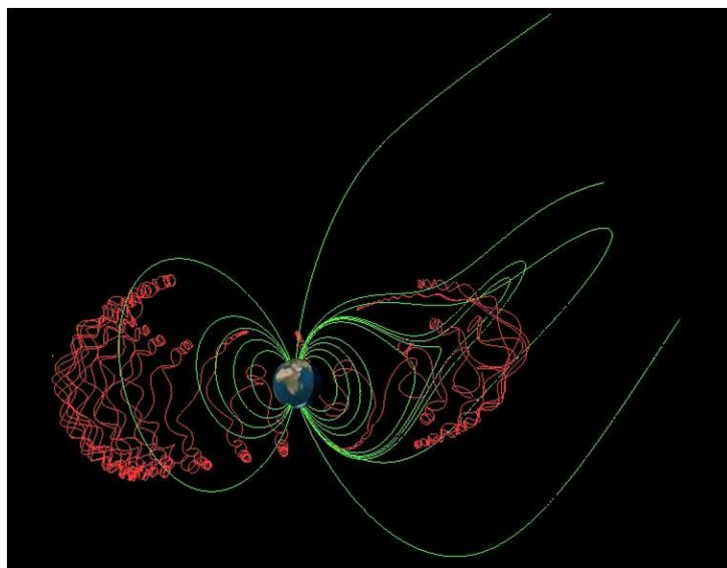


Εικόνα 1.15: Χάρτης του πλανήτη που δείχνει την κατακόρυφη ακαμψία σε GV. Επίσης παρουσιάζονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις του μετρητή νετρονίων στο παρατηρητήριο Kiel για πρωτόνια με ακαμψία < 20 GV. Οι υπολογισμοί ακαμψίας και αποκοπής έχουν πραγματοποιηθεί με το πρόγραμμα MAGNETOCOSMICS.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/23781970>)

Ως ασυμπτωτική διεύθυνση υποδοχής των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας ονομάζουμε την κατεύθυνση προς την οποία κινούνται αυτά πριν η τροχιά τους μεταβληθεί λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου της Γης. Η κάθε περιοχή, στην οποία βρίσκεται ένας επίγειος μετρητής, έχει μία μοναδική γι' αυτόν διεύθυνση θέασης στο διάστημα και εξαρτάται από την ενέργεια. Οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις ακολουθούν ως είναι φυσικό την περιστροφή της Γης. Υπολογίζονται με αρκετή ακρίβεια με χρήση μοντέλων όπως το PLANETOCOSMICS που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Βέρνης. Τα περισσότερα μοντέλα έτσι κι αυτό υπολογίζουν κατά προσέγγιση την κατεύθυνση ενός σωματιδίου της κοσμικής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία όπου και ανιχνεύεται. Όταν, λοιπόν, γνωρίζουμε το γεωγραφικό μέρος και την γωνία πρόσπτωσης του σωματιδίου τότε η τροχιά του στο μαγνητικό πεδίο της Γης θα είναι συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας του τόπου. Οπότε τώρα μπορούμε να ορίσουμε τον ασυμπτωτικό κώνο υποδοχής του εκάστοτε επίγειου ανιχνευτή ως την στερεά γωνία που καταφθάνει η πλειοψηφία των εισερχόμενων σωματιδίων. Ο

ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής εκφράζει τις ενέργειες ανά νουκλεόνιο που έχουν την δυνατότητα να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης και να καταγραφούν. Έχει υπολογιστεί για κάθε σταθμό νετρονίων και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος για τον καθένα (Miroshnichenko, 2015). Επίσης, ισχυρή επιρροή ασκεί σε αυτό το μέγεθος το γήινο μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 1.16: Εφαρμογή Magnetocosmics Geant4 για την διάδοση των κοσμικών ακτίνων στη μαγνητόσφαιρα της Γης. Οπτικοποίηση και υπολογισμός του κατωφλίου δυσκαμψίας.

(Πηγή: <https://www-public.slac.stanford.edu/geant4/G4SUWS2010/index.htm>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

Τρόποι ανίχνευσης της κοσμικής ακτινοβολίας-Μετρητές νετρονίων

2.1. Εισαγωγή

Η κοσμική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα ενεργειών. Για την ανίχνευσή της χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ανιχνευτών, όπως διαστημικοί ανιχνευτές (PAMELA, SOHO), ανιχνευτές σε μπαλόνια (ANITA), ανιχνευτές εκτεταμένων καταιγισμών (PIERRE AUGER OBSERVATORY), τηλεσκόπια μιονίων (GRAPES-3), ανιχνευτές ακτινοβολίας Cherenkov (CANGAROO, H.E.S.S., MAGIC, VERITAS), ανιχνευτές ακτίνων γ (GLAST) και επίγειοι μετρητές νετρονίων. Για την ανίχνευση χαμηλών ενεργειών, λόγω μεγάλης ροής, ένας μικρός ανιχνευτής προσαρμοσμένος σε ένα μπαλόνι ή διαστημόπλοιο στα όρια της ατμόσφαιρας είναι ικανοποιητικός, ενώ για μεγαλύτερες ενέργειες χρειάζονται επίγειοι ανιχνευτές μεγαλύτερων διαστάσεων.

Η λέξη κλειδί στην ανίχνευση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ο ιονισμός. Όταν ένα σωματίο της κοσμικής ακτινοβολίας προσπίπτει σε ένα άτομο του υλικού του ανιχνευτή τότε προκαλείται ελαστική (αλληλεπίδραση με τον πυρήνα του ατόμου) ή ανελαστική σκέδαση (αλληλεπίδραση με τα τροχιακά ηλεκτρόνια). Ακόμα μπορεί να προκαλέσει την εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov, ακτινοβολίας μετάβασης (transition radiation), πυρηνικές αντιδράσεις μεταξύ του σωματίου της κοσμικής ακτινοβολίας και των πυρήνων του ανιχνευτή καθώς και εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης.

Οι επίγειοι ανιχνευτές διαχωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τη συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας που ανιχνεύουν και καταμετρούν. Για την ανίχνευση της νουκλεονικής συνιστώσας χρησιμοποιούνται κυρίως οι μετρητές νετρονίων, ενώ για την ανίχνευση της μεσονικής συνιστώσας χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές μιονίων (επίγειοι ή υπόγειοι). Τέλος για την ανίχνευση της μαλακής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές Cherenkov.



Εικόνα 2.1: Ο μετρητής νετρονίων (τύπου 3NM-64) που βρίσκεται στον τομέα της πυρηνικής φυσικής του πανεπιστήμιου Αθηνών.

(Πηγή: <http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/physics/athens-neutron-monitor>)

2.2. Μετρητής νετρονίων

Ο μετρητής νετρονίων είναι ο πιο οικονομικός και συνάμα ο πιο αξιόπιστος τρόπος για να ανιχνεύσουμε την κοσμική ακτινοβολία. Τοποθετούνται στο έδαφος (εύκολη πρόσβαση) όπου και καλύπτουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια σε σχέση με άλλες συσκευές ανίχνευσης. Είναι εξαιρετικά σταθεροί ανιχνευτές και έχουν πολύ μεγάλο χρόνο ζωής. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργό διατομή και μπορούν να ανιχνεύουν σωματίδια με μεγάλο εύρος ενεργειών χωρίς να επηρεάζονται από έντονα ηλιακά φαινόμενα. Έχουν μεγάλο ρυθμό καταγραφής σωματιδίων (δυνατότητα καταγραφής ακόμα και μικρών μεταβολών στην ένταση) και τα δεδομένα τους είναι άμεσα διαθέσιμα για επεξεργασία.

Για τους παραπάνω λόγους γίνεται αντιληπτό ότι οι μετρητές νετρονίων είναι τα κυριότερα όργανα ανίχνευσης και έρευνας της κοσμικής ακτινοβολίας, ιδίως στη χαμηλή GeV περιοχή και είναι οι μόνοι μετρητές που έχουμε συνεχόμενες μετρήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας από το 1956 έως και σήμερα. Το ενεργειακό φάσμα που καλύπτουν είναι ευρύ και εκτείνεται από την ηλιακή κοσμική ακτινοβολία μέχρι την ηλιακή διαμόρφωση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (0,5-20GeV).

Οι μετρητές νετρονίων αποτελούνται από:

- 1) ειδικούς αναλογικούς μετρητές αερίου
- 2) περιβάλλονται από έναν επιβραδυντή

- 3) έναν παραγωγό (μόλυβδος)
- 4) τον ανακλαστήρα

Τα προσπίπτοντα πρωτόνια και νετρόνια της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις στον μόλυβδο. Αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η παραγωγή νετρονίων πολύ πιο χαμηλής ενέργειας από ότι τα αρχικά (ενέργειες της τάξης των MeV). Στη συνέχεια αυτά επιβραδύνονται σε θερμικές ενέργειες από τον επιβραδυντή και στους μετρητές τύπου NM64 και τελικά καταγράφεται ένα μικρό μόνο ποσοστό αυτών (~ 6%) από τον αναλογικό μετρητή. Έτσι ονομάστηκε μετρητής νετρονίων.

2.2.1. Αναλογικός μετρητής αερίου

Σε έναν μετρητή νετρονίων ανιχνεύονται κυρίως τα θερμικά νετρόνια, δηλαδή αυτά που χαρακτηρίζονται από χαμηλή κινητική ενέργεια, της τάξης των 10^{-2} eV. Στον μετρητή νετρονίου τύπου NM64, χρησιμοποιείται το αέριο τριφθοριούχο βόριο (BF_3), εμπλουτισμένο κατά 96% με το ισότοπο ^{10}B και με πίεση 0.27 bar. Πλέον, από το 1990, χρησιμοποιείται το αέριο ^3He το οποίο και υπερτερεί σε σχέση με το BF_3 ως προς την ανίχνευση καθώς μας δίνει την δυνατότητα να επιτύχουμε μεγαλύτερη απόδοση ανά μονάδα όγκου.

Τα θερμικά νετρόνια αλληλεπιδρούν εξώθερμα με τον πυρήνα του βορίου και παράγονται πυρήνες λιθίου και ηλίου οι οποίοι και ανιχνεύονται από τον ιονισμό τους από το αέριο των μετρητών.

Ο μετρητής είναι αναλογικός και λειτουργεί σε τάση 2800V(BF_3) ή μικρότερη των 1500V(^3H), για τον NM64.

2.2.2. Επιβραδυντής

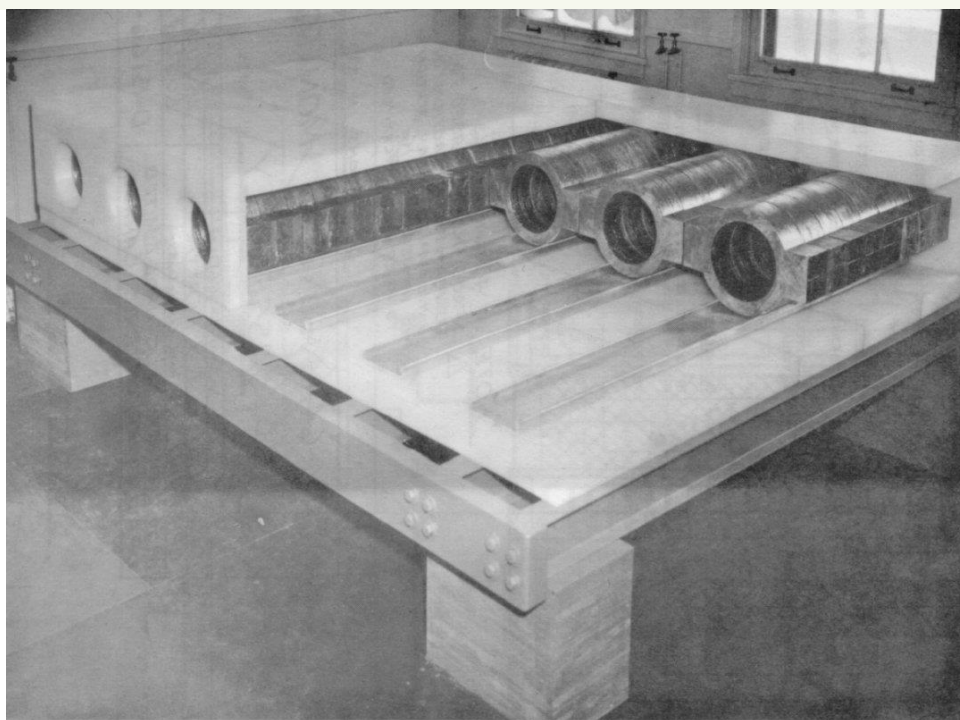
Τα εισερχόμενα νετρόνια πρέπει να επιβραδυνθούν στις θερμικές ενέργειες για να αυξηθεί η πιθανότητα αντίδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται με υλικά όπως η παραφίνη (για τον NM64) όπου είναι υλικά με μικρό ατομικό αριθμό και περιέχουν υδρογόνου ώστε η ανταλλαγή ενεργειών μεταξύ του πυρήνα του υδρογόνου και των θερμικών νετρονίων να είναι πιο αποτελεσματική, λόγω παρόμοιων μαζών.

2.2.3. Παραγωγός σωματίων (Μόλυβδος)

Ο επιβραδυντής περιβάλλεται από μόλυβδο (Pb) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή σωματιδίων. Ο μόλυβδος επιλέγεται ως παραγωγός σωματίων λόγω του

μεγάλου ατομικού αριθμού A που τον χαρακτηρίζει καθώς και για την μικρή ενεργό διατομή απορρόφησης για τα νετρόνια στην περιοχή των θερμικών ενεργειών. Η πιθανότητα ένα νουκλεόνιο (πρωτόνιο ή νετρόνιο) κοσμικών ακτίνων που πέφτει στον μετρητή νετρονίων να αλληλεπιδράσει με ένα πυρήνα του μολύβδου είναι 50%. Όταν ένα νουκλεόνιο προσπίπτει στον μολύβδο προκαλώντας του πυρηνικές αντιδράσεις τότε παράγονται κατά μέσο όρο 15 νετρόνια («εξάτμισης»), αυξάνοντας την πιθανότητα ανίχνευσης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο μέσος ρυθμός καταμέτρησης ενός μετρητή νετρονίων τύπου NM64 με 6 αναλογικούς μετρητές αερίου BF_3 είναι από 50 μέχρι 70 cts/sec, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται ο μετρητής (περισσότερες μετρήσεις σε μικρά γεωγραφικά πλάτη λόγω της μορφής που έχει το γήινο μαγνητικό πεδίο).



Εικόνα 2.2: Μετρητής νετρονίων τύπου NM64 χωρίς μετρητές. Φαίνονται οι δακτύλιοι μολύβδου και ο ανακλαστήρας πολυαιθυλενίου.

(Πηγή: http://www.nmdb.eu/public_outreach/gr/04_nm/)

2.2.4. Ανακλαστήρας

Στον μετρητή νετρονίων τύπου NM64, το σύνολο των αναλογικών μετρητών, του επιβραδυντή και του παραγωγού σωματίων περιβάλλεται από πολυαιθυλένιο. Με αυτόν

τον τρόπο προκαλείται επιβράδυνση και ανάκλαση στα νετρόνια που παράγονται στον μόνυβδο μέσα στους μετρητές. Ακόμα, το υλικό που χρησιμοποιείται ως ανακλαστήρας απορροφά τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας που παράγονται στον περιβάλλοντα χώρο εκτός του μετρητή νετρονίων κι έτσι αποτρέπεται η επιρροή τους στον ρυθμό καταμέτρησης του μετρητή.

2.3. Ο σταθμός του Πανεπιστημίου Αθηνών και πρόγνωση του Διαστημικού καιρού

Ο σταθμός αυτός στεγάζεται στην οροφή του κτιρίου Φυσικής στην πανεπιστημιούπολη του ΕΚΠΑ, σε δωμάτιο που έχει υποστεί την κατάλληλη διαμόρφωση. Βρίσκεται σε λειτουργία από το 2000 και είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για επιστημονικούς και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, αφού είναι ο μοναδικός στην περιοχή των Βαλκανίων και στο ανατολικό τμήμα της Μεσογείου. Έγινε ο τέταρτος σε σειρά σταθμός στο παγκόσμιο δίκτυο παρακολούθησης νετρονίων (NMDB) μέσω του οποίου παρέχονται διαδικτυακά δεδομένα μεγάλης ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο (real-time) και με ανάλυση έως και 1 δευτερόλεπτο. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εύκολη η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων.

Βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $37^{\circ}58'N$, σε γεωγραφικό μήκος $23^{\circ}47'E$ και σε υψόμετρο 260 μέτρα και ατμοσφαιρική πίεση 968mbar. Το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού είναι 8,53GV.

Ο μετρητής νετρονίων που λειτουργεί στο Πανεπιστήμιο Αθηνών είναι τύπου Super 6NM-64. Αποτελείται από έξι αναλογικούς μετρητές BF_3 , εμπλουτισμένου με το ισότοπο ^{10}B (τύπου BP28) και έχει μια διατομή δέσμευσης νετρονίων αντιστρόφως ανάλογη με την ένταση του. Με κατάλληλη ρύθμιση στο κατώφλι ανίχνευσης του παλμού, μπορούμε να απομονώσουμε μόνο του παλμούς από τα $4He^{++}$ αποκόπτοντας τις παρεμβολές από μικρότερους ιονισμούς του αερίου του αναλογικού μετρητή.

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τον μετρητή νετρονίων, αφού υποστούν τις κατάλληλες διορθώσεις (με χρήση αλγορίθμων), παρέχονται διαδικτυακά ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται από την ομάδα Κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας για περαιτέρω μελέτη της διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και πρόβλεψης του διαστημικού καιρού.

Ο διαστημικός καιρός αποτελεί το σύνολο της ηλιακής δραστηριότητας (ηλιακός άνεμος, κηλίδες, καταιγίδες, εκλάμψεις, προεξοχές, στεμματικές εκτινάξεις ηλιακής μάζας) που επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα την ζωή στην Γη, καθώς και την λειτουργία των επίγειων και διαστημικών τεχνολογικών συστημάτων (συσκευές πληροφόρησης και

επικοινωνίας, λειτουργία δορυφόρων, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, ναυσιπλοία κλπ).

Ο σταθμός της Αθήνας έχει την δυνατότητα να εκτιμήσει το όριο της ενέργειας των σωματιδίων στα μεγάλα πρωτονικά γεγονότα (SEP), που σχετίζονται άμεσα με τον διαστημικό καιρό. Συχνά το άνω όριο της ενέργειας αυτών των σωματιδίων που επιταχύνεται στον Ήλιο είναι μεταξύ 5-10 GeV. Η ενέργεια αυτή είναι πολύ κοντά στην ελάχιστη ενέργεια των σωματιδίων που καταγράφονται στην Αθήνα (8,53GV). Ακόμα, ο σταθμός είναι κατάλληλος για τη μελέτη των μαγνητοσφαιρικών επιδράσεων (από τον Νοέμβριο του 2003) καθώς και για την καταγραφή και μελέτη των απότομων αυξήσεων των ηλιακών νετρονίων. Τέλος, τα δεδομένα του είναι πολύ χρήσιμα σε άλλους σταθμούς για την διόρθωση των μετρήσεων τους.

2.4. Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων: έρευνα και εφαρμογές

Οι μετρητές νετρονίων είναι τα πιο αξιόπιστα όργανα μέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας και είναι τοποθετημένα σε διαφορετικά μήκη και πλάτη πάνω στη Γη. Διακρίνονται από υψηλό ρυθμός καταμέτρησης, συγκριτικά με τους ανιχνευτές στο διάστημα, παρέχοντας την δυνατότητα να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε πολλές μικρές και βραχυπρόθεσμες αλλαγές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (~0.5%). Ακόμα, μένουν ανεπηρέαστοι από έντονες εκρήξεις ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (SEP), Είναι αξιόπιστοι μακροχρόνια και η μας δίνουν την δυνατότητα της αυτόματης απόκτησης των δεδομένων.

Κάθε μετρητής νετρονίων του δικτύου χαρακτηρίζεται από ένα κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας που του επιτρέπει να καταμετρά πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία με ενέργεια πάνω αυτό το κατώφλι, ερχόμενη από ορισμένες διευθύνσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο μετρητών νετρονίων παρέχουν την δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών από τα δεδομένα τους (ενεργειακό φάσμα, διευθύνσεις διάδοσης των πρωτογενών σωματιδίων). Πολύ σημαντική εφαρμογή είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης των μετρητών για την πρόγνωση του διαστημικού καιρού, λόγω της ύπαρξης βάσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (δίκτυο NMDB).

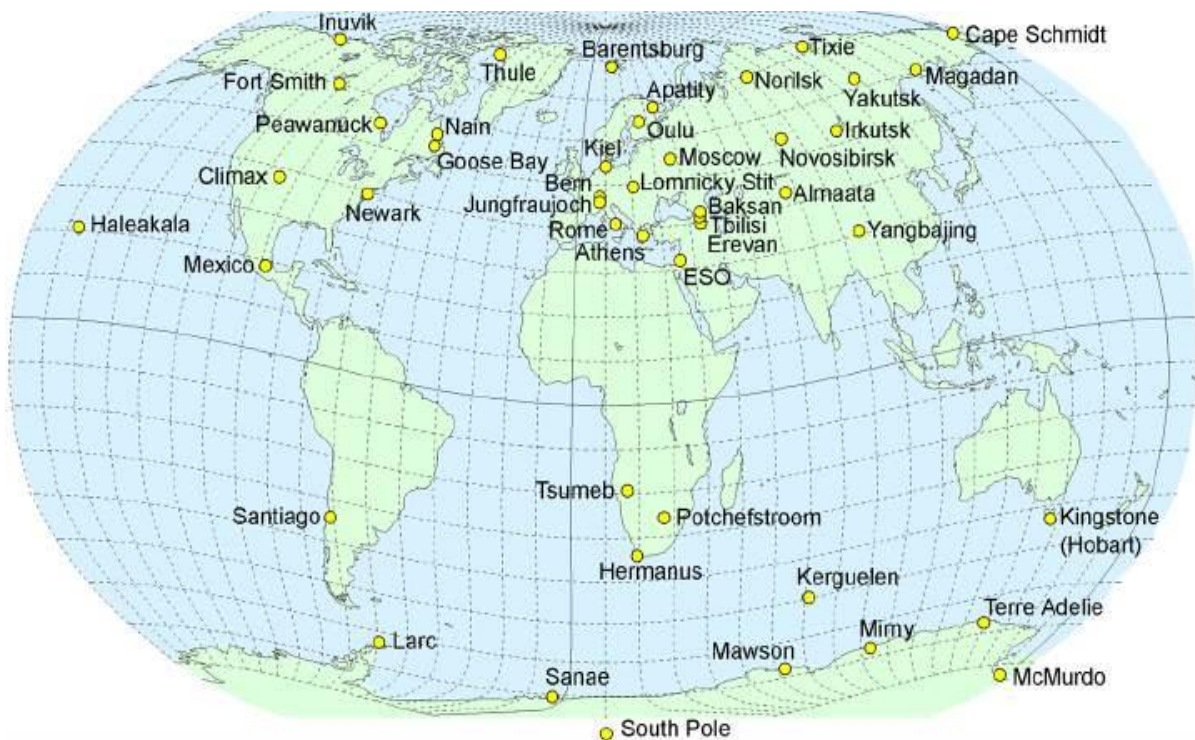
Από το τρέχον πρόγραμμα NMDB καταλαβαίνουμε πόσο σημαντικά είναι τα δεδομένα σε τεχνολογία «real-time» από τους μετρητές νετρονίων. Μέσα στο πρόγραμμα αυτό, αναπτύσσεται ένα προειδοποιητικό σύστημα κάνοντας χρήση των δεδομένων από τουλάχιστον 3 μετρητές νετρονίων σε υψηλά πλάτη, λόγω του ότι έχουν μεγάλη

ευαισθησία στην ανίχνευση εξαιτίας του χαμηλού κατωφλίου δυσκαμψίας. Στη συνέχεια, τα συνδυάζουμε με τα δεδομένα που παίρνουμε από τους δορυφόρους ανίχνευσης μαλακών ακτίνων-X και ελέγχουμε αν είναι σε εξέλιξη κάποια έκλαμψη. Από την στιγμή που ο ρυθμός καταμέτρησης σε κάποιον από τους μετρητές περάσει τον μέσο ρυθμό για αλληπάλληλες μετρήσεις διάρκειας ενός λεπτού, τότε από τον σταθμό δίνεται ειδοποίηση Alert. Για να έχουμε μια επίγεια επαύξηση (GLE) θα πρέπει το λιγότερο 3 σταθμοί να είναι στην κατάσταση Alert αλλά θα πρέπει να έχουμε και ειδοποίηση, από την δορυφορική ανίχνευση των ακτίνων-X, ότι μια έκλαμψη ξεκινάει.

Το 1997 ήταν η πρώτη φορά που δεδομένα μετρητών νετρονίων, από τον σταθμό της Μόσχας, παρουσιάστηκαν στο διαδίκτυο σε τεχνολογία «real-time». Αυτό σηματοδότησε μια νέα εποχή συλλογής, επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων σε πραγματικό, αυτή τη φορά, χρόνο.

Σήμερα, το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων (NMDB) αποτελείται από 50 μετρητές με την πλειοψηφία των σταθμών (~30) να διαθέτουν τα δεδομένα τους διαδικτυακά σε τεχνολογία «real-time». Από το 2008, λειτουργεί η βάση δεδομένων υψηλής ανάλυσης και πραγματικού χρόνου Neutron Monitor DataBase, με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η χρήση όλων των σταθμών ως έναν ανιχνευτή πολλαπλών κατευθύνσεων έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση κατά πολύ την ακρίβεια (< 0.1%), για δεδομένα που συλλέγουμε σε χρονικό διάστημα 60 λεπτών, συγκρινόμενο με ένα απλό όργανο. Η ανάπτυξη αυτής της βάσης συνετέλεσε στη δημιουργία μιας ψηφιακής αποθήκης δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανά πάσα στιγμή προς ανάλυση και επεξεργασία.

Στο μέλλον τα δεδομένα από την βάση της κοσμικής ακτινοβολίας θα συσχετιστούν και θα ενσωματωθούν με επιστημονικά δεδομένα από άλλα δίκτυα π.χ. δίκτυα τηλεσκοπίων μιονίων.



Εικόνα 2.3: Χάρτης κατανομής των μετρητών νετρονίων σε όλη τη Γη.

(Πηγή: http://www.nmdb.eu/public_outreach/gr/06/)

2.5. Δίκτυα μετρητών νετρονίων και συναγερμοί διαστημικού καιρού

Η χρησιμότητα των δικτύων των μετρητών νετρονίων, πέρα από την εξαγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων επιστημονικών πληροφοριών από τις μετρήσεις τους, είναι απαραίτητα για την πρόγνωση του διαστημικού καιρού, αφού συνδέονται τα δεδομένα των μετρητών νετρονίων με τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια ή τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας του Ηλίου, που έχουν ως προορισμό τους την Γη.

Σε υψηλά πλάτη είναι απαραίτητη η ύπαρξη του δικτύου για την μέτρηση ανισοτροπιών που σχετίζονται άμεσα με παροδικά γεγονότα κοσμικών ακτίνων, όπως γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (SEP) ή γεγονότα μείωσης Forbush. Οι σταθμοί που βρίσκονται σε συγκρίσιμα γεωμαγνητικά πλάτη, το κατώφλι δυσκαμψίας τους θα είναι παρόμοιο και όποια διαφορά παρουσιάζουν στον ρυθμό καταμέτρησης θα οφείλεται στην διαφορετική διεύθυνση άφιξης των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων.

Ο εξοπλισμός των δορυφόρων, των διαστημοπλοίων καθώς και οι επίγειες εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ρεύματος και ραδιοεπικοινωνιών επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την αυξημένη ροή των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (solar energetic particles-SEP). Με την ραγδαία ανάπτυξη της διαστημικής, φαίνεται περισσότερο η αναγκαιότητα της δημιουργίας εργαλείων πρόγνωσης τέτοιων γεγονότων. Μέρος των

νουκλεονίων ενός τέτοιου γεγονότος (πρωτόνια και νετρόνια) θα φτάσουν ταχύτατα στη Γη, μαζί και με ηλεκτρόνια, τα οποία δεν είναι ικανά από μόνα τους να αποτελέσουν απειλή για την Γη όμως από την ανίχνευσή τους μπορούμε να περιμένουμε την άφιξη μεγάλου πλήθους σωματιδίων χαμηλότερης ενέργειας. Τα δίκτυα μετρητών νετρονίων χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προειδοποιητικών συστημάτων σε τεχνολογία πραγματικού χρόνου-συναγερμού. Οι προγνώσεις οφείλουν να είναι αξιόπιστες (αποφυγή εσφαλμένων συναγερμών).

Επίσης, ως γνωστόν, οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs) μπορούν να δημιουργήσουν μια γεωμαγνητική καταιγίδα όταν χτυπήσουν στην μαγνητόσφαιρα της Γης, με επιπτώσεις ανάλογες με αυτές που δημιουργούν τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Οι περιοχές που είναι πιο ευάλωτες είναι αυτές που βρίσκονται κοντά στους πόλους, λόγω της φύσης του μαγνητικού πεδίου της Γης. Από τα δεδομένα που παίρνουμε από το δίκτυο των μετρητών νετρονίων μπορούμε να κάνουμε μια πρόγνωση που σχετίζεται με την άφιξη στεμματικών εκτοξεύσεων μάζας, με προορισμό την Γη.

2.6. Η επίδραση της κοσμικής ακτινοβολία στη ζωή μας

Οι κοσμικές ακτίνες επιδρούν στο γήινο περιβάλλον, στην τεχνολογία αλλά και στη ζωή μας. Συγκεκριμένα:

1. Καιρός και κλίμα: Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα για τον συσχετισμό των κοσμικών ακτίνων/ηλιακής δραστηριότητας και τις συνθήκες στην επιφάνεια της Γης. Η ηλιακή δραστηριότητα, μέσω του ηλιακού ανέμου, αλλά και η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία επιδρούν στα κατώτερα τμήματα της γήινης ατμόσφαιρας και προκαλούν ιονισμό με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής νεφών και την άμεση επίδραση στο κλίμα.
2. Υπολογιστές: Όταν έχουμε έντονη γεωμαγνητική καταιγίδα, τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας με υψηλή ενέργεια μπορούν να προκαλέσουν βλάβες, ιδίως στα συστήματα των διαστημοπλοίων και αεροσκαφών. Έχουν παρατηρηθεί καταστροφή των ηλεκτρονικών τους συστημάτων, μεμονωμένη βλάβη μιας μικρο-ηλεκτρονικής συσκευής λόγω σήματος ενεργητικών σωματιδίων (Single Event Effects), μπλοκάρισμα μιας ηλεκτρικής συσκευής, από κάποιο ενεργητικό σωματίδιο ενεργητικό σωματίδιο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποκρίνεται σε εισερχόμενα σήματα (latch up), παρεμβολές στα συστήματα καταγραφής και απεικόνισης καθώς και ηλεκτροστατική φόρτιση.

3. Κίνδυνοι υγείας: Η δόση που λαμβάνει ένας ανθρώπινος λογαριασμός από την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία, αυξάνεται με το γεωγραφικό πλάτος και με το υψόμετρο. Έχει υπολογιστεί ότι διπλασιάζεται κάθε 1,4 km.

Μια υπερατλαντική πτήση επιβαρύνει, με πρόσθετη δόση ακτινοβολίας, τα πληρώματα των αεροσκαφών καθώς και τους επιβάτες. Έχει βρεθεί ότι οι εργαζόμενοι στα αεροσκάφη λαμβάνουν διπλάσια μέση ετήσια δόση σε σχέση με την μέση ετήσια δόση που λαμβάνουν οι μη επαγγελματικά εκτιθέμενοι.

Μεγαλύτερα προβλήματα παρατηρούνται για τους αστροναύτες, οι οποίοι ταξιδεύουν έξω από την ατμόσφαιρα της Γης που δρα σαν προστατευτική ασπίδα και μένουν σε αυτές τις συνθήκες για αρκετό χρονικό διάστημα.

Οι επιπτώσεις στους οργανισμούς που εκτίθενται σε μεγάλη δόση ακτινοβολίας είναι πολλές και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην εμφάνιση καρκίνου. Από έρευνες που έχουν γίνει, έχει διαπιστωθεί ότι οι αστροναύτες και οι εργαζόμενοι σε αεροσκάφη που κινδυνεύουν από μεταλλάξεις στο γενετικό τους υλικό.

4. Αστρονομία: Το υπολογιστικό υλικό και οι άνθρωποι πρέπει να προστατεύονται από Κ.Α. και να αποφεύγονται πτήσεις σε περιόδους μεγάλης έντασης Κ.Α. Τότε υπάρχει πρόβλημα για τις αστρονομικές φωτογραφίες.

5. Ράδιο-τηλεπικοινωνίες: Με την αύξηση των ιόντων της ιονόσφαιρας τα ράδιο-κύματα απορροφώνται και οι ράδιο-μεταφορές αποτυγχάνουν. Οι Μετρητές Νετρονίων μετρούν το ποσό της ηλιακής διαταραχής που επεμβαίνει στη ράδιο επικοινωνία.

Η ραδιοεπικοινωνία στις συχνότητες από 3 μέχρι 30Mhz βασίζεται στην αντανάκλαση σημάτων στην ιονόσφαιρα της Γης. Τα σήματα αυτά εξασθενούν όταν διέρχονται από τη χαμηλά στρώματα της ιονόσφαιρας, όπου συγκρούονται συχνά τα ηλεκτρόνια με τα μόρια του αέρα και μπορεί να δημιουργηθεί μέχρι και ολική διακοπή στις επικοινωνίες εξαιτίας αύξησης της ηλεκτρικής πυκνότητας.

Με παρόμοιο τρόπο επηρεάζεται και το σύστημα εντοπισμού θέσης GPS, το οποίο μπορεί να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα λόγω των διαταραχών στην ιονόσφαιρα.

Επίσης, από τις διαταραχές στην ιονόσφαιρα μπορεί να επηρεάσουν και την ακρίβεια στη λειτουργία των ραντάρ.

6. Διάβρωση σωλήνων: Εξαιτίας της μεγάλης έντασης ηλεκτρικών ρευμάτων που περνούν και στο υπέδαφος, προκαλείται διάβρωση σε σωληνώσεις ιδίως σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Τα ρεύματα προκαλούνται λόγω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου που προκαλεί ο ηλιακός άνεμος.
7. Πτώση ισχύος: Τον Μάρτιο του 1989, εξαιτίας μιας έντονης γεωμαγνητικής καταιγίδας, στο Κεμπέκ του Καναδά, συνέβη μια διακοπή ρεύματος διάρκειας εννέα ωρών. Μέσω της έγκαιρης και έγκυρης πρόβλεψης πιστεύεται ότι θα ελαχιστοποιηθούν αυτά τα γεγονότα αφού οι αρχές των εκάστοτε χωρών θα είναι προετοιμασμένες.
8. Ράδιο-χρονολόγηση: Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή των αλληλεπιδράσεων των ΚΑ είναι η παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Τα περισσότερα νετρόνια απορροφώνται από πυρήνες ^{14}N και παράγονται ισότοπα άνθρακα και υδρογόνου.

Οι χρόνοι ημίσειας ζωής των ^{14}C και ^3H είναι 5568 και 12.46 χρόνια αντίστοιχα. Ο χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα είναι μόνο 25 χρόνια πριν απορροφηθούν από οργανικά υλικά ή πέσουν σαν βροχή στο έδαφος και στη θάλασσα.

Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από τη βαθμονόμηση των ηλικιών του ^{14}C σε σχέση με ηλικίες υπολογισμένες με ανεξάρτητες τεχνικές. Υπολογίζεται ο λόγος $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ και έτσι γίνεται η χρονολόγηση όλων των έμβιων όντων (φυτών και ζώων), έχοντας υποθέσει ότι ο ρυθμός παραγωγής του ^{14}C είναι σταθερός. Βέβαια, έχει παρατηρηθεί απόκλιση που μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η ένταση του μαγνητικού διπολικού πεδίου της γης παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές τα τελευταία 9000 χρόνια οι οποίες επηρεάζουν την ροή της κοσμικής ακτινοβολίας στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας. Όταν η ένταση των κοσμικών ακτίνων είναι υψηλή αυτό συνεπάγεται με αυξημένη ροή σωματιδίων ψηλών ενεργειών στο όριο της ατμόσφαιρας της Γης όπου σε αυτό το ύψος παράγονται τα νετρόνια που σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή ^{14}C . Σε περιόδους χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας η συγκέντρωση του ^{14}C είναι μεγαλύτερη, ως αποτέλεσμα της ηλιακής διαμόρφωσης. Επίσης, η καμπύλη βαθμονόμησης επηρεάζεται από τις πυρηνικές δοκιμές κυρίως στις περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου, όπου ελευθερώνονται πολλά νετρόνια από τις πυρηνικές εκρήξεις που οδηγούν σε αυξημένη ροή του ^{14}C .

9. Σέλας: Το πολικό σέλας σχηματίζεται από τον βομβαρδισμό των ανώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων από φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο. Το σέλας σχηματίζεται σε ύψος από 100 μέχρι 1000 χιλιόμετρα, πολύ ψηλότερα από οποιοδήποτε σύννεφο. Οπότε, απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορούμε να παρατηρήσουμε το φαινόμενο είναι να υπάρχει καθαρός ουρανός. Σε έντονα ηλιακά γεγονότα έχουν παρατηρηθεί και η ύπαρξη σέλατος ακόμα και σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη όπως αυτά της Αθήνας τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2003, λόγω πολύ ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων.



Εικόνα 2.4: Σέλας στον Αττικό ουρανό. Το γεγονός αποθανάτισε ο αστροфотоγράφος Αντώνης Αγιομαμίτης τη νύχτα της 20^{ης} Νοεμβρίου 2003 στην περιοχή του Ωρωπού.

(Πηγή: <http://twanight.org/newTWAN/photos.asp?ID=3005428>)

2.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε την ανάγκη για συνεχής καταμέτρηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και την ύπαρξη του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων, καθώς μας παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να αποκτήσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα της πολύπλοκης σχέσης που υπάρχει μεταξύ της Γης και του Σύμπαντος. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες τείνουν να καταστρέψουν την ατμόσφαιρα που από την φύση της μας προφυλάσσει από κινδύνους, όπως οι κοσμικές ακτίνες και μας καθιστούν πιο ευάλωτους. Γι' αυτό το λόγο η πρόγνωση του διαστημικού καιρού είναι πιο αναγκαία από ποτέ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

Ακτινοβολία και επιπτώσεις στην υγεία

3.1. Ορισμός

Ακτινοβολία είναι η εκπομπή ή μετάδοση ενέργειας με τη μορφή κυμάτων ή σωματιδίων μέσω του χώρου ή μέσω της ύλης. Περιλαμβάνει:

1. ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως (κατά αύξουσα συχνότητα) ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρες, ορατό φως, υπεριώδη ακτινοβολία, ακτίνες X και ακτινοβολία γ
2. Σωματιδιακή ακτινοβολία, όπως η ακτινοβολία άλφα, η βήτα και η ακτινοβολία νετρονίων
3. ακουστική ακτινοβολία, όπως υπέρηχοι, ήχοι ακουστικών συχνοτήτων, σεισμικά κύματα (εξαρτώνται από το μέσο διάδοσης)
4. βαρυτική ακτινοβολία, ακτινοβολία που παίρνει τη μορφή βαρυτικών κυμάτων ή διακυμάνσεων στην καμπυλότητα του χωροχρόνου.

Η ακτινοβολία διακρίνεται σε ιοντίζουσα ή μη ιοντίζουσα ανάλογα με την ενέργεια των ακτινοβολούμενων σωματιδίων. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από ενέργεια μεγαλύτερη των 10 eV, η οποία έχει την δυνατότητα να ιονίσει άτομα ή μόρια και να σπάσει τους χημικούς δεσμούς. Είναι μια σημαντική διάκριση της ακτινοβολίας λόγω της μεγάλης διαφοράς στην επίπτωση στους ζωντανούς οργανισμούς. Οι πιο συνηθισμένες μορφές ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι ραδιενεργά υλικά που εκπέμπουν α , β ή γ ακτινοβολία. Η ακτινοβολίας α αποτελείται από πυρήνες ηλίου, η β από ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια και η γ από φωτόνια. Άλλοι τύποι ιοντίζουσας ακτινοβολίας είναι οι ακτίνες X από ιατρικές διαγνωστικές εξετάσεις και μίονια, μεσόνια, ποζιτρόνια, νετρόνια και άλλα σωματίδια που αποτελούν την δευτερογενή συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας που παράγεται μετά την αλληλεπίδραση των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων με την ατμόσφαιρα της Γης.

Οι ακτίνες γάμμα, οι ακτίνες X και η υψηλότερη ενεργειακή περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας αποτελούν το ιοντίζον μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Με την λέξη ιονισμός εννοούμε τη απομάκρυνση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από ένα άτομο εξαιτίας της αλληλεπίδρασης τους με ακτινοβολία σχετικά υψηλών ενεργειών. Οι μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες προέρχονται από περιοχές του φάσματος μικρότερης συχνότητας. Ενέργειες χαμηλότερες από το κάτω «όριο» της

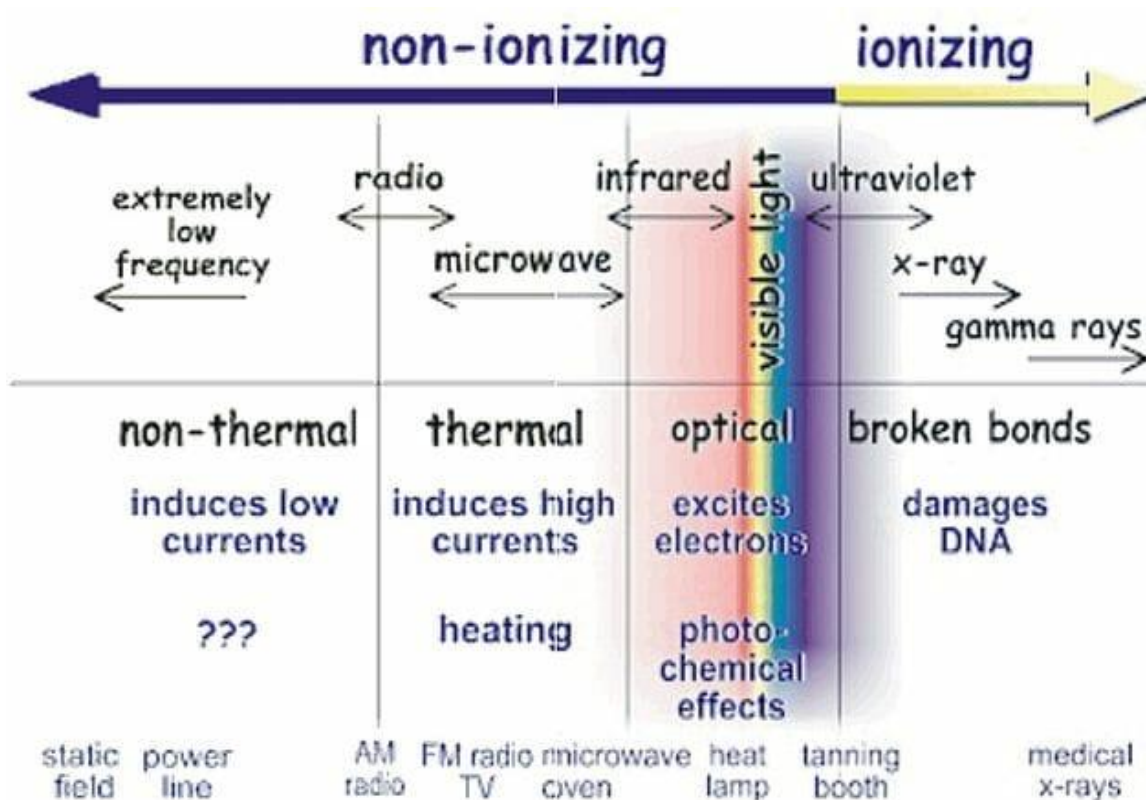
υπεριώδους ακτινοβολίας δεν μπορούν να ιονίσουν τα άτομα, αλλά μπορούν να διαταράξουν τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων που σχηματίζουν μόρια, προκαλώντας την διάσπασή τους π.χ. το ηλιακό έγκαυμα που προκαλείται από το υπεριώδες. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μεγαλύτερο μήκος κύματος από του ορατού φωτός, υπέρυθρες και τα μικροκύματα δεν έχουν την δυνατότητα να διασπάσουν τους μοριακούς δεσμούς, αλλά μπορούν να προκαλέσουν δονήσεις στους δεσμούς που εκδηλώνεται με την μορφή θερμότητας. Οι ακτινοβολίες με μήκη κύματος μεγαλύτερο από αυτές της υπεριώδους γενικά δεν θεωρούνται επιβλαβή για τα βιολογικά συστήματα των ζωντανών οργανισμών. Η οριοθέτηση αυτή δεν μπορεί να είναι απόλυτη διότι υπάρχει ασάφεια για την συσχέτιση της ακτινοβολίας και των επιδράσεων συγκεκριμένων συχνοτήτων.

Ο ιονισμός προσβάλλει τα ζωντανά κύτταρα και πλήττει κυρίως το DNA σε αυτά τα κύτταρα προκαλώντας καταστροφή του. Η επίδραση αυτή της ιοντίζουσας στους ζωντανούς οργανισμούς θεωρείται ότι αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου. Έτσι, διαχωρίζουμε την ιοντίζουσα ακτινοβολία σε σωματιδιακή και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, λόγω ότι διαφέρουν ως προς την δυνατότητα βιολογικής βλάβης. Ενώ ένα κύτταρο αποτελείται από τρισεκατομμύρια άτομα, μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτών θα ιονισθεί. Η πιθανότητα η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία να προκαλέσει καρκίνο εξαρτάται από ένα μέγεθος που ονομάζεται απορροφούμενη δόση και αποτελεί συνάρτηση της ισοδύναμης δόσης, δηλαδή το πόσο βλαπτικός είναι ο τύπος της ακτινοβολίας και της ενεργού δόσης που επί τοις ουσίαις είναι ένα μέτρο ευαισθησίας του ακτινοβολημένου οργανισμού ή του ιστού.

Οι περισσότερες ιοντίζουσες ακτινοβολίες προέρχονται από ραδιενεργά υλικά (σε μικρή συγκέντρωση στο έδαφος και στα πετρώματα) και από το διάστημα (κοσμικές ακτίνες), οπότε η παρουσία τους στο περιβάλλον δεν απαιτεί ανθρώπινη παρέμβαση. Οι ακτινοβολίες αυτού του μήκους κύματος δεν γίνονται αντιληπτές με την όραση ή κάποιο άλλο αισθητήριο όργανο αλλά απαιτούνται όργανα όπως οι μετρητές Geiger ή οι μετρητές νετρονίων για την ανίχνευσή της. Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε δευτερογενή εκπομπή ορατού φωτός κατά την αλληλεπίδραση της με την ύλη, όπως συμβαίνει με την ακτινοβολία Cherenkov και της ράδιο-φωταύγειας.

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει πολλές πρακτικές χρήσεις στην ιατρική, την έρευνα και την βιομηχανία, αλλά είναι επιβλαβής για την υγεία των ζωντανών οργανισμών όταν γίνεται λανθασμένη χρήση. Οι υψηλές δόσεις προκαλούν σύνδρομο οξείας ακτινοβολίας (Acute Radiation Syndrome), με εγκαύματα στο δέρμα, απώλεια τριχών, νέκρωση κάποιου εσωτερικού οργάνου και πιθανόν θάνατο, ενώ η έκθεση σε οποιαδήποτε δόση

μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης καρκίνου και βλάβης στο γενετικό υλικό που οδηγεί σε μεταλλάξεις. Ο καρκίνος του θυρεοειδούς, παρατηρείται όταν έχει γίνει χρήση πυρηνικών όπλων ή έχει συμβεί πυρηνικό ατύχημα εξαιτίας των βιολογικών ιδιοτήτων του ιωδίου ραδιενεργού ιωδίου-131, που είναι προϊόν σχάσης. Ωστόσο, δεν μπορεί να γίνει ακόμη ο ακριβής υπολογισμός του κινδύνου καθώς και της πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου στα κύτταρα που προκαλείται από ιοντίζουσα ακτινοβολία. Οι εκτιμήσεις αυτές για την ώρα βασίζονται σε δεδομένα που έχουμε από τον πληθυσμό του Hiroshima και Nagasaki που έγινε χρήση πυρηνικών όπλων και από την μελέτη του πυρηνικού ατυχήματος του στο Τσερνομπίλ.



Εικόνα 3.1: Διαφορετικοί τύποι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Φαίνεται πού βρίσκεται η ιοντίζουσα ακτινοβολία στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

(Πηγή: <https://biologydictionary.net/ionizing-radiation/>)

Υπάρχουν δύο πηγές σωματιδίων υψηλής ενέργειας που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα της Γης, ο ήλιος και το διάστημα τα οποία αποτελούν την κοσμική ακτινοβολία. Ο ήλιος εκπέμπει συνεχώς σωματίδια με τον ηλιακό άνεμο (κυρίως

ελεύθερα πρωτόνια) και περιστασιακά αυξάνει τη ροή όταν συμβαίνει μια εκτόξευση στεμματικής μάζας (CME).

Τα σωματίδια από το μακρινό διάστημα (στον Γαλαξία ή έξω από αυτόν) έχουν χαμηλή συχνότητα αλλά πολύ υψηλότερες ενέργειες. Αυτά τα σωματίδια είναι κυρίως πρωτόνια και λιγότερο σωματίδια άλφα (πυρήνες Ηλίου). Υπάρχουν και λίγοι ιονισμένοι πυρήνες βαρύτερων στοιχείων. Η προέλευση αυτών των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων δεν είναι ακόμη καλά κατανοητή, αλλά φαίνεται να είναι υπολείμματα υπερκαινοφανών και ιδιαίτερα εκρήξεων ακτίνων γάμμα (GRB), τα οποία διαθέτουν μαγνητικά πεδία ικανά για να προκαλέσουν τις τεράστιες επιταχύνσεις που απαιτούνται για να επιτευχθεί η μετρούμενη ενέργεια αυτών των σωματιδίων. Άλλος πιθανός μηχανισμός προέλευσης αυτών είναι τα κβάζαρ, τα οποία είναι φαινόμενα παρόμοια με τα GRB αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερο μέγεθος και τα οποία φαίνεται να αποτελούν τα πρώιμα στάδια εξέλιξης του σύμπαντος.

Η κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζει ελάχιστη τιμή στον Ισημερινό και την επιφάνεια της θάλασσας, αυξάνεται κατά $7 \text{ mrem} = 7 \times 10^{-5} \text{ Gy}$ για κάθε αύξηση του ύψους κατά 25 m. «Βομβαρδίζει» τα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα με αποτέλεσμα την παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων με σπουδαιότερο το ^{14}C .

Οι καταστάσεις όμως έκθεσης στο εναέριο ή διαστημικό χώρο είναι διαφορετικές από εκείνες του γήινου περιβάλλοντος, κυρίως λόγω των μεγάλων διαφορών στα πεδία ακτινοβολίας και του υψηλότερου περιβαλλοντικού ρυθμού δόσης σε σχέση με τη Γη, με συνέπεια η πιθανότητα για στοχαστικές συνέπειες να αυξάνεται και τα στοχαστικά αποτελέσματα με τη σειρά τους να μην μπορούν να αποκλειστούν. Η υψηλή συνεισφορά των βαρέων ιόντων από γαλακτικές κοσμικές ακτίνες και των δευτερογενών ακτινοβολιών στις δόσεις στο ανθρώπινο σώμα χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή και διαφορετική προσέγγιση.

Έχουν ιδρυθεί οργανισμοί όπως Διεθνής Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (International Commission on Radiation Units & Measurements - ICRU), η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (International Commission on Radiological Protection - ICRP) και το Εθνικό Συμβούλιο Ακτινοπροστασίας και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (National Council on Radiation Protection and Measurements – NCRP) που έχουν θεσπίσει τα μεγέθη για την ποσοτικοποίηση της ανθρώπινης έκθεσης στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, τους κανόνες ασφαλείας και έχουν ορίσει λεπτομερώς την αξιολόγηση της ανθρώπινης έκθεσης κατά τη διάρκεια μιας αεροπορικής πτήσης (NCRP). Εκτός από τον καθορισμό των δόσεων ανά επιβάτη ή εργαζόμενο, γίνεται και αξιολόγηση

των επιμέρους κινδύνων. Οι εργαζόμενοι στα εναέρια μέσα ή οι αστροναύτες αντιμετωπίζονται εξατομικευμένα ή ως μέλη μικρών ομάδων. Παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν στον καθορισμό των επιτρεπόμενων δόσεων είναι το φύλο, η ηλικία καθώς και η διαφοροποίηση που μπορεί να έχει κάθε άνθρωπος ως προς τον οργανισμό του (όργανα, αίμα, κ.ά.).

3.2. Μεγέθη υπολογισμού δόσεων

3.2.1. Δόση

Γενικά ως δόση ορίζουμε την μέτρηση της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα οργανισμό.

3.2.2. Απορροφούμενη δόση

Η απορροφούμενη δόση είναι μια ποσότητα δόσης που είναι το μέτρο της ενέργειας που αποτίθεται στην ύλη με ιοντίζουσα ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας. Η απορροφούμενη δόση χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της πρόσληψης δόσης στον ζωντανό ιστό τόσο στην ακτινοπροστασία (μείωση των βλαβερών επιδράσεων) όσο και στην ακτινολογία (πιθανές ευεργετικές επιδράσεις για παράδειγμα στην θεραπεία του καρκίνου). Χρησιμοποιείται επίσης για να συγκρίνει άμεσα την επίδραση της ακτινοβολίας σε άψυχο υλικό, όπως σε σκλήρυνση με ακτινοβολία.

Η μονάδα μέτρησης στο SI είναι το Gray (Gy) και ορίζεται ως ένα Joule απορροφούμενης ενέργειας ανά χιλιόγραμμα ύλης.

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Σε κάποιες χώρες χρησιμοποιείται ακόμα η παλαιότερη μονάδα μέτρησης rad (Roentgen Absorbed Dose) η οποία ισοδυναμεί με 10^{-2}Gy .

Η μέση θανατηφόρα δόση για 60 ημέρες είναι $L.D.50/60 = 4 \text{ Gy} = 4 \text{ J/kg} = 1\text{cal}$

Η απορροφούμενη δόση δεν αποτελεί μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, δεδομένη δόση ακτινοβολίας-α προκαλεί 10 φορές περισσότερες βιολογικές βλάβες από ίση δόση ακτίνων X.

3.2.3. Ισοδύναμη Δόση (Equivalent Dose)

Ισοδύναμη δόση είναι μια ποσότητα που λαμβάνει υπόψιν το είδος της ακτινοβολίας, η οποία σχετίζεται με το βαθμό στον οποίο ένας τύπος ιοντίζουσας ακτινοβολίας παράγει βιολογικές βλάβες. Η Ισοδύναμη δόση που έλαβε ένας ιστός προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της απορροφούμενης δόσης από Ακτινοβολία με τον συντελεστή στάθμισης ή συντελεστής ποιότητας που ονομάζεται Σχετική Βιολογική Δραστηριότητα (RBE, Relative Biological Effectiveness).

Ισοδύναμη Δόση: $H = \text{Απορροφούμενη Δόση} \times \text{Συντελεστή Ποιότητας}$

$$H = D \times W_R \text{ (Quality Factor)}$$

Η Μονάδα SI μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το **Sievert (Sv)**. Επί της ουσίας το Sv είναι η ίδια μονάδα μέτρησης με το Gy αφού ο συντελεστής ποιότητας της ακτινοβολίας είναι αδιάστατος. Μια φυσική παράμετρος που καθορίζει την ποιότητα αυτή είναι η Γραμμική Μεταφορά Ενέργειας (LET) κ εκφράζεται σε keV/μm. Αφορά τον ρυθμό με τον οποίον ένα ιονίζον σωματίδιο εναποθέτει ενέργεια κατά μήκος της διαδρομής του.

Επίσης, χρησιμοποιείται ακόμη η rem (roentgen equivalent man) σαν μονάδας μέτρησης της ισοδύναμης δόσης. Το 1 rem ισούται με 0.01Sv.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι συντελεστές ποιότητας για κάθε τύπο ακτινοβολίας. Βλέπουμε, για την ακτινοβολία X και για την γ ο συντελεστής στάθμισης είναι 1, άρα η ισοδύναμη δόση ισούται με την απορροφούμενη, $H = D$. Οι τιμές αυτές του συντελεστή ποιότητας W_T ισχύουν για μικρές δόσεις. Για παράδειγμα, για ισοδύναμη δόση 1 Sievert δεν έχουν ισχύ.

Radiation type and energy range	Radiation weighting factor, w_R
Photons, all energies	1
Electrons and muons, all energies	1
Protons and charged pions	2
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20
Neutrons	a continuous function of neutron energy (see below)

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

Πίνακας 3.1: Παράγοντες στάθμισης W_R όλων των τύπων ακτινοβολίας.
(Πηγή:<https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-radiation-weighting-factor-definition/>)

Βλέπουμε ότι η βιολογική βλάβη από τα σωματίδια-α είναι 20 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προκαλούν τα φωτόνια ακτίνων γ, οι ακτίνες-X, τα σωματίδια β και τα μίονια.

3.2.4. Ενεργός δόση

Για δεδομένη ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας, έχει παρατηρηθεί ό,τι οι άνθρωποι ιστοί που έχουν ακτινοβοληθεί, διαφέρουν ως προς την βαρύτητα της επιβάρυνσης στην υγεία του ανθρώπου. Η επίδραση της ακτινοβολίας στο αιμοποιητικό ιστό, επιβαρύνει περισσότερο την υγεία από ότι η ακτινοβολήση με την ίδια ισοδύναμη δόση στον θυρεοειδή αδένα. Από τους ανθρώπινους ιστούς, αυτοί που είναι πιο ανθεκτικοί στην ακτινοβολήση είναι το εξωτερικό μέρος των οστών, ο εγκέφαλος, οι σιελογόνοι αδένες και το δέρμα. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική επιβάρυνση της υγείας από την ακτινοβολήση ενός οργάνου ή ιστού χρησιμοποιούμε ένα μέγεθος δοσιμετρίας που ονομάζεται ενεργός δόση. Η ενεργός δόση (E_{eff}) ισούται με το γινόμενο της ισοδύναμης δόσης (H_T) που έλαβε ένας συγκεκριμένος ιστός (T) επί έναν συντελεστή βαρύτητας W_T που είναι χαρακτηριστικός για κάθε είδος ιστού:

$$E_{eff} = H_T \times W_T$$

ή πιο αναλυτικά:

$$E_{eff} = H_T \times W_T = D \times W_R \times W_T$$

Η ενεργός δόση μετριέται και αυτή σε Sievert (Sv).

Η ενεργός δόση σχετίζεται με τον συνολικό κίνδυνο που ενέχει για την υγεία, ανεξάρτητα από το είδος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, τις συνθήκες που έγινε η ακτινοβολήση και την περιοχή του ανθρώπινου σώματος που ακτινοβολήθηκε.

Αντιστοιχεί αριθμητικά στην ολοσωματική ισοδύναμη δόση που έπρεπε να δεχθεί το άτομο που προσβλήθηκε από την ακτινοβολία ώστε να διατρέξει τον ίδιο κίνδυνο βλάβης της υγείας του με αυτόν που διατρέχει από την τοπική ακτινοβολήση του οργάνου.

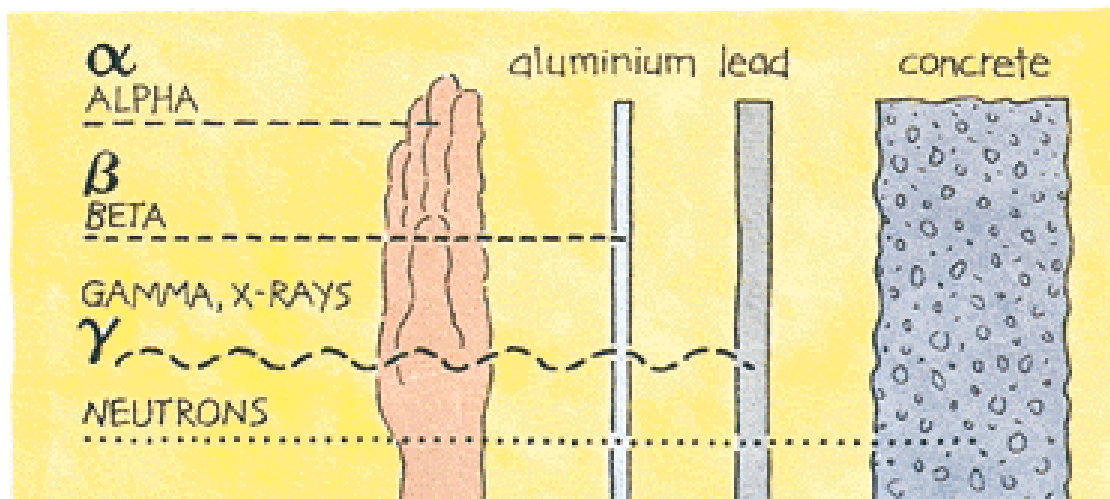
Ιστός	Συντελεστής W_T
Μυελός των οστών, Κόλον, Πνεύμονες, Στομάχι, Μαστός, επινεφρίδια, εξωθωρακική περιοχή, χοληδόχος, καρδιά, νεφροί, λεμφικοί αδένες, μύες, επιθήλιο στόματος, πάγκρεας, προστάτης, λεπτό έντερο, σπλήνας, θύμος αδένας, μήτρα / τράχηλος	0,12
Γονάδες	0,08
Ουροδόχος κύστη, οισοφάγος, ήπαρ, θυρεοειδής	0,04
Επιφάνεια οστών, εγκέφαλος, σιελογόνοι αδένες, δέρμα	0,01

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών του συντελεστή W_T , για διάφορους ιστούς.

Organ	Weighting factors (ICRP 60)	Weighting factors (ICRP 103)
Gonads	0,20	0,08
Bone marrow	0,12	0,12
Colon	0,12	0,12
Lungs	0,12	0,12
Stomach	0,12	0,12
Bladder	0,05	0,04
Breast	0,05	0,12
Liver	0,05	0,04
Oesophagus	0,05	0,04
Thyroid	0,05	0,04
Skin	0,01	0,01
Bone surface	0,01	0,01
Remainder	0,05	0,12
Brain	-	0,01
Salivary glands	-	0,01
Total	1,00	1,00

Πίνακας 3.3: Παράγοντες Βάρους Ιστών έτσι όπως αναγράφονται στην υπ' αριθμόν 103 δημοσίευση του International Commission on Radiological Protection (ICRP 103).

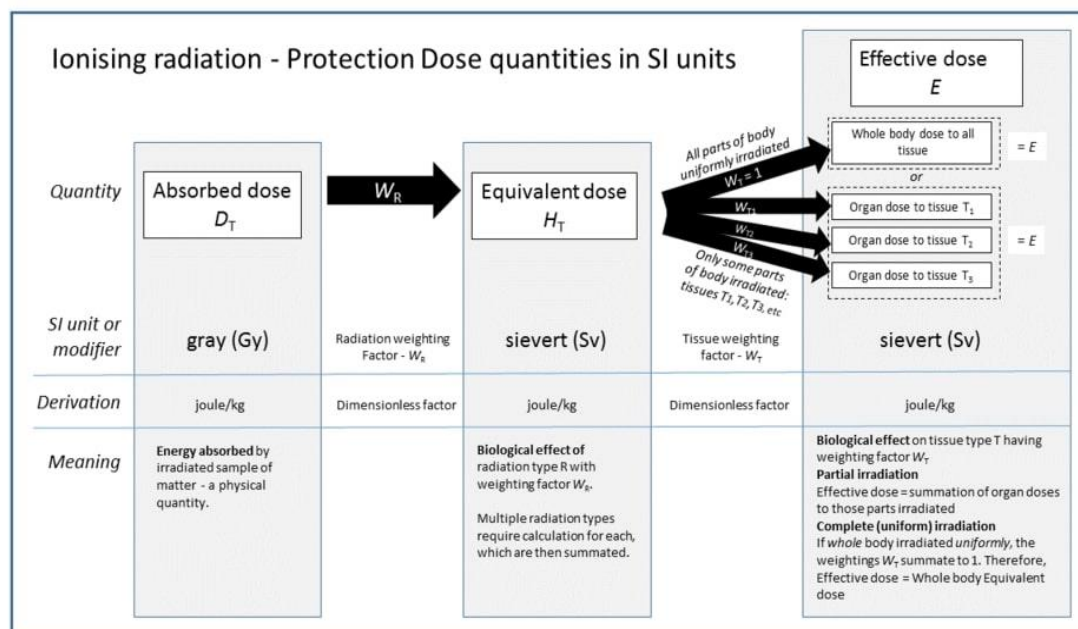
Στην περίπτωση που ακτινοβοληθούν περισσότερα από ένα όργανα τότε για να υπολογίσουμε την συνολική επιβάρυνση προσθέτουμε την ενεργό δόση που έλαβε το καθένα από αυτά.



Εικόνα 3.2: Η χρήση διαφόρων υλικών για την παρεμπόδιση διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας. Παρατηρούμε πως η πιο διεισδυτική είναι μια δέσμη νετρονίων που φαίνεται να σταματά μόνο στο σκυρόδεμα.

(Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-extent-of-different-materials-to-block-different-types-of-radiation-All-of-these_fig16_249010999)

Η διαφορά μεταξύ ισοδύναμης και ενεργού δόσης επί της ουσίας είναι πως η πρώτη εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας ενώ η δεύτερη από το είδος του ιστού ή οργάνου που ακτινοβολείται.



Εικόνα 3.3: Γραφική απεικόνιση των σχέσεων των ποσοτήτων των δόσεων σε μονάδες SI.

(Πηγή: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23803462>)

3.3. Δοσιμετρία – Dosimetry

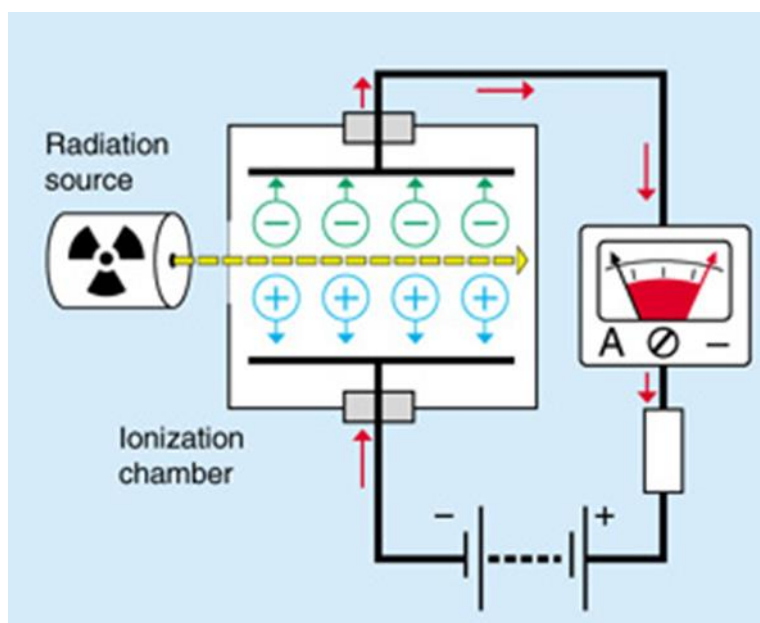
Δοσιμετρία ονομάζεται η διαδικασία ή μέθοδος μέτρησης της δόσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας καθώς και τα αποτελέσματά της πάνω στους ζωντανούς οργανισμούς. Η απορροφούμενη δόση D είναι η μόνη ποσότητα ακτινοβολίας που μπορούμε να μετρήσουμε. Η ενεργός δόση υπολογίζεται όταν έχει μετρηθεί η απορροφούμενη δόση D .

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη προκαλεί ιονισμό ή διέγερση των ατόμων και των μορίων.

Η μέτρηση της δοσιμετρίας μας δείχνει την ποσότητα ιονισμού που έχει προκληθεί ή το μέγεθος της ενέργειας που έχει εναποτεθεί στην ύλη.

Η ανίχνευση-μέτρηση της απορροφούμενης δόσης γινόταν με χρήση φωτογραφικού φιλμ (μονάδες μέτρησης το becquerel-Bq και röntgen-R).

Στα πρώτα στάδια ανίχνευσης της δόσης, χρησιμοποιούνταν ο θάλαμος ιοντισμού είναι το πιο για την μέτρηση της Δόσης. Βασιζόταν στην αρχή πως οι ακτίνες X έχουν την ικανότητα να ιονίσουν τον αέρα στον θάλαμο κατά την διέλευσή τους. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν άλλες μορφές ανιχνευτών, πιο εύχρηστοι. Τέτοιοι είναι ο ανιχνευτής Geiger-Mueller, στερεάς κατάστασης, σπινθηριστές, ανιχνευτές θερμοφωταύγειας κ.ά.



Εικόνα 3.4: Η μέτρηση του ρεύματος είναι ευθέως ανάλογη με τον ιονισμό του αέρα στον όγκο του θαλάμου.

(Πηγή: https://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/ionization_chamber.html)

Ο σκοπός της δοσιμετρίας είναι:

- Η έγκαιρη προειδοποίηση στην έκθεση του προσωπικού σε υψηλές τιμές ακτινοβολίας, για να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα.
- Ο εντοπισμός πιθανής έκθεσης των εργαζομένων που ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια ασφαλούς έκθεσης σε ακτινοβολία, για να ληφθούν άμεσα πρόσθετα μέτρα.
- Η εκτίμηση των συνθήκες εργασίας.
- Η υπόδειξη κατάλληλων μέτρων ακτινοπροστασίας.

3.4. Βιολογικά αποτελέσματα των ιονίζουσων ακτινοβολιών

Η βιολογική επίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε έναν ζωντανό οργανισμό γίνεται σε στάδια που διαφοροποιούνται τόσο σε χρονική κλίμακα όσο και σε επίπεδο οργάνωσης. Παρακάτω αναγράφονται τα στάδια κατά αύξουσα χρονική κλίμακα και από το πιο απλό επίπεδο οργάνωσης (ατομικό) στο πιο σύνθετο (συστημικό).

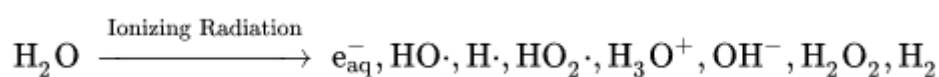
- Φυσικό στάδιο→ ιοντισμός ή διέγερση των μορίων.
- Φυσικοχημικό στάδιο→ τα διεγερμένα ιοντισμένα μόρια έχουν δευτερογενείς αντιδράσεις και σχηματίζουν νέα σταθερά ή ασταθή μόρια ή ελεύθερες ρίζες κυρίως από την ραδιόλυση του νερού.
- Χημικό στάδιο→ αντίδραση των ασταθών και των ελευθέρων ριζών με παρακείμενα μόρια. Έχουμε παραγωγή άτυπων μορίων, σχηματισμός βιολογικών δραστικών ελευθέρων ριζών, βλάβες βιολογικών μακρομορίων.
- Βιο-χημικό στάδιο→ ενζυμικές αντιδράσεις, αναγνώριση και επιδιόρθωση βλαβών.
- Βιολογικό στάδιο→ προσβολή βιολογικών μορίων σημαντικών για την λειτουργία του κυττάρου π.χ. νουκλεϊκά οξέα, πρωτεΐνες.
- Κυτταρικό στάδιο→ κυτταρικός θάνατος, μεταλλάξεις, μεταβολή της κινητικής της κυτταρικής διαίρεσης, αποκατάσταση βλαβών ιστών
- Συστηματικό στάδιο (μετά από χρόνια)→ ορμονικά αποτελέσματα, ανοσολογικές αντιδράσεις, βλάβες αγγείων, λειτουργικές βλάβες, καρκινογένεση

Σε μοριακό επίπεδο οργάνωσης, η βιολογική επίδραση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας εμφανίζει άμεση και έμμεση δράση.

Με τον όρο άμεση δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας αναφερόμαστε σε αλληλεπιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας με άτομα σημαντικών οργανικών πολυμερών μορίων του κυττάρου, όπως ενζυμικές και δομικές πρωτεΐνες, το RNA και κυρίως το DNA. Προκαλείται θραύση χημικών δεσμών με μεταβολή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των βιολογικών μορίων και μακρομορίων, με αποτέλεσμα τα μόρια να καθίστανται μη λειτουργικά.

Με τον όρο έμμεση δράση της ακτινοβολίας αναφερόμαστε στην πρόκληση βιολογικής βλάβης λόγω της χημικής αντίδρασης σημαντικών οργανικών μορίων του κυττάρου με δραστικές ελεύθερες ρίζες που σχηματίζονται κατά τη ραδιόλυση του νερού. Ραδιόλυση καλούμε την αλληλεπίδραση της ιοντίζουσας, κυρίως, ακτινοβολίας με άτομα των μορίων του νερού που βρίσκεται σε αφθονία στον άνθρωπο (περίπου τα 2/3) και γενικά στα βιολογικά συστήματα.

Συνοψίζοντας, η ραδιόλυση του νερού μπορεί να γραφτεί ως:

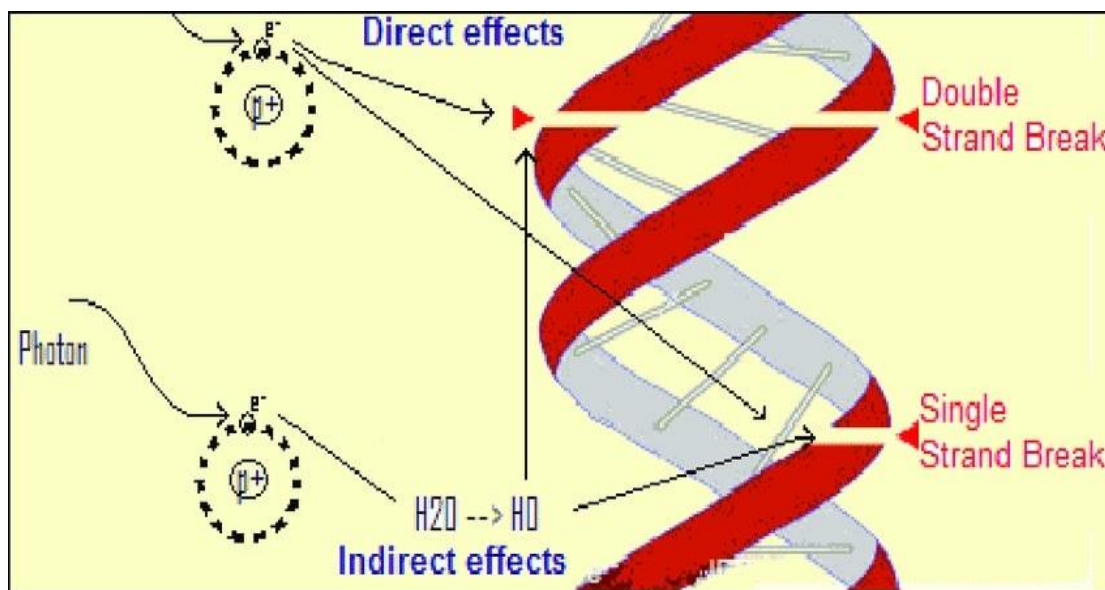


με παραγωγή αναγωγικού και οξειδωτικού χαρακτήρα, υπεροξειδίου του H₂ και παραγωγή ελεύθερης ρίζας υπεροξυλίου.

3.5. Η σημασία της βλάβης του DNA

Το DNA είναι αποδεδειγμένα ο σημαντικότερος ενδοκυτταρικός στόχος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας λόγω των σοβαρών βιολογικών επιδράσεων που προκαλεί. Η έκθεση σε μπορεί να προκαλέσει στο DNA διάφορα είδη βλάβης με κυριότερες την αποσύνθεση του, την θραύση του ενός ή και των δύο κλώνων του (Single Strand Break-SSB και Double Strand Break-DSB), βλάβη στις βάσεις, ενδο-κλωνική, δια-κλωνική ή και δια-μοριακή σύνδεση (με άλλα μόρια DNA ή πρωτεϊνών). Σημειώνεται ότι καθημερινά σημειώνονται πάνω από 100.000 βλάβες του DNA στα κύτταρα των θηλαστικών αυθόρμητα ή λόγω της επίδρασης εξωγενών και ενδογενών παραγόντων, όμως το κύτταρο έχει τους κατάλληλους μηχανισμούς επιδιόρθωσης της κάθε, σχεδόν, βλάβης. Από λαμβανόμενη δόση ακτινοβολίας μεγέθους 1 Gy χαμηλής γραμμικής μεταφοράς ενέργειας προκαλούνται 105 ιοντισμοί ανά κύτταρο, με άμεση και έμμεση δράση στο μοριακό επίπεδο οργάνωσης (40 DSB, 1.000 SSB, 1.000 βλάβες βάσεων ανά κύτταρο). Οπότε καταλαβαίνουμε το μικρό ποσοστό επιβάρυνσης σε σχέση με τον συνολικό αριθμό βλαβών που συμβαίνουν στο σώμα μας καθημερινά. Όμως, αυτό το πολύ μικρό ποσοστό βλαβών του DNA που δεν επιδιορθώθηκε είναι ικανό να προκαλέσει σημαντικά βιολογικά

αποτελέσματα όπως κυτταρικό θάνατο (από την θραύση και των δύο κλώνων-DSB). Όλες οι τύπου DSB βλάβες στο DNA δεν έχουν την ίδια βαρύτητα. Η έκθεση σε ακτινοβολία με χαμηλό LET, μπορεί να οδηγήσει σε σύνθετες συστοιχίες βλάβης του DNA που να περιλαμβάνουν μια ή περισσότερες DSB καθώς και αρκετές SSB, βλάβες βάσεων κ.ο.κ., που καταδεικνύει την πολυπλοκότητα και την εστιασμένη δράση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους ζωντανούς οργανισμούς.



Εικόνα 3.5: Απλό και διπλό σπάσιμο της έλικας του DNA από τη δράση ελεύθερων ριζών.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/253008161>)

Στη δοσιμετρία, η γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear energy transfer-LET) είναι η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει ένα ιονίζον σωματίδιο κατά την διέλευσή από ένα υλικό, ανά απόσταση μονάδας. Είναι ένα μέγεθος που περιγράφει τη δράση της ακτινοβολίας στην ύλη και ταυτίζεται με τη δύναμη επιβράδυνσης που εφαρμόζεται σε ιονίζον φορτισμένο σωματίδιο καθώς διέρχεται μέσω της ύλης. Η γραμμική μεταφορά ενέργειας είναι μια θετική ποσότητα και εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας καθώς και από το είδος του υλικού που διαπερνά.

Όταν μια ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από υψηλό LET τότε θα εξασθενήσει πιο γρήγορα με αποτέλεσμα να μην διεισδύει βαθιά στο υλικό αλλά προκαλεί σοβαρότερη βλάβη εξαιτίας της μεγαλύτερης συγκέντρωσης της ενέργειας που εναποτίθεται. Έχει παρατηρηθεί ότι η «ζημιά» που μπορεί να προκαλέσει μια ακτινοβολία είναι δυσανάλογη της απορροφούμενης δόσης, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί από το μέγεθος LET. Για να

διορθωθεί αυτή η απόκλιση, η δοσιμετρία χρησιμοποιεί τους παράγοντες στάθμισης της ακτινοβολίας.

Το LET, στο S.I., εκφράζεται σε μονάδες kiloelectronvolts ανά μικρόμετρο (keV/μm) ή megaelectronvolts ανά εκατοστόμετρο (MeV/cm).

Table 7.1. Linear Energy Transfer (LET) of Various Radiations	
Radiation	LET (keV/μm)
<i>Photons</i>	
⁶⁰ Co (~1.2 MeV)	0.3
200-keV X-ray	2.5
<i>Electrons</i>	
1 MeV	0.2
100 keV	0.5
10 keV	2
1 keV	10
<i>Charged particles</i>	
proton 2 MeV	17
alpha 5 MeV	90
carbon 100 MeV	160
<i>Neutrons</i>	
2.5 MeV	15-80
14.1 MeV	3-30

Εικόνα 3.6: Στο πίνακα αναγράφεται η γραμμική μεταφορά ενέργειας διαφόρων τύπων ακτινοβολίας.

(Πηγή:https://espace.cern.ch/partnersite/workspace/gora/Shared%20Documents/PSI2010/07_H_Paganetti_How_significant.pdf)

3.6. Βιολογικά αποτελέσματα σε κυτταρικό επίπεδο

3.6.1. Γονιδιακές μεταλλάξεις

Είναι ξεκάθαρο από τα προηγούμενα ό,τι η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει την δυνατότητα να προκαλέσει μεταλλάξεις. Όταν οι βλάβες είναι απλές (βλάβες βάσεων, SSB) είναι στο σύνολό τους επιδιορθώσιμες. Όμως υπάρχουν και λίγες όπου η επιδιόρθωση είναι ανεπιτυχής και τότε μπορεί να προκληθεί αλλαγή στην

αλληλουχία των βάσεων του γενετικού υλικού και συνεπώς μετάλλαξη. Οι σύνθετες συστοιχίες βλάβης του DNA (DSB) επιδιορθώνονται πολύ δύσκολα. Οι βλάβες αυτού του τύπου προκαλούν χρωμοσωματικές ανωμαλίες αλλά οδηγούν και σε μετάλλαξη λόγω ελλείμματος βάσεων (το τμήμα του DNA παραμένει ελεύθερο).

Τα αποτελέσματα της μετάλλαξης ποικίλλουν. Η συχνότητα που εμφανίζονται οι μεταλλάξεις αυξάνεται με τη δόση ακτινοβολίας που θα απορροφηθεί από έναν ζωντανό οργανισμό αν όταν οι δόσεις γίνουν μεγάλες τότε τα κύτταρα θανατώνονται. Εδώ, θα πρέπει να σημειωθεί ότι καθημερινά σημειώνονται 240.000 μεταλλάξεις σε κάθε κύτταρο, ενώ η απορρόφηση ιοντίζουσας ακτινοβολίας δόσης 1Gy προκαλεί μόλις 2000 μεταλλάξεις, οι οποίες προστίθενται στις άνω.

3.6.2. Χρωμοσωματικές ανωμαλίες

Οι χρωμοσωματικές ανωμαλίες οφείλονται σε μια ποικιλία ανταλλαγών των θραυσμάτων του DNA μεταξύ διαφορετικών χρωμοσωμάτων, μεταξύ των χρωματίδων του ίδιου χρωμοσώματος ή ακόμα και μεταξύ περιοχών της ίδιας χρωματίδας. Έτσι, γίνεται διάκριση σε χρωμοσωματικές ανωμαλίες και χρωματιδικές ανωμαλίες ανάλογα με την φάση που βρισκόταν το κύτταρο όταν συνέβη η βλάβη από την έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Όταν εμφανίζονται στον οργανισμό άτυπα χρωμοσώματα σε κύτταρα που πολλαπλασιάζονται αυτό μπορεί να οδηγήσει στον κυτταρικό θάνατο.

3.6.3. Κυτταρικός θάνατος

Ο κυτταρικός θάνατος σχετίζεται άμεσα με την έκταση της βλάβης των χρωμοσωμάτων μετά την ακτινοβολήση. Μετά από την απορρόφηση μεγάλης δόσης ιοντίζουσας ακτινοβολίας προκαλούνται εκτεταμένες βλάβες στο DNA, σε πρωτεΐνες, ένζυμα και την κυτταρική μεμβράνη με αποτέλεσμα την άμεση νέκρωση του κυττάρου. Χαμηλότερες δόσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μη επιδιορθώσιμη βλάβη του DNA με βιολογικό αποτέλεσμα την άμεση κυτταρική απόπτωση.

Όταν ένας ζωντανός οργανισμός εκτεθεί σε μικρή δόση ακτινοβολία τότε μπορούν να συμβούν δύο πράγματα. Εάν η βλάβη στο DNA δεν θα είναι

επανορθώσιμη οπότε το κύτταρο θα οδηγηθεί σε μεταλλάξεις ή σε καθυστερημένη νέκρωση/απόπτωση. Εάν είναι επιδιορθώσιμη (δραστηριοποιούνται μηχανισμοί προαγωγής της κυτταρικής επιβίωσης) τότε τα κύτταρα συνεχίζουν να πολλαπλασιάζονται χωρίς κανένα πρόβλημα.

3.7. Κυτταρικός θάνατος και καμπύλες κυτταρικής επιβίωσης

Καμπύλες επιβίωσης κυττάρων καλούνται τα διαγράμματα που παρουσιάζουν το κλάσμα των κυττάρων μιας καλλιέργειας τα οποία διατηρούν την αναπαραγωγική τους ικανότητα, N/N_0 , συναρτήσει της δόσης από ιοντίζουσα ακτινοβολία, D . Για δόση $D=0$ Gy, η επιβίωση ισούται με τη μονάδα.

Η κάθε καμπύλη επιβίωσης περιέχει τουλάχιστον ένα εκθετικό τμήμα. Έτσι το μοντέλο στόχου ήταν το πρώτο μοντέλο που δημιουργήθηκε με βάσει τα πειραματικά αποτελέσματα. Το μοντέλο αυτό αν και περιγράφει ικανοποιητικά μερικές ειδικές περιπτώσεις αποτελεσμάτων κυτταρικής επιβίωσης (πολύ ακτινοευαίσθητα κύτταρα θηλαστικών, χαμηλούς ρυθμούς δόσης, ακτινοβολία υψηλού LET), αδυνατεί να περιγράψει την συμπεριφορά που εμφανίζουν τα περισσότερα κύτταρα των θηλαστικών όπου για μικρές δόσεις εμφανίζουν μια περιοχή περιορισμένης μείωσης της επιβίωσης. Αυτό το τμήμα της καμπύλης ονομάζεται «ώμος» και έχει συνδεθεί με τους κυτταρικούς μηχανισμούς επιδιόρθωσης της βλάβης. Έτσι δημιουργήθηκε το μοντέλο πολλαπλών στόχων το οποίο προέβλεπε σωστά την επιβίωση σε μεγάλες δόσεις, αλλά υστερούσε να περιγράψει την συμπεριφορά των κυττάρων σε σχετικά μικρές δόσεις στην περιοχή του ώμου όπου δίνει κλάσμα επιβίωσης 1 που αυτό σημαίνει την ύπαρξη κατωφλίου δόσης για την εμφάνιση βιολογικού αποτελέσματος.

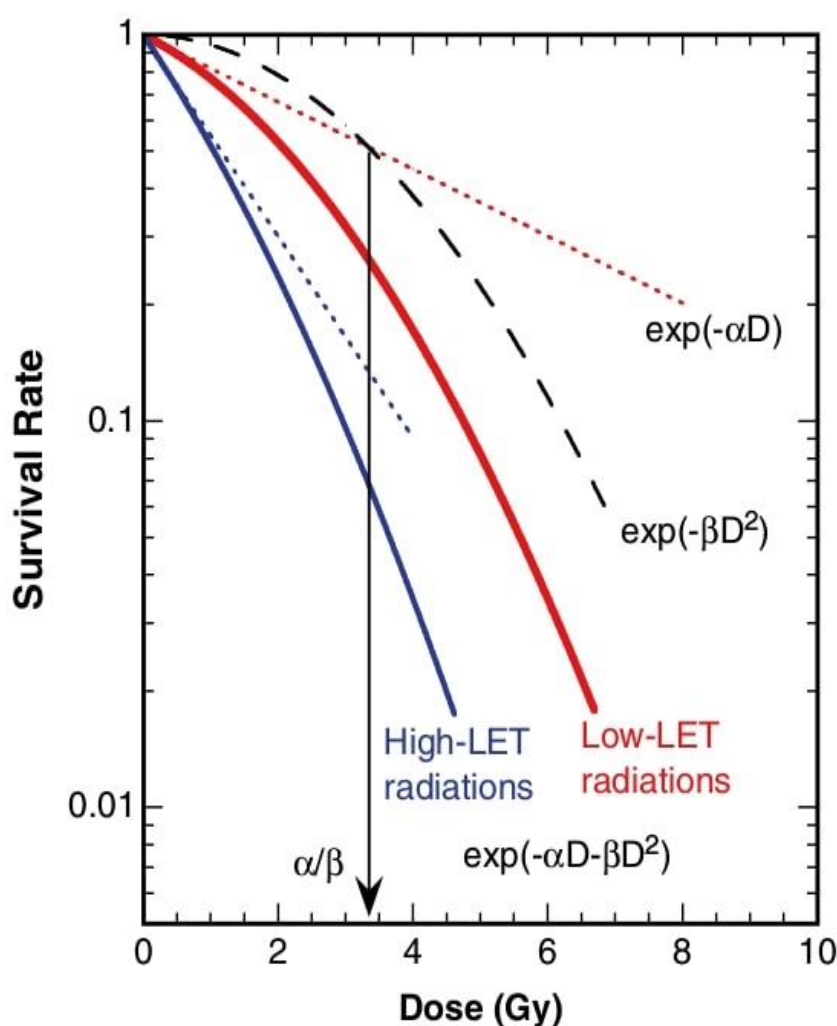
Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν παρατηρείται καθαρά εκθετική συμπεριφορά. Η κλίση του κλάσματος επιβίωσης αυξάνει με τη δόση. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε το γραμμικό-τετραγωνικό μοντέλο (LQ από το Linear Quadratic) το οποίο και έχει επικρατήσει πειραματικά. Το κλάσμα επιβίωσης σε αυτό το μοντέλο δίνεται από την σχέση:

$$P=N/N_0=\exp [-(\alpha D+\beta D^2)]$$

Οι καμπύλες του LQ μοντέλου έχουν συνεχώς αυξανόμενη κλίση και η μορφή τους καθορίζεται από το λόγο των δύο σταθερών α/β και περιγράφεται πιστότερα η κυτταρική επιβίωση για χαμηλές δόσεις (μέχρι 3 Gy).

Η συμπεριφορά της καμπύλης εξηγείται ποιοτικά και γίνεται φανερό ότι οι DSB αποτελούν την σημαντικότερη βλάβη του DNA. Ο συντελεστής α (Gy^{-1}) παριστάνει την πιθανότητα DSB/μονάδα δόσης εξαιτίας των ιονισμών κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματιδίου ακτινοβολίας και δεν εξαρτάται από τον ρυθμό δόσης, ενώ ο συντελεστής β (Gy^{-2}) παριστάνει την πιθανότητα DSB/μονάδα δόσης λόγω των ιονισμών κατά μήκος της τροχιάς δύο διαφορετικών σωματιδίων ακτινοβολίας, η οποία και αυξάνει με το ρυθμό δόσης. Ο λόγος α/β έχει μονάδες δόσης (Gy) και αντιστοιχεί στη δόση όπου και οι δύο όροι, αD και βD^2 , είναι ίσοι.

Έτσι το μοντέλο προβλέπει επίσης σωστά την επίδραση της ποιότητας της ακτινοβολίας και του ρυθμού δόσης.



Εικόνα 3.7: Γραφική αναπαράσταση των καμπυλών επιβίωσης και των παραμέτρων στο μοντέλο Linear Quadratic. Η δόση του σημείου διασταύρωσης προκύπτει από τον λόγο α / β . Η καμπύλη επιβίωσης για ακτινοβολία υψηλής LET

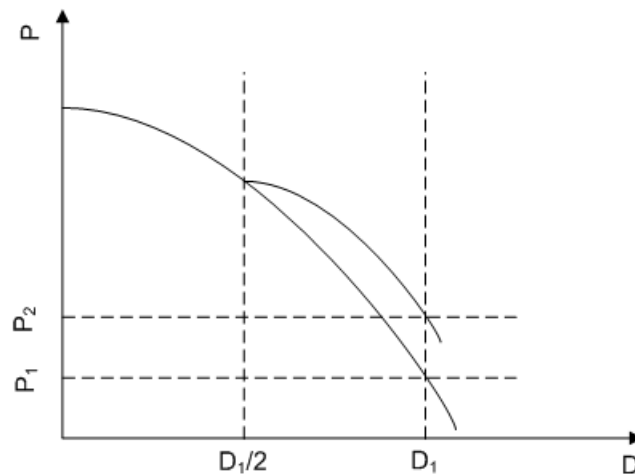
σχηματίζεται με την παραδοχή ότι η τιμή α είναι τουλάχιστον 3 φορές υψηλότερη από ίδια τιμή του συντελεστή β, σε ακτινοβολία χαμηλής LET.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/324007117>)

3.8. Τροποποιητικοί παράγοντες των βιολογικών επιδράσεων

Κλινικά, έχει αποδειχτεί η ύπαρξη κάποιων παράγοντες που τροποποιούν τις βιολογικές επιδράσεις της απορροφούμενης ιοντίζουσας ακτινοβολίας στον οργανισμό. Χωρίζονται σε :

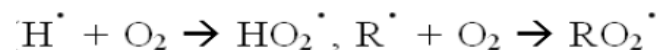
A) Φυσικούς (LET ακτινοβολίας, κλασματοποίηση δόσης)



Εικόνα 3.8: Ποιοτική αναπαράσταση της κλασματοποίησης της δόσης. Στην περίπτωση εφάπαξ χορήγησης δόσης D1 το κλάσμα επιβίωσης (P1) θα ήταν μικρότερο από ότι για χορήγηση σε δύο ίσα κλάσματα (P2). Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί καθώς και η μικρότερη, τη φορά, δόση επιτρέπει στον οργανισμό να επιδιορθώσει μέρος της βλάβης, μέσω των μηχανισμών του.

(Πηγή: <http://ikee.lib.auth.gr/record/135389>)

B) Χημικούς (Συγκέντρωση O₂, θειόλες κ.ά)



Γ) Βιολογικούς (φάση κυτταρικού κύκλου και το είδος του κυττάρου)

Έχει μεγάλη σημασία η φάση του κυτταρικού κύκλου όταν ο οργανισμός ακτινοβοληθεί με ιοντίζουσα ακτινοβολία. Στην διαδικασία της μίτωσης τα κύτταρα του οργανισμού είναι πιο ευάλωτα και οι επιπτώσεις από την απορροφούμενη δόση θα είναι μεγαλύτερες.

Ακόμα, σημαντικός παράγοντας είναι το είδος του ακτινοβολούμενου κυττάρου. Άλλα κύτταρα φαίνεται να είναι πιο ανθεκτικά στην έκθεση από άλλα ενώ υπάρχουν και κατηγορίες κυττάρων που έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία.

Ομάδα 1	Ωριμα λεμφοκύτταρα, ερυθροβλάστες, σπερματογόνια κύτταρα
Ομάδα 2	Μυελοκύτταρα, κοκκιώδη κύτταρα, εντερικά κύτταρα, βλαστικά κύτταρα της επιδερμίδας
Ομάδα 3	Γαστρικοί αδένες, ενδοθηλιακά κύτταρα, λεπτών αγγείων του αίματος
Ομάδα 4	Οστεοβλάστες, χονδροβλάστες, σπερματοκύτταρα και σπερματίδες
Ομάδα 5	Πολυμορφοπύρηνα λευκά αιμοσφαίρια, οστεοκύτταρα, σπερματοκύτταρα
Ομάδα 6	Παρεγχυματικά κύτταρα, ινοβλάστες
Ομάδα 7	Κύτταρα του συνδετικού ιστού, ινοκύτταρα, χονδροκύτταρα, φαγοκύτταρα
Ομάδα 8	Μυϊκά και νευρικά κύτταρα

Πίνακας 3.4: Ομαδοποίηση των κυττάρων ενός οργανισμού ανάλογα με την ακτινοευαισθησία τους, με φθίνουσα σειρά.

3.9. Βιολογική επίδραση σε συστηματικό επίπεδο: είδη αποτελεσμάτων

Τα δυσμενή αποτελέσματα της έκθεσης σε ακτινοβολία στην υγεία ενός οργανισμού διακρίνεται σε:

- Καθορισμένα αποτελέσματα, είναι τα κλινικά αποτελέσματα που ανιχνεύονται μετά από έκθεση σε μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας, που οφείλονται στη θανάτωση ή τη δυσλειτουργία μεγάλου αριθμού κυττάρων ενός ιστού. Αποκαλούνται και *επιβλαβείς αντιδράσεις των ιστών* (ICRP 2008).
- Στοχαστικά αποτελέσματα, η πιθανότητα εμφάνισης τους τα υπακούουν σε στατιστικούς νόμους. Εμφανίζονται σαν αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού ενός ή περισσότερων μεταλλαγμένων κυττάρων εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η λευχαιμία, ο καρκίνος και οι κληρονομήσιμες βλάβες.

Σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις της ακτινοβολίας στο έμβρυο και στο κύημα. Έχουν αποδειχθεί κλινικά τα βιολογικά αποτελέσματα συναρτήσει της φάσης της κύησης κατά την οποία συνέβη η έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία.

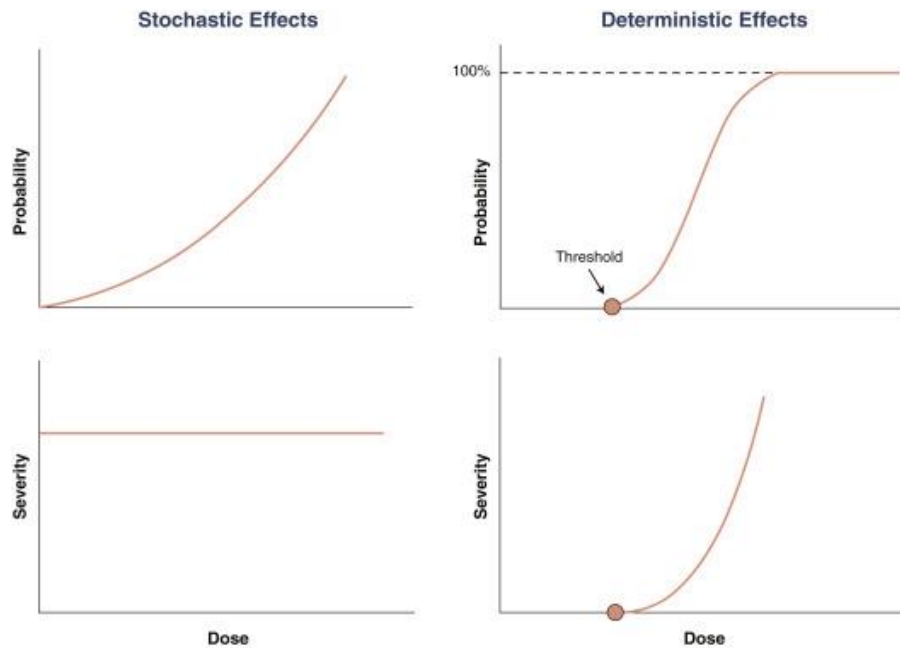
Βιολογικό αποτέλεσμα		Εβδομάδ α κύησης	Κατώφ λι δόσης	Πιθανότητα εμφάνισης
Στοχαστικό	καρκινογένεση	>3 ^{ης}	Όχι	0,015% ανά mGy για όλη τη διάρκεια ζωής
		0 ^η - 3 ^η	Όχι	< 0,015% ανά mSv για όλη τη διάρκεια ζωής
Καθορισμένο	αποτυχία εμφύτευσης ωαρίου	0 ^η - 3 ^η	>100 mGy	
	δυσπλασία οργάνων	3 ^η – 8 ^η .	>100 mGy	
	διανοητική καθυστέρηση	8 ^η - 15 ^η	>300 mGy	40% ανά Gy
	μείωση του δείκτη IQ =25 μονάδες / Gy	8 ^η - 15 ^η	Όχι;	
		>15 ^{ης}	Όχι;	

Πίνακας 3.5: Βιολογικά αποτελέσματα σε συστηματικό επίπεδο.

Ανάλογα με το είδος του αποτελέσματος, στις παραπάνω δύο κατηγορίες κατατάσσονται τα διάφορα είδη μη καρκινικών νοσημάτων, όπως οι καλοήθεις όγκοι, οι επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα και ο καταρράκτης ως αποτέλεσμα της ακτινοβολήσης.

3.9.1. Καθορισμένα αποτελέσματα (deterministic effects)

Τα καθορισμένα ή άμεσα αποτελέσματα, εμφανίζονται μετά από έκθεση σε δόσεις ακτινοβολίας $D \geq 0.5-1.0$ Sv (κατώφλι). Σε μεγαλύτερες δόσεις από αυτή, εμφανίζονται αναπόφευκτα ενώ η σοβαρότητα τους αυξάνει όσο η δόση αυξάνεται.



Εικόνα 3.8: Γραφική απεικόνιση των σχέσεων πιθανότητας-δόσης και σοβαρότητας-δόσης για στοχαστικές και αιτιοκρατικές επιδράσεις της ακτινοβολίας.

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1936878X16307513>)

Όταν οι δόσεις είναι μικρότερες της δόσης κατωφλίου, τότε η πιθανότητα εμφάνισης καθορισμένων αποτελεσμάτων είναι μηδενική, ενώ πάνω από αυτή την τιμή υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα στην εμφάνιση βλάβης.

Για να επέλθει μια ανεπανόρθωτη βλάβη σε έναν ιστό είναι απαραίτητο να εναποτεθεί ένα ελάχιστο ποσό δόσης, που εκφράζεται από την δοσιμετρία με την δόση κατωφλίου της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Παρατηρούμε ότι η βαρύτητα της βλάβης στον ιστό αυξάνεται απότομα με την αύξηση της δόσης (τιμή δόσης μεγαλύτερη από την δόση κατωφλίου). Παράλληλα με τις αρνητικές επιδράσεις της εφάπαξ υψηλής δόσης ακτινοβολίας, μειώνεται στο ελάχιστο και η ικανότητα του ιστού για επιδιόρθωση της βλάβης.

Αν η βλάβη είναι εκτεταμένη και μη αναστρέψιμη, τότε οδηγείται το όργανο σε πλήρη καταστροφή και κατ' επέκταση το σύστημα, μέρος του οποίου είναι το όργανο (αιμοποιητικό, κεντρικό νευρικό, πεπτικό), με κατάληξη τον θάνατο του οργανισμού.

Οι αντιδράσεις των ιστών διακρίνονται σε πρώιμες και καθυστερημένες.

Όταν ένας ιστός ακτινοβοληθεί με δόση $D \geq 1\text{Gy}$ τότε εμφανίζονται (τις πρώτες ώρες, ημέρες, εβδομάδες) οι πρώτες αντιδράσεις του. Προκαλούνται φλεγμονές όπως το ερύθημα, που οφείλονται κυρίως σε μεταβολές της διαπερατότητας των κυττάρων και της απελευθέρωσης ισταμίνης.

Οι καθυστερημένες αντιδράσεις ενός ιστού, κάνουν την εμφάνιση τους μερικούς μήνες ή και έτη μετά την ακτινοβολήση. Διακρίνονται σε καθυστερημένες αντιδράσεις γενικού και σε επακόλουθου τύπου.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτές που προκύπτουν σαν άμεσο αποτέλεσμα της μορφολογικής και λειτουργικής βλάβης του ιδίου του ιστού, ενώ στην δεύτερη αυτές που προκύπτουν σαν αποτέλεσμα σοβαρής βλάβης που επηρέασε τον ιστό κατά την διάρκεια της φάσης των πρώιμων αντιδράσεων.

Σε εφάπαξ ολόσωμη έκθεση σε δόσεις ακτινοβολίας μεγαλύτερες του 1Gy, εμφανίζεται το οξύ ακτινικό σύνδρομο, που είναι μια ακολουθία κλινικών συμπτωμάτων. Διακρίνονται τέσσερις κλινικές περίοδοι ανάλογα με το χρόνο μετά την έκθεση:

1. η πρόδρομη περίοδος (0-48h) κατά την οποία εκδηλώνονται ανορεξία, ναυτία, έμετος και διάρροια
2. η λανθάνουσα περίοδος (48h-3 εβδομάδες) κατά την οποία ο ασθενής δεν εμφανίζει συμπτώματα
3. η περίοδος που εκδηλώνονται τα διάφορα σύνδρομα τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τη δόση ακτινοβολίας (6-8 εβδομάδες)
4. η περίοδος ανάρρωσης (6 εβδομάδες-πολλούς μήνες) μετά την έκθεση, αν ο ασθενής καταφέρει να επιβιώσει.

Συνήθως, για δόσεις μικρότερες του 1 Gy δεν εμφανίζονται συμπτώματα.

Ανάλογα με την δόση μπορεί να εμφανιστούν τα εξής σύνδρομα:

- Ακτινική νόσος: Σε χαμηλές δόσεις, στα συμπτώματα περιλαμβάνονται η ήπια ανορεξία και η κόπωση. Όταν οι δόσεις είναι της τάξης των 10 Gy, τότε τα συμπτώματα εμφανίζονται σχεδόν άμεσα μετά την έκθεση (μερικά λεπτά), χαρακτηρίζονται από σφοδρότητα, και παρατηρείται ακόμη εφίδρωση, πυρετός, απάθεια και πτώση της αρτηριακής πίεσης. Άμα οι δόσεις είναι της τάξης των 2 Gy, τότε παρατηρείται καθυστερημένη εμφάνιση των συμπτωμάτων και μπορεί να μην έχουν κλινική υπόσταση και ο οργανισμός αναρρώνει πλήρως.
- Σύνδρομο του αιμοποιητικού: Για δόσεις 2-4 Gy εμφανίζεται το σύνδρομο, όπου παρατηρείται αναιμία, αυξημένη πίεση, κόπωση, εξέλκωση του στόματος, αποτρίχωση και λοιμώξεις. Όταν αυξηθεί η δόση (4-8 Gy), τα συμπτώματα είναι σφοδρότερα στην πρόδρομη περίοδο αλλά και στην περίοδο εκδήλωσης του συνδρόμου, με αυξημένη πιθανότητα θανάτου λόγω αιμορραγίας.

- Γαστρεντερικό σύνδρομο: Η εκδήλωσή του παρατηρείται σε δόσεις 6-10Gy, όπου πέρα του συνδρόμου του αιμοποιητικού προκαλείται αφυδάτωση και καταπληξία του κυκλοφορικού που οδηγούν στην κατάληξη του ασθενή.
- Σύνδρομο του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος (Κ.Ν.Σ.): Εμφανίζεται σε δόσεις άνω των 10 Gy και εκδηλώνεται με ακατάσχετη ναυτία και έμετο, σύγχυση, σπασμούς, κόμα, και οδηγεί σε θάνατο σε λίγες μόνο ημέρες.

Σύμφωνα με τον οργανισμό ICRP, για απορροφούμενη δόση μέχρι 100mGy υπάρχει σχεδόν μηδαμινή πιθανότητα οποιοσδήποτε ιστός να ή όργανο να εκδηλώσει την οποιαδήποτε αντίδραση ή βλάβη. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει τόσο για χαμηλές ακαριαίες εφάπαξ δόσεις, όσο και χαμηλές δόσεις χορηγούμενες τμηματικά.

3.9.2. Στοχαστικά αποτελέσματα

Σαν πηγές πληροφόρησης για την πρόκληση των στοχαστικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούμε:

1. Στατιστικές μελέτες σε πληθυσμούς ανθρώπων που σε παρελθοντικό χρόνο είχαν εκτεθεί σε ακτινοβολία (επιδημιολογία)
2. Την πειραματική ακτινοβιολογία, δηλαδή αποτελέσματα μελετών σε ζώα και φυτά
3. Μελέτες σε κύτταρα και κυτταρικές συνιστώσες (κυτταρική και μοριακή βιολογία)

Επιδημιολογία είναι η επιστήμη που μελετά την επίδραση της έκθεσης σε ακτινοβολία στη ζωή και την υγεία των ανθρώπων. Αντίστοιχα, η πειραματική ακτινοβιολογία, ασχολείται με την επίδραση της ακτινοβολίας στα ζώα και τα φυτά και τέλος, η κυτταρική και η μοριακή βιολογία ερευνούν τους κυτταρικούς και μοριακούς μηχανισμούς που εμπλέκονται και απαντούν στην έκθεση σε ακτινοβολία. Τέτοιοι είναι οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τις επιμέρους κυτταρικές συνιστώσες και της πρόκλησης μεταλλάξεων στο DNA και οι μηχανισμοί της διαδικασίας απόκρισης και στη συνέχεια επιδιόρθωσης του μεμονωμένου κυττάρου σε βλάβες στο DNA. Η τελευταία διαδικασία είναι πολύ σημαντική για την πιθανότητα ανάπτυξης του καρκίνου, μεταγενέστερα.

Σήμερα, η επικρατούσα άποψη σχετικά με τα στοχαστικά αποτελέσματα είναι ό,τι η πιθανότητα εμφάνισής τους αυξάνει ευθέως ανάλογα με το μέγεθος της δόσης της

ακτινοβολίας που δέχθηκε το σωματικό κύτταρο που μεταλλάχθηκε αρχικά και για την εμφάνισή τους δεν απαιτείται υπέρβαση της δόσης κατωφλίου όπως συμβαίνει στα αποτελέσματα και η βαρύτητα του αποτελέσματος δεν εξαρτάται από την δόση της ακτινοβολίας που δέχθηκε το σωματικό κύτταρο που αρχικά μεταλλάχθηκε.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8, η πιθανότητα εμφάνισης του στοχαστικού αποτελέσματος από τη δόση ακτινοβολίας αποδίδεται με γραμμικό χωρίς κατώφλι - δόσης μαθηματικό πρότυπο (LNT), ενώ η βαρύτητα του στοχαστικού αποτελέσματος δεν εξαρτάται από την δόση της ακτινοβολίας.

3.10. Επιδημιολογία και στοχαστικά αποτελέσματα

Σήμερα, υπάρχει πλήθος δεδομένων προερχόμενο από μεγάλες επιδημιολογικές μελέτες σε πληθυσμούς που εκτέθηκαν για διάφορους λόγους σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Τα δεδομένα αυτά αποδεικνύουν την άμεση σχέση της ακτινοβολίας με την αύξηση της επίπτωσης του καρκίνου στον πληθυσμό, για δόσεις μεγαλύτερες από 200 mSv. Παράλληλα, από πειραματικές μελέτες σε κύτταρα και πειραματόζωα, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις για πιθανή αύξηση της επίπτωσης του καρκίνου, για δόσεις ακτινοβολίας μικρότερες των 100 mSv. Τελικά, αυτό που διαπιστώθηκε είναι πως η στατιστική αβεβαιότητα αυξάνει με τη μείωση της δόσης.

Η επιδημιολογική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πληθυσμούς που εκτέθηκαν σε μεγάλες ή μικρές δόσεις ακτινοβολίας, όπως:

Μεγάλες και εφάπαξ δόσεις ακτινοβολίας (υψηλοί ρυθμοί δόσης):

1. Θύματα από την χρήση των ατομικών βομβών (π.χ. Hiroshima και Nagasaki στην Ιαπωνία το 1946)
2. Ο πληθυσμός της ευρύτερης περιοχής του τόπου πυρηνικών δοκιμών (π.χ. διαμένοντες προ του 1962 στην περιοχή της Nevada στις Ηνωμένες Πολιτείες)
3. Οι ευρύτερες περιοχές μεγάλων πυρηνικών ατυχημάτων (π.χ. διαμένοντες στην περιοχή γύρω από τον αντιδραστήρα στο Chernobyl στην Ουκρανία - ατύχημα το 1986)
4. Άτομα-ασθενής που υποβλήθηκαν σε ακτινοθεραπεία κατά το παρελθόν για ασθένειες που σήμερα αντιμετωπίζονται με διαφορετική θεραπευτική προσέγγιση.

Χαμηλές χρόνιες δόσεις ακτινοβολίας (χαμηλοί ρυθμοί δόσης):

1. Επαγγελματική έκθεση (π.χ. ακτινολόγοι, εργαζόμενοι σε εναέρια μέσα μεταφοράς, αστροναύτες, εργάτες σε ορυχεία ουρανίου, κ.ά.)
2. Παραμονή σε μολυσμένες περιοχές (π.χ. διαμένοντες σε περιοχή του ποταμού που είναι ρυπασμένη από τη λειτουργία παρακείμενης πυρηνικής εγκατάστασης)
3. Περιβαλλοντική έκθεση (π.χ. διαβίωση σε περιοχές με υψηλά επίπεδα φυσικής ακτινοβολίας όπως περιοχές με μεγάλο υψόμετρο ή σε περιοχές πλησίον των πόλων καθώς και η παραμονή σε κατοικίες με σχετικά υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου).

Οι περισσότερες επιδημιολογικές μελέτες θεωρούνται στατιστικά αδύναμες για να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη σύνδεση της δόση ακτινοβολίας με τα στοχαστικά αποτελέσματα. Οι λόγοι μπορεί να είναι το μικρό στατιστικό δείγμα, τα περιορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου δείγματος (ηλικία, φύλλο, επάγγελμα, κ.ά.), η χρονική διάρκεια που διαρκεί η μελέτη, ο συσχετισμός με άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την δημιουργία καρκίνου (τρόπος ζωής, περιβάλλον διαμονής, πρότερη κατάσταση της υγείας τους κ.λ.π), η έλλειψη δεδομένων δοσιμετρίας και η αμφισβητούμενη μέθοδος δοσιμετρίας, που χρησιμοποιείται. Αποτέλεσμα αυτών είναι οι μελέτες αυτές να παρουσιάζουν αποκλίνοντα και αλληλοσυγκρουόμενα αποτελέσματα, μεταξύ τους. Οι στατιστικές αβεβαιότητες στα επιδημιολογικά δεδομένα, όπως είναι φυσικό μεγαλώνουν με τη μείωση της δόσης και αυξάνει η αμφισβήτηση για δόσεις μικρότερες της τάξης των 100mSv. Οι δόσεις στην περιοχή αυτή μπορούν να συγκριθούν με αυτές που δέχεται κατά μέσο όρο, στην διάρκεια της ζωής του, ένας άνθρωπος εξαιτίας της ακτινοβολίας που λαμβάνει φυσικά από το περιβάλλον (μέση ετήσια ενεργός δόση = 2.4mSv). Στην περιοχή των χαμηλών δόσεων, είναι αδύνατον να διαχωριστούν οι καρκίνοι λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία από αυτούς που προκλήθηκαν από άλλους γνωστούς παράγοντες μετάλλαξης.

3.11. Επιδημιολογική μελέτη των επιζώντων από την έκρηξη των ατομικών βομβών στη Hiroshima και το Nagasaki

Η πιο έγκυρη επιδημιολογική μελέτη που σχετίζεται με τις βιολογικές επιδράσεις στην έκθεση στην ακτινοβολία, είναι αυτή που αφορά στους επιζήσαντες μετά την έκρηξη των δύο ατομικών βομβών, στη Hiroshima και το Nagasaki της Ιαπωνίας, το 1946.

Έγινε συνεχόμενη μελέτη η οποία διήρκεσε καθ' όλη την διάρκεια της ζωής των ατόμων που επέζησαν από τις εκρήξεις των ατομικών βομβών, που ανέρχονται στα

100.000 (Life Span Study ή LSS). Η μελέτη έχει μεγάλη στατιστική ισχύ λόγω του ό,τι ο υπό μελέτη πληθυσμός αφορά σε όλες τις ηλικίες και στα δύο φύλα και η χρονική περίοδος παρακολούθησης του δείγματος-πληθυσμού ξεπερνάει τα 60 έτη.

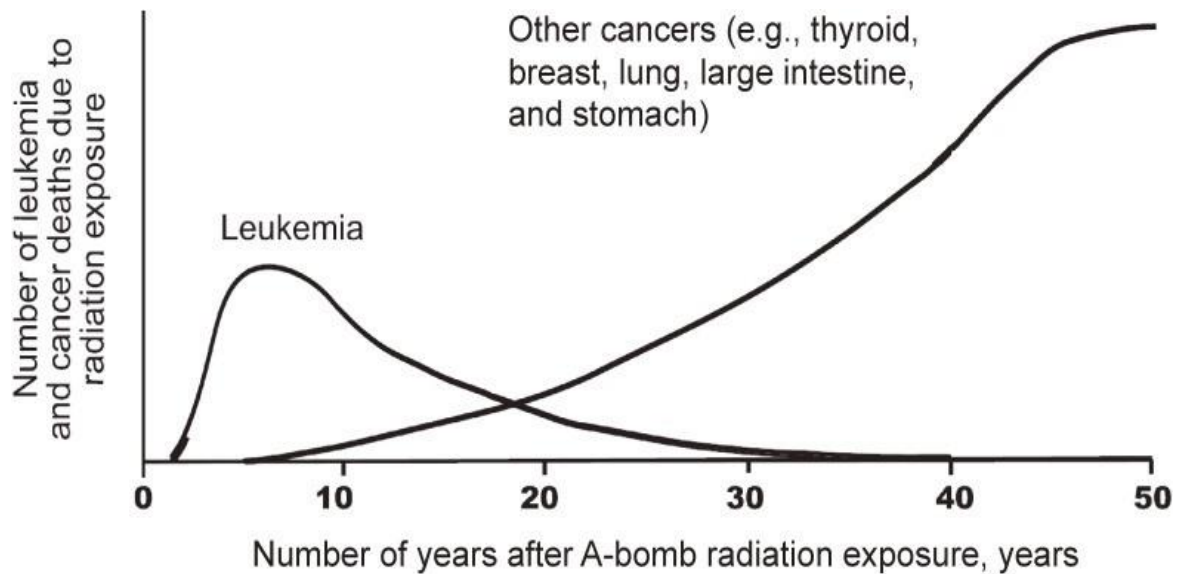
Οι κάτοικοι των περιοχών αυτών, έλαβαν μεγάλο εύρος δόσεων ακτινοβολίας ($0 \leq D \leq 6$ Sv), με μέση τιμή τα 0.24 Sv, ενώ 30.000 από τα άτομα έλαβαν δόσεις από 5-100mSv.

Όταν οι δόσεις είναι μεγαλύτερες από 200mSv, η μελέτη μπορεί να παρέχει αποτελέσματα με αδιαμφισβήτητη στατιστική ισχύ. Έτσι, εξάγουμε ασφαλή ποσοτικά συμπεράσματα της σχέσης μεταξύ της δόσης της ακτινοβολίας και την πιθανότητα καρκινογένεσης.

Αντιθέτως, όταν οι δόσεις είναι της τάξης των 100mSv ή και μικρότερες, η μελέτη δεν έχει στατιστική ισχύ και ενώ συμπεριλαμβάνεται δείγμα 30.000 ατόμων που εκτέθηκαν σε αυτό το εύρος δόσεων. Άρα δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για το τι συμβαίνει στην περιοχή των χαμηλών δόσεων. Σε συνδυασμό όμως με άλλες μελέτες και πειράματα, τα αποτελέσματα αυτά μας προσφέρουν ενδείξεις ύπαρξης κινδύνου δημιουργία καρκίνου για δόσεις ακτινοβολίας της τάξης των 100 mSv ή χαμηλότερες. Σημειώνουμε ό,τι σε αυτή την περιοχή των δόσεων ανήκουν και οι ιατρικές εκθέσεις σε ακτινοβολία.

3.12. Χρονική εμφάνιση των στοχαστικών αποτελεσμάτων

Η λευχαιμία, το πολλαπλό μυέλωμα, ο καρκίνος του μαστού, του θυρεοειδή, των ωοθηκών, του πνεύμονα, της ουροδόχου κύστης, του στομάχου, του Κ.Ν.Σ. (εκτός του εγκεφάλου) και του οισοφάγου είναι τύποι καρκίνου που έχουν συνδεθεί με την έκθεση σε ακτινοβολία. Από την επιδημιολογική μελέτη των ατόμων που επέζησαν μετά την έκρηξη των δύο ατομικών βομβών, στη Hiroshima και το Nagasaki, έχουμε συσχετίσει την χρονική εμφάνιση των στοχαστικών αποτελεσμάτων με τον χρόνο της έκθεσής τους στην ακτινοβολία.

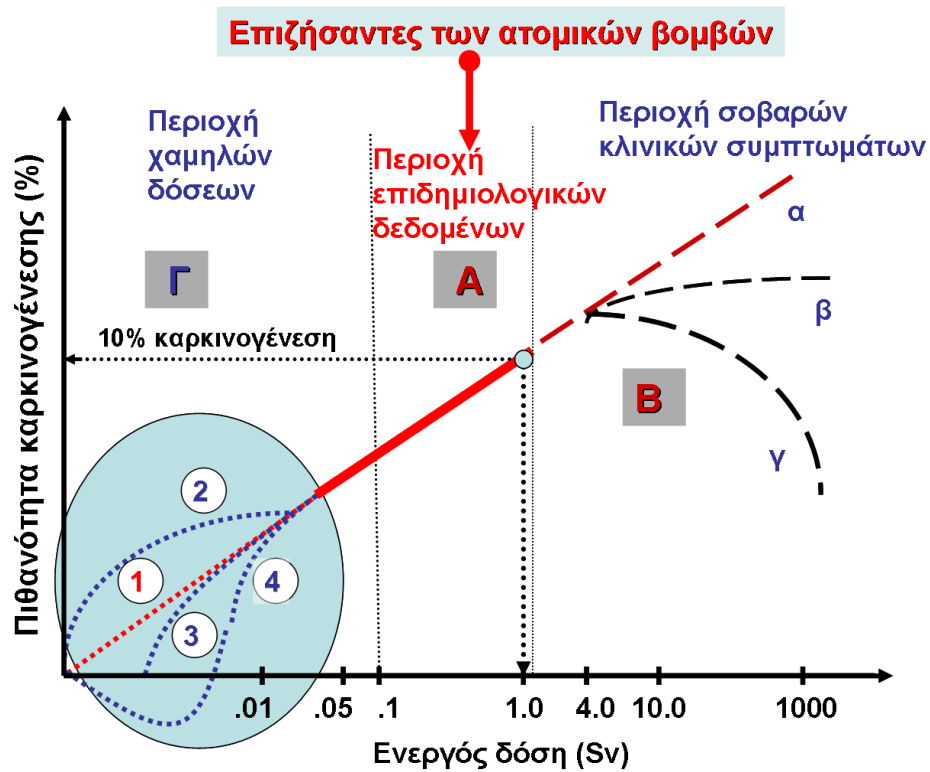


Εικόνα 3.9: Η συχνότητα εμφάνισης της λευχαιμίας και των συμπαγών καρκινικών όγκων στους επιζήσαντες και στους απογόνους τους των δύο ατομικών βομβών, σε σχέση με το χρόνο σε έτη από την ημερομηνία της έκρηξης.

(Πηγή: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5865006/>)

Παρατηρούμε ότι για την λευχαιμία, ο λανθάνων χρόνος εμφάνισης μετά την έκθεση είναι περίπου δύο έτη και το φαινόμενο κορυφώνεται σε 7-8 έτη μετά από αυτήν. Αντιθέτως στους καρκινικούς όγκους, ο λανθάνων χρόνος εμφάνισης είναι το λιγότερο 10 έτη, ενώ κορυφώνεται η εμφάνισης της νόσου σε 40-50 έτη μετά την έκθεση. Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται κατανοητό ότι μια επιδημιολογική μελέτη για τις επιπτώσεις των ακτινοβολιών στην ανθρώπινη υγεία, πρέπει να διαρκεί τουλάχιστον 40 - 50 έτη για να μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.

3.13. Επιδημιολογία και εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης της πιθανότητας εμφάνισης καρκινογένεσης με την ενεργό δόση, ως αποτελέσματα της επιδημιολογικής διαβίου μελέτης (LSS), όσων επέζησαν της έκρηξης των ατομικών βομβών (Hiroshima & Nagasaki).

(Πηγή: <https://www.eeae.gr>)

Διακρίνονται τρεις περιοχές:

- Την περιοχή Α των μεγάλων ακαριαίων δόσεων (> 200mSv), πιο χαμηλών όμως της δόσης κατωφλίου για τα καθορισμένα αποτελέσματα. Για την περιοχή αυτή, η μελέτη έχει στατιστική ισχύ και μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.
- Την περιοχή Β των πολύ μεγάλων ακαριαίων δόσεων, μεγαλύτερων από την δόση κατωφλίου για τα καθορισμένα αποτελέσματα (1-2Sv). Στη μελέτη για κίνδυνο δημιουργίας καρκίνου, πρέπει να συνυπολογίσουμε την παθογένεια του ιστού (άμεση αντίδραση των ιστών, εμφάνιση σοβαρών κλινικών συμπτωμάτων).
- Την περιοχή Γ μικρών δόσεων, δηλαδή μικρότερων ή ίσων με 100mSv, όπου η επιδημιολογική μελέτη δεν έχει στατιστική ισχύ και δεν μπορούμε να εξάγουμε

ασφαλή συμπεράσματα. Με άλλα λόγια υπάρχουν ενδείξεις και όχι αποδείξεις για τις επιπτώσεις, μικρών σχετικά δόσεων ακτινοβολίας, στην ανθρώπινη υγεία.

Στην περιοχή Α, τα αποτελέσματα της μελέτης για την καρκινογένεση, αποδίδονται γραφικά, με το συμπαγές κόκκινο τμήμα της ευθείας γραμμής. Βεβαιώνεται η πρόσθετη πιθανότητα εμφάνισης λευχαιμίας ή καρκινογένεσης εξαιτίας της έκθεσης σε ακτινοβολία η οποία είναι ευθέως ανάλογη της τιμής της ενεργού δόσης και τα δυο μεγέθη, συνδέονται με γραμμική μαθηματική σχέση.

Από την κλίση της ευθείας, μπορούμε να δούμε, το πόσο μεταβάλλεται η πιθανότητα εμφάνισης καρκινογένεσης ανά μονάδα ενεργού δόσης (εκφρασμένη επί τοις εκατό ανά Sv).

Με βάση τα επιδημιολογικά δεδομένα της μελέτης για την περιοχή Α, έχει εκτιμηθεί η πιθανότητα εμφάνισης των στοχαστικών αποτελεσμάτων στο σύνολο του πληθυσμού (0 – 85 ετών), για μεγάλες ακαριαίες δόσεις ακτινοβολίας (ICRP 103, 2007). Οι τιμές είναι σταθμισμένες ως προς το φύλλο και την ηλικία του εκτιθέμενου ατόμου. Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε την αυξημένη μέση πιθανότητα εμφάνισης θανατηφόρων συμπαγών όγκων για τις γυναίκες εν συγκρίσει με τους άνδρες (13% έναντι 9%). Οι διαφορές μεταξύ ανδρών και γυναικών οφείλονται στην αυξημένη πιθανότητα της εμφάνισης του καρκίνου μαστού και της μήτρας.

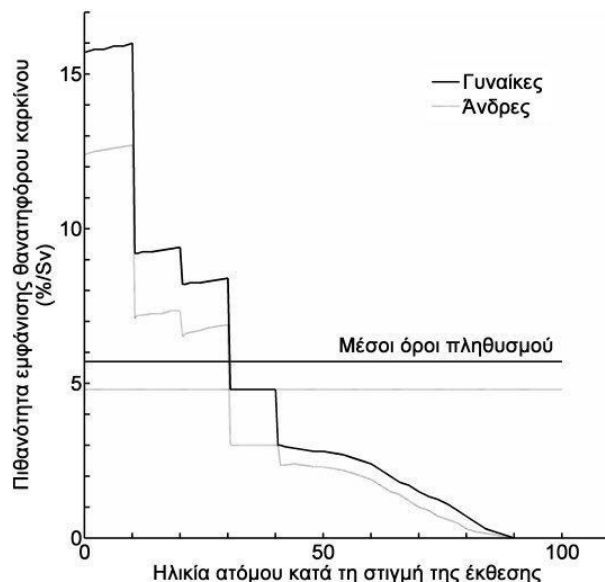
Στοχαστικό αποτέλεσμα	Μέση πιθανότητα εμφάνισης* (% ανά Sv)
Λευχαιμία	~0.9
Θανατηφόροι συμπαγείς καρκινικοί όγκοι	~11.00 **

* σταθμισμένη ως προς το φύλλο και την ηλικία

** ~9% για τους άνδρες & ~13% για τις γυναίκες

Πίνακας 3.6: Συγκεντρωτικός πίνακας με την μέση πιθανότητα εμφάνισης διάφορων μορφών καρκίνου.

Στο παρακάτω σχήμα, αποδίδεται γραφικά η τιμή της πιθανότητας εμφάνισης θανατηφόρου καρκίνου (%/Sv), συναρτήσει της ηλικίας του ατόμου κατά την στιγμή της έκθεσης.



Εικόνα 3.10: Κίνδυνος καρκινογένεσης (% ανά mSv), συναρτήσει της ηλικίας του ατόμου κατά τη στιγμή της έκθεσης σε ακτινοβολία (βάσει δεδομένων της ICRP60 (1991)).

Από το ανωτέρω, βλέπουμε ότι η πιθανότητα εμφάνισης θανατηφόρου καρκίνου (% ανά Sv) για τα παιδιά ηλικίας από 0 έως 1 έτους, είναι κατά 3 έως 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των ενηλίκων. Τα ευρήματα αυτά λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τις διαδικασίες της παιδιατρικής ακτινολογίας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης είναι αρκετά αισιόδοξα όσον αφορά στην πιθανότητα εμφάνισης των κληρονομουμένων βλαβών. Δεν υπάρχουν άμεσες επιδημιολογικές ενδείξεις ύπαρξης πιθανότητας εμφάνισης κληρονομουμένων βλαβών στον άνθρωπο, δεδομένα που προέκυψαν από τη δεύτερη γενιά των απογόνων των θυμάτων. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι με την πάροδο του χρόνου, γίνεται ανάμειξη πληθυσμών των θυμάτων και των απογόνων τους με άλλα άτομα τα οποία δεν έχουν εκτεθεί.

Στοχαστικό αποτέλεσμα	Μέση πιθανότητα εμφάνισης (% ανά mSv)
Λευχαιμία	~0.0005%
Θανατηφόροι συμπαγείς καρκινικοί όγκοι	~0.0055% *
Κληρονομήσιμες βλάβες	~0.0002%

* ~0.0045% για τους άνδρες & ~0.0065% για τις γυναίκες

Πίνακας 3.7: Η ποσοτική εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης κληρονομικών βλαβών, σταθμισμένη ως προς το φύλο και την ηλικία.

Για την περιοχή B του ανωτέρω σχήματος, οι δόσεις είναι μεγαλύτερες της δόσης κατωφλίου (0.5 – 1 Sv), στα δεδομένα υπεισέρχεται και ο παράγοντας των άμεσων αντιδράσεων των ιστών πέραν των κυτταρικών μεταλλάξεων. Ο ιστός ή το όργανο εμφανίζει παθολογία, αφού θανατώνεται ένας μεγάλος αριθμός κυττάρων. Όπως είναι λογικό, τα κύτταρα αυτά δεν θα συμβάλλουν μετέπειτα στη διαδικασία της καρκινογένεσης και κατά συνέπεια, στην περιοχή αυτή μειώνεται η πιθανότητα ανά Sv του σχηματισμού καρκίνου, σε σύγκριση με την τιμή της στην περιοχή A. Αυτό αποτυπώνεται με την προς τα κάτω στροφή της διακεκομμένης καμπύλης (β).

Ερευνητικά έχει αποδειχτεί ότι υπάρχουν και άτομα που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ακτινοβολία κάτι που αποδίδεται σε γενετική προδιάθεση των ατόμων αυτών και αφορά τόσο στις αντιδράσεις των ιστών, όσον και στην πιθανότητα καρκινογένεσης. Για αυτά τα άτομα, η πιθανότητα καρκινογένεσης με την αύξηση της δόσης, εκφράζεται γραφικά με μια στροφή πιο έντονη από την καμπύλη (β), με την καμπύλη (γ), της περιοχής B.

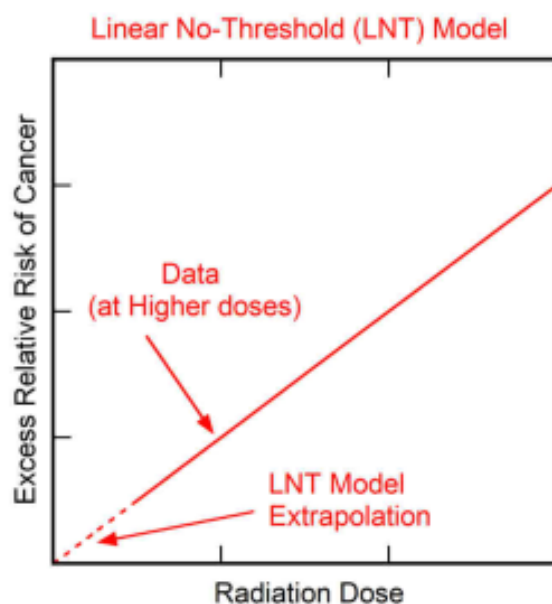
Στην περιοχή Γ του ανωτέρω σχήματος ή αλλιώς περιοχή των χαμηλών δόσεων και χαμηλών ρυθμών δόσεων ακτινοβολίας (<100mSv), υπάρχει μόνο θεωρητική προσέγγιση της πιθανότητας εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων συναρτήσει της δόσης, με βάση:

1. τις γνώσεις που έχουμε για την περιοχή των υψηλών δόσεων και υψηλών ρυθμών δόσεων
2. τις σημαντικές ενδείξεις που υπάρχουν για την περιοχή Γ

3. τα ακτινοβιολογικά δεδομένα σε κύτταρα και πειραματόζωα

Από τα παραπάνω εκτιμάται κατ' αρχήν ότι παρατηρείται μείωση κατά ~50% στην πιθανότητα εμφάνισης στοχαστικών αποτελεσμάτων, σε σχέση πάντα με αυτήν που έχει εκτιμηθεί από επιδημιολογικά δεδομένα για την περιοχή Α των υψηλών δόσεων και υψηλών ρυθμών δόσεων. Σε αυτές τις δόσεις ακτινοβολίας (που είναι συγκρίσιμοι με αυτούς του υποβάθρου της φυσικής ακτινοβολίας του περιβάλλοντος), οι μηχανισμοί επιδιόρθωσης των κυτταρικών βλαβών, είναι καλύτερα προσαρμοσμένοι.

Η υπόθεση του μαθηματικού γραμμικού πρότυπου πιθανότητας - δόσης, χωρίς κατώφλι δόσης (Linear no-threshold model-LNT), είναι η επικρατούσα σήμερα άποψη, για χαμηλές δόσεις και χαμηλούς ρυθμούς δόσεων. Δεχόμαστε ό,τι η γραμμικότητα της συνάρτησης της περιοχής Α, που συνδέει την πιθανότητα εμφάνισης θανατηφόρου καρκίνου με τη δόση των μεγάλων ακαριαίων δόσεων, μπορεί να προεκταθεί και στην αντίστοιχη περιοχή των χαμηλών δόσεων, στην περιοχή Γ. Χρησιμοποιείται ένας συντελεστής, για την μεταφορά προσεγγιστικά της γραμμικής συνάρτησης της περιοχής Α στην περιοχή Γ, που ονομάζεται συντελεστής Αποτελεσματικότητας Δόσης και Ρυθμού Δόσης ή DDREF (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor). Ο συντελεστής αυτός συσχετίζει το βιολογικό αποτέλεσμα που αναμένουμε στην περιοχή χαμηλών δόσεων και χαμηλών ρυθμών δόσης με την περιοχή βιολογικό αποτέλεσμα των υψηλών. Η μέση τιμή του συντελεστή μείωσης DDREF=2. Η LNT υπόθεση, απεικονίζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3.11). Η κλίση της ευθείας γραμμής, ισούται με 0.0055% ανά mSv, δηλαδή περίπου με το μισό της κλίσης στην περιοχή Α.

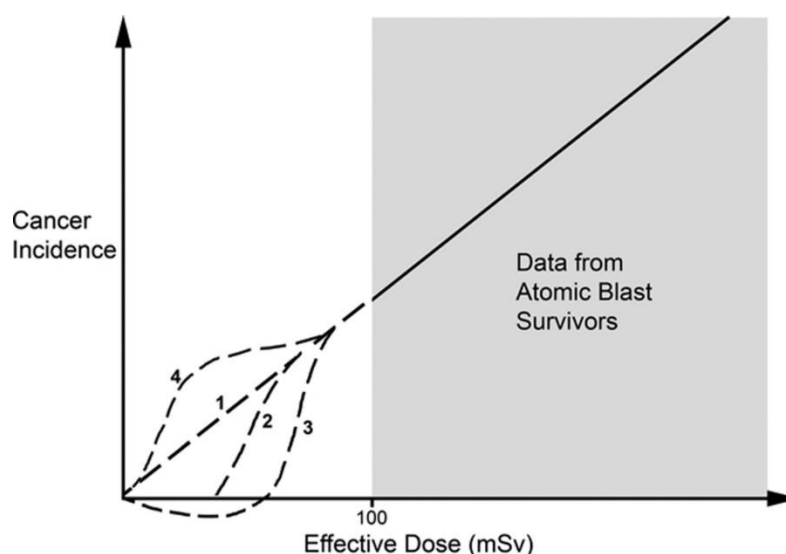


Εικόνα 3.11: Η υπόθεση Linear no-threshold model για δόσεις ακτινοβολίας μικρότερες των 200mSv με βάση τα στατιστικά αποτελέσματα της επιδημιολογικής διαβίου μελέτης.

(Πηγή: <http://chapter.aapm.org/rockymtn/images/doss.pdf>)

Παρατηρούμε ότι οι ανωτέρω τιμές ισούνται αριθμητικά με το 50% των αντιστοίχων τιμών για την περιοχή των υψηλών δόσεων. Η μέση πιθανότητα εμφάνισης θανατηφόρων καρκινικών όγκων, είναι προσεγγιστικά 0.005% ανά mSv.

Αυτή η περιοχή των χαμηλών δόσεων και χαμηλών ρυθμών δόσεων ακτινοβολίας (<100mSv), παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για την ιατρική. Για να υποβληθεί ο ασθενής σε διαγνωστικές εξετάσεις, πρέπει να εκτεθεί σε δόσεις ακτινοβολίας που κυμαίνονται από μερικά μSv για την απλή ακτινογραφία θώρακος μέχρι μερικές δεκάδες mSv για την αξονική τομογραφία θώρακος (10mSv). Κάνοντας χρήση του ανωτέρω πίνακα, μπορούμε να εκτιμήσουμε την επικινδυνότητα καρκινογένεσης που ενέχουν οι διάφορες ακτινολογικές εξετάσεις. Υπολογίζεται ότι σε ένα σύνολο 100.000 ατόμων, που υποβάλλονται σε αξονική τομογραφία θώρακος, θα παρουσιάσουν θανατηφόρο καρκίνο, αποδιδόμενο μόνο στην παραπάνω έκθεση, 50 από τα άτομα αυτά, κατά τη διάρκεια της ζωής τους (ανεξαρτήτως φύλλου και ηλικίας). Ο αριθμός αυτός είναι πολύ μικρός αν συγκριθεί με τον αριθμό που αναμένεται να πεθάνουν από καρκίνο (23.000 άτομα, από το σύνολο των 100.000 και συνυπολογίζοντας ότι η φυσιολογική επίπτωση του θανατηφόρου καρκίνου στο γενικό πληθυσμό είναι της τάξης του 23%). Αν και το ποσοστό είναι πολύ μικρό, είναι απαραίτητο και πρέπει να συνυπολογίζεται κατά την παραπομπή ενός ατόμου σε τέτοιου είδους διαγνωστική εξέταση.



Εικόνα 3.12: Υπάρχουν στοιχεία από επιζώντες ατομικής έκρηξης για μια γραμμική σχέση μεταξύ δόσης ακτινοβολίας και εμφάνισης καρκίνου πάνω από δόση ακτινοβολίας 100 mSv (συμπαγής γραμμή). Διάφορες υποθέσεις για την παρέκταση του κινδύνου ακτινοβολίας σε χαμηλότερες δόσεις ακτινοβολίας εμφανίζονται ως διακεκομμένες γραμμές. Το μοντέλο LNT (1) είναι ευρύτερα διαδεδομένο, ενώ υπάρχουν και άλλα μοντέλα όπου ενδέχεται να υπάρχει μια κατώτατη δόση κάτω από την οποία η ακτινοβολία είναι αβλαβής (2), προστατευτική (3) ή δυσανάλογα επιβλαβής (4).

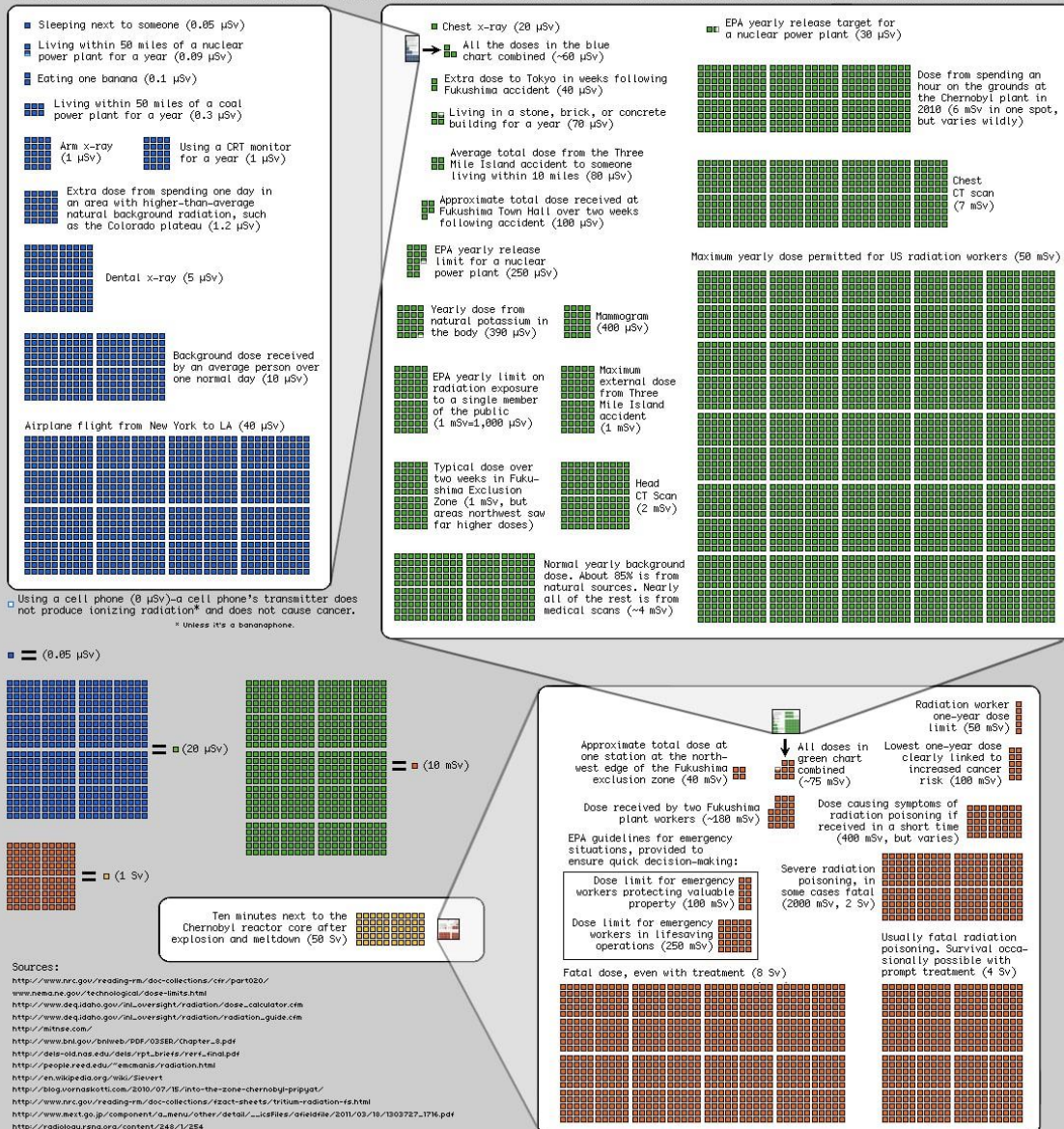
(Πηγή: <https://www.ahajournals.org/doi/full/10.1161/circulationaha.113.005340>)

Το μαθηματικό γραμμικό πρότυπο LNT, έχει υιοθετηθεί από το διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας ICRP 103. Έτσι, για λόγους της προστασίας της υγείας δεχόμαστε ότι, κάθε δόση ακτινοβολίας, όσο μικρή και αν είναι, αποτελεί ενδεχόμενο κίνδυνο πρόκλησης καρκίνου με το μέτρο του να είναι ανάλογο του μεγέθους της δόσης.

Διάφοροι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Οργανισμός Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) ο οποίος είναι μια ανεξάρτητη υπηρεσία της ομοσπονδιακής κυβέρνησης των Ηνωμένων Πολιτειών για την προστασία του περιβάλλοντος, έχουν υπολογίσει την μέση ετήσια δόση ακτινοβολίας στην οποία εκτίθεται ένας κάτοικος του πλανήτη μας, με χρήση διάφορων εργαλείων (μετρητές, υπολογιστικά μοντέλα). Στον πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται κάποια περιπτώσεις έκθεσης καθώς και η αντίστοιχη τιμή λαμβανόμενης δόσης, για να μπορούν να γίνουν και οι ανάλογες συγκρίσεις.

Radiation Dose Chart

This is a chart of the ionizing radiation dose a person can absorb from various sources. The unit for absorbed dose is "sievert" (Sv), and measures the effect a dose of radiation will have on the cells of the body. One sievert (all at once) will make you sick, and too many more will kill you, but we safely absorb small amounts of natural radiation daily. Note: The same number of sieverts absorbed in a shorter time will generally cause more damage, but your cumulative long-term dose plays a big role in things like cancer risk.



Εικόνα 3.13: Πίνακας με διάφορες πηγές ακτινοβολίας και την ποσότητα απορροφούμενης δόσης σε Sievert που λαμβάνουμε. Υπάρχει μια εικόνα από τετράγωνα δίπλα σε κάθε πηγή ακτινοβολίας, η οποία ενεργεί ως αναπαράσταση για ένα ποσό Sievert. Τα μπλε τετράγωνα αντιπροσωπεύουν το καθένα τα 0.05 μSv , τα πράσινα τετράγωνα αντιπροσωπεύουν 20 μSv το καθένα, τα κόκκινα τετράγωνα αντιπροσωπεύουν 10mSv το καθένα και τα κίτρινα τετράγωνα αντιπροσωπεύουν 1Sv το καθένα.

(Πηγή: <https://www.explainxkcd.com/wiki/index.php/Radiation>)

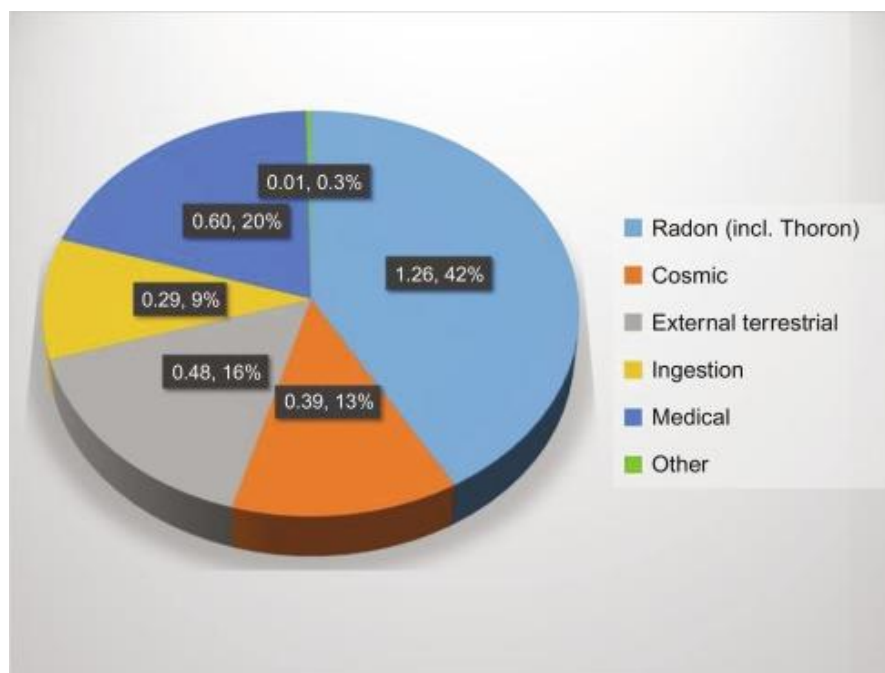
Χαρακτηριστικά αναφέρουμε:

- 0.09 μSv για κάποιον που ζει εντός 50 μιλίων από ένα πυρηνικό εργοστάσιο
- 1 μSv για να πραγματοποιηθεί μια ακτινογραφία άνω άκρου
- 10 μSv η δόση που λαμβάνει ένας άνθρωπος από το περιβάλλον σε μία μέρα
- 20 μSv που λαμβάνουμε όταν πραγματοποιείται μια ακτινογραφία θώρακος (1 στο 1.000.000 κίνδυνος εφ' όρου ζωής για την ανάπτυξη θανατηφόρου καρκίνου)
- 40 μSv η δόση που λαμβάνει ένας επιβάτης της πτήσης από την Νέα Υόρκη στο Λος Άντζελες
- 100 μSv η λαμβανόμενη δόση που δέχεται ένας επιβάτης ταξιδεύοντας από την Αθήνα προς την Νέα Υόρκη
- 300 μSv η μέση ετήσια δόση γ ακτινοβολίας προερχόμενη από το έδαφος
- 350 μSv –μέση ετήσια δόση από την κοσμική ακτινοβολία
- 1000 μSv το ετήσιο όριο της έκθεσης σε ακτινοβολία, για ένα άτομο(EPA) (1 στις 20.000 κίνδυνος εφ' όλου ζωής για την ανάπτυξη καρκίνου)
- 2000 μSv για αξονική εγκεφάλου
- 2230 μSv (2.23 mSv)– μέση ετήσια δόση από το ραδόνιο που υπάρχει στα σπίτια και στον εργασιακούς χώρους
- 7000 μSv για αξονική θώρακος
- 50.000 μSv η ανώτατη επιτρεπόμενη δόση για εργαζόμενους σε επαγγέλματα που εκτίθενται σε ιοντίζουσα ακτινοβολία (ή 100.000 μSv ανά πέντε χρόνια, δηλαδή μέσο ετήσιο όριο τα 20.000 μSv)
- 100.000 μSv το κατώτερο όριο ετήσιας λαμβανόμενης δόσης που συνδέεται με την εμφάνιση καρκίνου (δόση κατωφλίου)
- 180.000 μSv η δόση που έλαβαν οι εργαζόμενοι στα 2 εργοστάσια της Fukushima

Όταν ληφθεί εφάπαξ δόση μεγαλύτερη από τα 1.000.000 μSv (1Sv) τότε προκαλεί άμεσες βλάβες στα ζωτικά όργανα του οργανισμού, από τα 4 Sv υπάρχει 50% πιθανότητα επιβίωσης του εκτεθειμένου ενώ οι δόσεις από τα 6 Sv και πάνω θεωρούνται θανατηφόρες.

3.14. Επιπτώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας στο προσωπικό των αεροσκαφών

Ως γνωστόν, η γη δέχεται ασταμάτητα ακτινοβολία από τον ήλιο αλλά και φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται έξω από το ηλιακό μας σύστημα. Οι κάτοικοι του πλανήτη, στο έδαφος, δέχονται ένα ποσοστό κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνει σε αυτούς (~13 %), στο οποίο είμαστε όλοι εκτεθειμένοι. Επίσης δέχεται ακτινοβολία από το έδαφος (κυρίως ραδόνιο και άλλα ορυχτά) όπως και από την κατανάλωση τροφίμων και νερού.



Εικόνα 3.14: Πηγές και κατανομή της μέσης έκθεσης σε ακτινοβολία.

(Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/annual-effective-dose>)

Η διαφοροποίηση των ποσοστών έκθεσης και η συνολική έκθεση, οφείλεται σε:

- 1) τη γεωγραφική θέση
- 2) τη σύνθεση του εδάφους
- 3) το υψόμετρο.

Οι παράγοντες που καθορίζουν το ποσοστό της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στην ατμόσφαιρα της γης, είναι:

- 1) ο ηλιακός κύκλος
- 2) η ατμόσφαιρα της Γης
- 3) το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο έχουμε διαφοροποίηση της μαγνητόσφαιρας της Γης

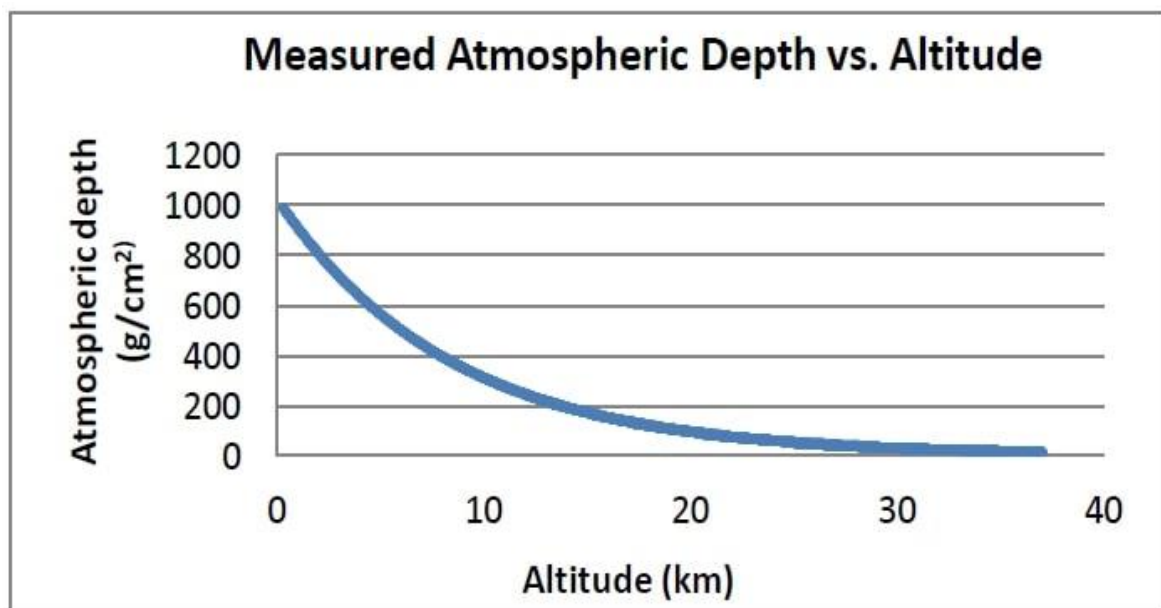
4) το υψόμετρο

Οι επιβάτες και τα πληρώματα αεροσκαφών, λαμβάνουν μια πρόσθετη δόση από την κοσμική ακτινοβολία, σε σχέση με αυτή που λαμβάνει κατά μέσο όρο ένα άτομο στην επιφάνεια της Γης, η οποία εξαρτάται από τη διάρκεια και τη συχνότητα των πτήσεων. Για τα άτομα που ταξιδεύουν σπάνια, η πρόσθετη αυτή έκθεση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Για τα πληρώματα των αεροσκαφών και κάποιους που ταξιδεύουν για επαγγελματικούς λόγους, η ετήσια επιβάρυνση από την έκθεση μπορεί ακόμη και να είναι υψηλότερη από εκείνη των εργαζομένων σε επίγειες βιομηχανίες. Τις πιο υψηλές δόσεις δέχονται τα πληρώματα και οι επιβάτες, όταν ταξιδεύουν σε μακρινές, υπερατλαντικές πτήσεις (ισοδύναμη δόση 50 μSv) με σημαντικότερη την έκθεση σε πτήσεις κοντά στους πόλους, εξαιτίας της ιδιομορφίας του μαγνητικού πεδίου της Γης. Σε πτήσεις μικρής διάρκειας προς την Ευρώπη, οι δόσεις είναι σαφώς χαμηλότερες.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δεχόμαστε από τον Ήλιο δεν έχει σταθερή ροή μέσα αλλά παρατηρούνται κάποια ξεσπάσματα, σε διάφορα μήκη κύματος (ακτίνες γ, X, ραδιοκύματα). Όπως γνωρίζουμε, η ηλιακή δραστηριότητα εμφανίζει μια 11 περιодικότητα (11ετής ηλιακός κύκλος), με το μέγιστο και το ελάχιστο της. Στο μέγιστό της, κάθε έντεκα έτη, τα έντονα ηλιακά φαινόμενα πολλαπλασιάζονται και γίνονται πιο έντονα, όπως ηλιακές εκλάμψεις, στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, SEP κ.ά., που αυξάνουν κατακόρυφα την ακτινοβολία που δέχεται η Γη την περίοδο αυτή και η ένταση της επηρεάζεται έντονα από την ατμόσφαιρα και την μαγνητόσφαιρα της Γης. Τα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας, απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος των κοσμικών σωματιδίων, ενώ η μαγνητόσφαιρα εκτρέπει το σύνολο των σωματιδίων, περισσότερο στον ισημερινό και λιγότερο στους πόλους. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε υψόμετρο περίπου που γίνονται οι πτήσεις επιβατικών αεροσκαφών είναι τρεις φορές πιο μικρή στον ισημερινό εν συγκρίσει με τους πόλους. Ο Ήλιος, όταν εμφανίζει έντονη δραστηριότητα, έχει την ικανότητα να εκτρέψει (με το μαγνητικό του πεδίο) την κοσμική ακτινοβολία να φτάσει στη Γη. Μάλιστα, παρατηρείται μείωση περίπου 40% στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια του ηλιακού μέγιστου. Έχε αποδειχτεί ότι η ηλιακή δραστηριότητα επιδρά σε μικρότερο βαθμό από το υψόμετρο ή το γεωγραφικό πλάτος, στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αν και οι ηλιακές εκλάμψεις, στο σύνολό τους, δεν συμβάλουν σημαντικά στην αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, υπάρχουν γεγονότα όπως τα SEP (Solar energetic particles) ή τα GLE

(ground level enhancement of solar cosmic rays) τα σωματίδια των οποίων έχουν την ενέργεια να αυξήσουν σημαντικά την ένταση και ιδιαίτερα σε υψόμετρο 10-12 χιλιόμετρα, που συνήθως πετούν τα επιβατικά αεροσκάφη. Έτσι, όταν εκδηλώνεται ένα τέτοιο γεγονός, οι επιβάτες και το πλήρωμα των αεροσκαφών, εκτίθενται σε υψηλής έντασης ακτινοβολία, μέρος της οποίας απορροφάτε από τον οργανισμό τους. Έχει μετρηθεί ό,τι σε ένα έντονο πρωτονικό γεγονός (SEP), για μια πτήση 7 ωρών, η ισοδύναμη δόση οχταπλασιάζεται! Για παράδειγμα, από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του GLE 60 στις 15 Απριλίου 2000 (έχουν επίσης πραγματοποιηθεί με τη χρήση φασματομέτρου με βάση το πυρίτιο), αποδείχθηκε ό,τι υπήρξε μια σημαντική αύξηση στην ισοδύναμη δόση, της πτήσης της Πράγας προς Νέα Υόρκη, κατά 44% σε σχέση με την ίδια πτήση που πραγματοποιήθηκε σε ήσυχες συνθήκες [Spurný and Dachev, 2003]. Το υψόμετρο, όπως αναφέραμε πιο πριν, επιδρά σε σημαντικό βαθμό στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Για υψόμετρα που είναι μικρότερα από 15.2 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, η ένταση μειώνεται γρήγορα (EPA, 2016), κυρίως λόγω της εκθετικής μείωσης του ατμοσφαιρικού βάθους (το πάχος της αέριας μάζας πάνω από ένα συγκεκριμένο ύψος) με την αύξηση του υψομέτρου. Έτσι, όσοι ταξιδεύουν συχνά αεροπορικώς ή ανήκουν στο προσωπικό, εκτίθενται στις επιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι το κοινό ή άλλοι εργαζόμενοι.

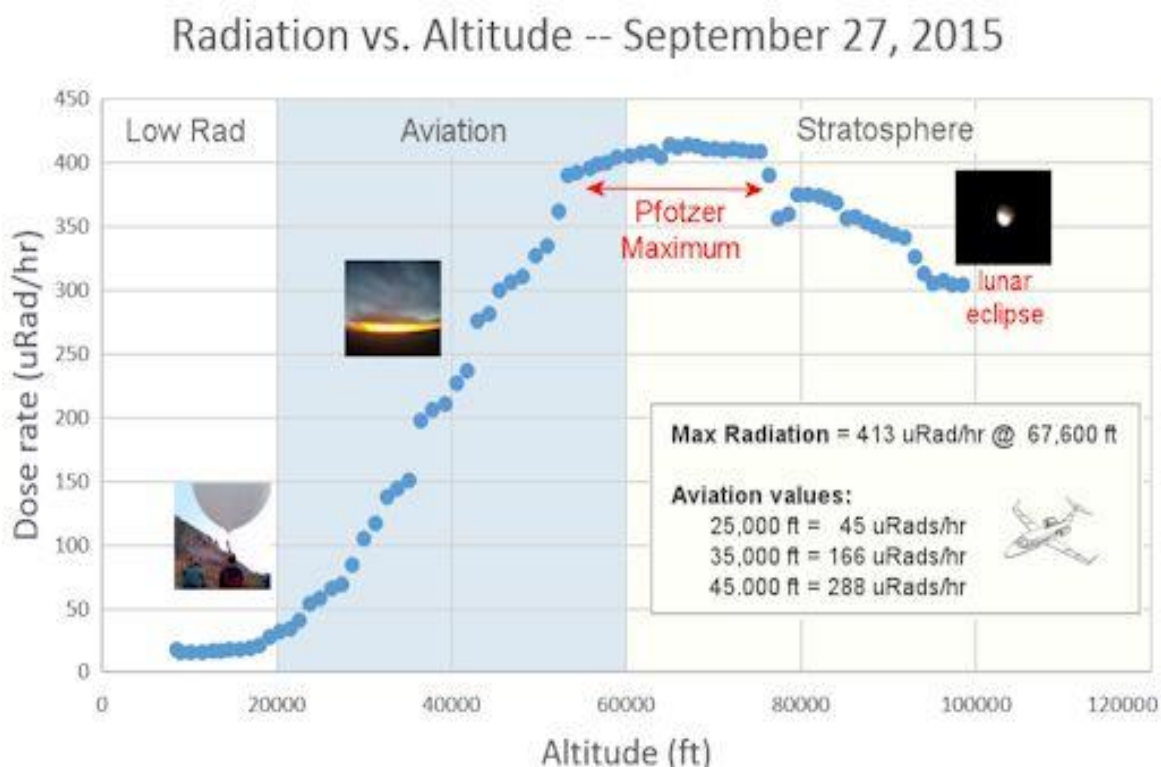
Για να έχουμε μια ιδέα πόσο αποτελεσματικό είναι το ατμοσφαιρικό στρώμα της γης στην «θωράκιση» που μας παρέχει από την κοσμική ακτινοβολία, φτάνει να συγκρίνουμε το ποσό έκθεσης στο επίπεδο της θάλασσας με αυτό σε υψόμετρο 35.000 πόδια ή 10,668km, που συνήθως γίνονται οι επιβατικές πτήσεις. Το ποσοστό έκθεσης, στο επίπεδο της θάλασσας είναι περίπου 0,05 $\mu\text{Sv/h}$, ενώ σε υψόμετρο των 35.000 ποδιών περίπου 6 $\mu\text{Sv/h}$. Όπως βλέπουμε, η διαφορά στο ποσοστό έκθεσης είναι τεράστια και αν κάνουμε την αντιστοιχία θα δούμε πως ισοδυναμεί με σκυρόδεμα πάχους περίπου 4 μέτρων!



Εικόνα 3.15: Μετρούμενο ατμοσφαιρικό βάθος σε σχέση με το υψόμετρο.

(Πηγή: <https://sites.google.com/a/umn.edu/mxp/student-projects/2014---spring/s14timedilation?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>)

Σε υψόμετρο 14 με 25 χιλιομέτρων, στο στρώμα της τροπόπαυσης, τα πρωτογενή σωματίδια μειώνονται και αυξάνονται αντιστοίχως τα δευτερογενή σωματίδια, όπως μίονια, τα οποία έχουν την ικανότητα να προκαλούν ιονισμό στην ατμόσφαιρα και στην ύλη γενικότερα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται μέγιστο Pfotzer και έχει την μέγιστη τιμή της περίπου στα 18 χιλιόμετρα. Εξαιτίας αυτού του μέγιστου, τα αεροσκάφη, για λόγους ασφαλείας, δεν επιτρέπεται να πετούν ή τουλάχιστον να παραμένουν σε αυτό το υψόμετρο, για το λόγο ότι η δόση που δέχονται τα πληρώματα και οι επιβάτες αεροσκαφών, αυξάνεται κατακόρυφα. Αεροσκάφη που πετούν, κατά κύριο λόγο, σε χαμηλό υψόμετρο (κάτω των 8000 μέτρων), δεν μπορούν να εκθέσουν τους εργαζόμενους σε δόσεις πιο υψηλές από 1μSv/year, δόση ανάλογη με αυτή που ορίζεται από τον νόμο για την έκθεση των επιβατών σε ετήσια βάση. Όταν κάποια αεροσκάφη πετούν σε υψόμετρα που εμφανίζεται το μέγιστο Pfotzer, τότε είναι υποχρεωμένα (κανονισμός πολιτικής προστασίας EU-OPS / JAR-OPS 3) να φέρουν μετρητές κοσμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.16: Η συσχέτιση ανάμεσα στον ρυθμό δόσης και υψόμετρου. Από την παράσταση φαίνεται το μέγιστο Pfofzer.

(Πηγή: <https://spaceweatherarchive.com/category/rads-on-a-plane/page/2/>)

Έχει αναπτυχθεί, στο αμερικανικό κέντρο πρόβλεψης διαστημικού καιρού (U.S. Space Weather Prediction Center, ένα πρόγραμμα ειδοποίησης έκτακτων έντονων ηλιακών γεγονότων (ηλιακές εκλάμψεις), όπου χρησιμοποιούνται δεδομένα από επίγειους σταθμούς και δορυφόρους, για την προστασία των πληρωμάτων των αεροσκαφών από την έκθεσή τους σε ασυνήθιστα υψηλής έντασης ακτινοβολία.

Από τα παραπάνω, είναι φανερό, ότι ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου των αεροπορικών πληρωμάτων είναι κάπως μεγαλύτερος σε σχέση με το κοινό. Οι γενετικές ανωμαλίες που μπορεί να περάσουν σε απογόνους καθώς και βλάβη σε έμβρυα, είναι και αυτοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την συστηματική έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Πάντως ο συσχετισμός των επιπτώσεων με την επαγγελματική έκθεση, είναι ακόμα υπό έρευνα.

Ως γνωστόν, τα έμβρυα είναι πολύ ευαίσθητα στην ακτινοβολία και σε μια σειρά άλλων παραγόντων, λόγω του μεγάλου ρυθμού διαίρεσης στον κυττάρων και στην ανάπτυξη ειδικών κυττάρων και ιστών. Γενετικές ανωμαλίες είναι σπάνιο να εκδηλωθούν

εξαιτίας της έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία, σε υψόμετρο που συνήθως γίνονται οι αερομεταφορές, καθώς απαιτείται μεγάλο επίπεδο έκθεσης. Όμως, έστω και σε αυτή την χαμηλή έκθεση, ενδέχεται να αυξηθεί ο κίνδυνος εκδήλωσης καρκίνου, όπως η λευχαιμία, κατά την παιδική ηλικία ή αργότερα. Επειδή υπάρχει υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας όσον αφορά τον κίνδυνο που προκαλείται από την έκθεση σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας, όπως αυτά που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας συνηθισμένης πτήσης, έχουν δημιουργηθεί αρχές ακτινοπροστασίας που προτείνουν ότι η πρόσθετη έκθεση των εμβρύων δεν πρέπει να ξεπερνά το επίπεδο της φυσικής ακτινοβολίας υποβάθρου. Κάνοντας μια αντιστοιχία σε ώρες πτήσεις, είναι περίπου στις 200 ώρες, οπότε όταν δεν γίνει υπέρβαση αυτού του αριθμού, δεν αναμένονται κίνδυνοι για την υγεία των εμβρύων (έκθεση υπ' αριθμόν 84 του ICRP, το 2000).

Η εφάπαξ ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει άμεσες («σύνδρομο ακτινοβολίας») ή μακροπρόθεσμες επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπινου οργανισμού (στοχαστικά ή και καθορισμένα αποτελέσματα). Τα μεγάλης έντασης ηλιακά γεγονότα, προκαλούν άμεσες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία, ενώ οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις οφείλονται κυρίως η χρόνια έκθεση σε χαμηλές δόσεις κοσμικής ακτινοβολίας (γαλαξιακής προέλευσης).στην μακρόχρονη έκθεση στις χαμηλές δόσεις των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Η έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει σειρά αρνητικών επιδράσεων στα πληρώματα των αεροσκαφών, κυρίως, όπως καρδιαγγειακές παθήσεις, παθήσεις του νευρικού συστήματος, εγκεφαλικά επεισόδια, εμφράγματα του μυοκαρδίου, μεταβολές στον καρδιακό ρυθμό και τη συστολική και διαστολική πίεση. Επίσης, πολύ συνηθισμένη είναι η εμφάνιση καταρράκτη και δερματικού μελανώματος. Οπότε, η κοσμική ακτινοβολία, είναι ένας σημαντικός παράγοντας της ομοιόστασης των ανθρώπων. (Mutat Res. et al., 2015).

3.15. Θεσμικά Πλαίσια

Κάθε έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου. Γι' αυτό το λόγο έχουν θεσπιστεί μια σειρά από μέτρα για να περιοριστεί, σε μεγάλο βαθμό, η έκθεση σε αυτή, που μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση στοχαστικών ή μη- στοχαστικών αποτελεσμάτων στην ανθρώπινη υγεία (Αγγελόπουλος και Σακελλίου, 1994). Τα μέτρα προστασίας ή αλλιώς ακτινοπροστασίας, χωρίζονται σε αυτά που αφορούν την εξωτερική και την εσωτερική ακτινοβολία. Η μεν πρώτη, περιλαμβάνει τα μέτρα προστασίας που καθορίζονται από τις παραμέτρους χρόνος, απόσταση και θωράκιση. Η δεύτερη περιορίζεται στην πρόληψη ως μοναδικό μέτρο προστασίας. Ο

χρόνος, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τόσο τον χρόνο όσο και τον ρυθμό έκθεσης, που αμφότερα πρέπει να είναι στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο. Η απόσταση, πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή από την πηγή ακτινοβολίας, ενώ η θωράκιση είναι απαραίτητη για την εξασθένιση της ακτινοβολίας, που τελικά έρχεται σε επαφή με το σώμα μας και απορροφάται.

Οι αρχές ακτινοπροστασίας, όπως δημοσιεύτηκαν στην υπ' αριθμόν 103 έκθεση, από τον οργανισμό ICRP το 2007, είναι:

1. Αρχή της αιτιολόγησης (Justification)

Τα διάφορα είδη πρακτικών με ιοντίζουσες ακτινοβολίες πρέπει να είναι αιτιολογημένα βάσει των κοινωνικοοικονομικών ή άλλων πλεονεκτημάτων που παρέχουν σε σχέση με την βλάβη στην υγεία την οποία μπορεί να προκαλέσουν. Οι μη αιτιολογημένες εκθέσεις απαγορεύονται.

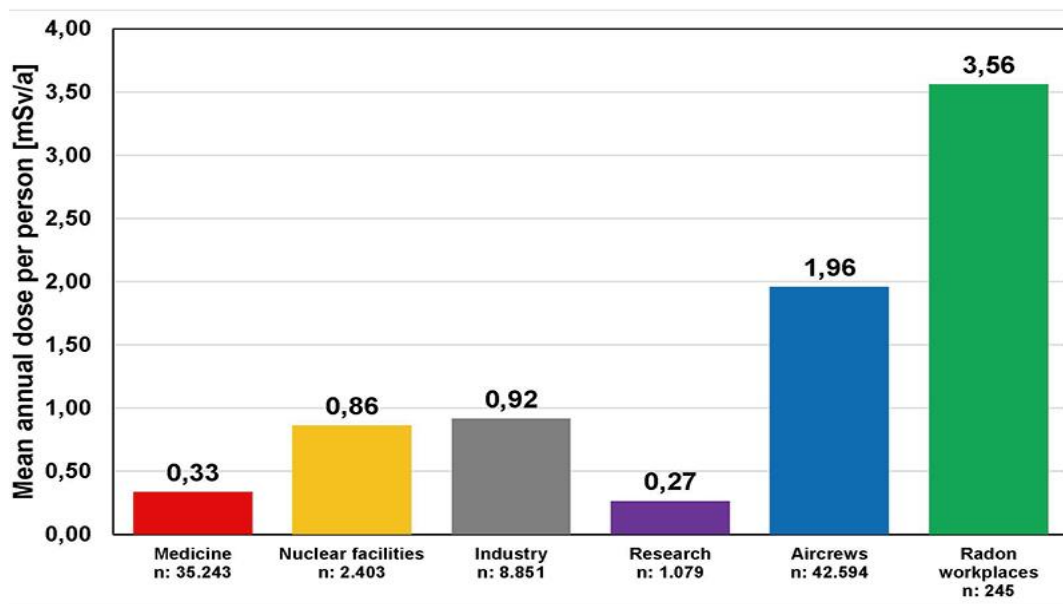
2. Αρχή της βελτιστοποίησης

Κάθε έκθεση πρέπει να προγραμματίζεται ώστε το μέγεθος των συνεπαγομένων δόσεων, ο αριθμός των εκτιθέμενων ατόμων και η πιθανότητα ατυχήματος να διατηρηθούν τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό λαμβάνοντας υπόψη κάθε σχετικό κοινωνικό και οικονομικό παράγοντα (As Low As Reasonably Achievable).

3. Αρχή των ορίων δόσεων (Dose Limits)

Δεν επιτρέπεται υπέρβαση των ορίων δόσεων που καθορίζονται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. καταστάσεις έκτακτης ανάγκης) και αφού ληφθεί υπόψη η Αρχή της Αιτιολόγησης. Η αρχή αυτή δεν ισχύει για τις ιατρικές εκθέσεις.

Έτσι, το 2007, με σύσταση της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας, τα μέλη των πληρωμάτων αεροσκαφών, πρέπει να θεωρούνται ως είδος επαγγελματικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Με βάση αυτό, αναπτύχθηκαν θεωρητικές και πειραματικές μέθοδοι υπολογισμού της φυσικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία σε υψόμετρο που συνήθως πραγματοποιούνται οι αεροπορικές πτήσεις.



Εικόνα 3.17: Μέσες ετήσιες δόσεις ατόμων που εκτίθενται επαγγελματικά σε ακτινοβολία, σε διάφορες επαγγελματικές ομάδες (n = αριθμός ατόμων που εκτίθενται σε ακτινοβολία ανά επαγγελματική ομάδα).

(Πηγή: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/occupation/methodology/air-crew-monitoring.html>)

Το 2011, η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (FAA) θέσπισε νέους κανόνες που αποσκοπούν στη προστασία των πιλότων και των πληρωμάτων. Σύμφωνα με αυτούς, ο πιλότος δεν μπορεί να πετάξει πάνω από 100 ώρες το μήνα και δεν μπορεί να ξεπεράσει τις 1.000 ώρες το χρόνο. Συνυπολογίζοντας ό,τι για τις περισσότερες πτήσεις, η έκθεση δεν είναι μεγαλύτερη από τα 100 μSv ανά πτήση, οι δόσεις που θα δεχθούν τα πληρώματα ετησίως, δεν θα υπερβαίνει τα 10 mSv μετά το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό ωρών πτήσης (European Commission, 2000). Δυστυχώς, δεν έχουμε την δυνατότητα να ελέγξουμε την ροή της κοσμικής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια μιας πτήσης. Μπορούμε όμως να περιορίσουμε τον χρόνο της έκθεσης δηλαδή της διάρκειας του ταξιδιού, όπως επίσης το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος της πτήσης (χαμηλό όσο γίνεται υψόμετρο και με κατεύθυνση προς το νότια πλάτη, για την αποφυγή πρόσθετης ακτινοβολίας στις περιοχές πλησίον των πόλων).

Όσον αφορά τις έγκυες γυναίκες, η Διεθνής Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP) προτείνει ό,τι η επαγγελματική έκθεση μιας εγκύου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1

mSv για όλο το διάστημα της εγκυμοσύνης της. Ακόμα, ένα έμβρυο δεν πρέπει να εκτίθεται σε δόση μεγαλύτερη των 0,5 mSv τον μήνα, με εξαίρεση κάποιες διαγνωστικές εξετάσεις ή λοιπούς ιατρικούς λόγους. Σε κάθε περίπτωση, το έμβρυο, για λόγους ακτινοπροστασίας, πρέπει να θεωρείται ότι εκτίθεται στην ίδια δόση ακτινοβολίας με τη μητέρα, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις, η δόση που λαμβάνει υπερβαίνει τα όρια που συστήνονται.

Το όριο της δόσης του 1mSv είναι αρκετά χαμηλό αν σκεφτούμε το γεγονός ότι σε ένα υπερατλαντικό ταξίδι ,για παράδειγμα, η ισοδύναμη δόση είναι περίπου 60μSv. Οπότε, για 100 ώρες πτήση το μήνα, που είναι το μέγιστο επιτρεπτό όριο, η ισοδύναμη δόση θα είναι 60mSv, πολύ πιο πάνω από το όριο του 1mSv που προτείνεται καθ' όλη την διάρκεια της εγκυμοσύνης. Έτσι, για να μειωθεί η έκθεση μιας εγκύου εργαζομένου σε αεροπορική εταιρία, θα πρέπει η εργασία τους να περιορίζεται σε μικρής διάρκειας πτήσεις, χαμηλού υψόμετρου με το ιδανικότερο την τοποθέτηση τους σε υπηρεσία εδάφους, για όσο διαρκεί η εγκυμοσύνη (CARES, 1998; ICRP, 2000; Butler, 2000; Transport Canada, 2006).

Η αξιολόγηση του ραδιολογικού κινδύνου (radiological risk assessment) είναι μια εκτίμηση της πιθανότητας πρόκλησης θανατηφόρων καρκίνων ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε δόσεις ακτινοβολίας χαμηλού επιπέδου. Είναι, ως εκ τούτου, ιδιαίτερα σημαντικό να διεξάγονται συχνές ακτινολογικές αξιολογήσεις των μελών πληρώματος αεροσκαφών για να αποτρέπεται η άσκοπη έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία στα υψόμετρα πτήσης. Η διοίκηση και το προσωπικό των αεροπορικών επιχειρήσεων υποχρεούνται να διασφαλίσουν ότι τηρείται αρχή της ALARA ώστε να διατηρείται η έκθεση των εργαζομένων στη κοσμική ακτινοβολία "στο κατώτερο εφικτό επίπεδο" ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας (P.I.Enyinna, 2016).

Η κοσμική ακτινοβολία αν και θεωρείται σύνθετη, σε μεγάλο υψόμετρο, μπορεί να μετρηθεί με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού. Η ροή της ακτινοβολίας μέσα στο αεροσκάφος μπορεί να χαρακτηριστεί ομοιόμορφη, οπότε δεν απαιτείται παρακολούθηση για κάθε μέλος του πληρώματος. Υπάρχει βάση δεδομένων από παλαιότερες μετρήσεις δόσεων που εκτίθεται το προσωπικό αεροπορικών εταιριών και προτείνεται η χρησιμοποίησή τους για να υπάρξει πρόβλεψη των δόσεων που θα λάβουν οι εργαζόμενοι, καθώς δεν είναι δυνατόν να γίνει καταγραφή των λαμβανόμενων δόσεων, σε κάθε πτήση. Εδώ, πρέπει να επισημάνουμε τις δυσκολίες στην αντιστοίχιση των δόσεων των πτήσεων, στους εργαζόμενους. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να γίνεται καταγραφή μετρήσεων, τόσο της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του αεροσκάφους όσο και της λαμβανόμενης δόσης

ακτινοβολίας των εργαζομένων, με χρήση ατομικών δοσιμέτρων. Ιδιαίτερα, τα αεροσκάφη που πραγματοποιούν πτήσεις σε υψόμετρο άνω των 15 χιλιομέτρων (50,000 ποδιών), υποχρεούνται να φέρουν εξοπλισμό για την καταγραφή της ακτινοβολίας ή να λαμβάνουν τα δεδομένα από δορυφόρους ή επίγειους σταθμούς, ώστε να λαμβάνονται έκτακτα μέτρα σε μια απότομη αύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω, κυρίως, ηλιακών εκλάμψεων.

Dose Limits Recommended by ICRP		
Type of Dose Limit	Limit on Dose from Occupational Exposure	Limit on Dose from Public Exposure
Effective Dose	20 mSv per year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv After a worker declares a pregnancy, the dose to the embryo/fetus should not exceed about 1 mSv during the remainder of the pregnancy	1 mSv in a year In special circumstances, a higher value could be allowed in a single year, provided that the average over 5 years does not exceed 1 mSv per year
Equivalent Dose to the Lens of the Eye	20 mSv per year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv	15 mSv in a year
Equivalent Dose to the Skin Averaged over 1 cm² of skin regardless of the area exposed	500 mSv in a year	50 mSv in a year
Equivalent Dose to the Hands and Feet	500 mSv in a year	-

Πίνακας 3.8: Τα όρια δόσεων για επαγγελματίες εκτιθέμενους σε ακτινοβολία, από την έκδοση ICRP 103,118.

(Πηγή: http://icrpaedia.org/Dose_limits)

Ο εργασιακός κώδικας, ορίζει τους εργοδότες ως υπεύθυνους για την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων τους στους χώρους εργασίας. Διεθνείς οργανώσεις όπως η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με την προτροπή του ICRP, θέσπισαν ενιαία κριτήρια κάτω από τα οποία οι χώρες μέλη θα οφείλουν να ρυθμίζουν την έκθεση των πληρωμάτων των αεροπορικών εταιρειών σε κοσμική ακτινοβολία. Οι αεροπορικές εταιρείες είναι υποχρεωμένες δια νόμου να προβαίνουν σε αξιολόγηση για την πιθανή έκθεση των πληρωμάτων τους σε κοσμική ακτινοβολία (EPA,2015).

Η αξιολόγηση έχει ως υποχρέωση να εντοπίζει και να ταξινομεί τα πληρώματα των αεροσκαφών σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία:

- Πληρώματα με πιθανή έκθεση σε δόση από 1 mSv μέχρι 6 mSv, σε χρονικό διάστημα 12 μηνών

- Πληρώματα με πιθανή έκθεση σε δόση μεγαλύτερη των 6 mSv, σε χρονικό διάστημα 12 μηνών

Για την πρώτη κατηγορία, η αεροπορική εταιρία, υποχρεούται να προβεί σε μια σειρά ενεργειών, όπως:

- Ενημέρωση των πληρωμάτων για τον ενδεχόμενο κίνδυνο
- Εξατομικευμένη αξιολόγηση της δόσης κάθε μέλους του πληρώματος
- Τήρηση αρχείου με τις αξιολογήσεις των πληρωμάτων
- Διάθεση των αρχείων στα μέλη του πληρώματος τα οποία αφορά
- Ενημέρωση και αποστολή σύνοψης των αρχείων αυτών, στην EPA
- Λήψη απαραίτητων μέτρων για τα μέλη του πληρώματος που είναι σε εγκυμοσύνη

Για την δεύτερη κατηγορία, όπου κάθε πλήρωμα πιθανόν να λάβει δόση μεγαλύτερη από 6mSv ετησίως, επιβάλλεται η λήψη πρόσθετων μέτρων προστασίας (CARES, 1998; Transport Canada, 2006; EPA, 2015), όπως:

- Συστηματική ιατρική παρακολούθηση
- Τακτική παρακολούθηση της δόσης που λαμβάνει
- Διαμόρφωση του προγράμματος για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης
- Δημιουργία ιατρικού ιστορικού καθώς και διατήρηση ιατρικών αρχείων και αρχείων δόσεων των εργαζομένων, μέχρι την ηλικία των 75 ετών

3.16. Μέθοδοι μέτρησης της ακτινοβολίας σε αεροσκάφη

Για να πραγματοποιηθεί μία έγκυρη μέτρηση μεγεθών δοσιμετρίας της κοσμικής ακτινοβολίας, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μερικών ανιχνευτών ή μετρητών που μπορούν να ανταποκριθούν με ακρίβεια στην καταγραφή του πλήθους των διαφορετικών σωματιδίων καθώς και των ενεργειακών χαρακτηριστικών τους, που στο σύνολό τους αποτελούν το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας. Όμως, οι συσκευές-ανιχνευτές αυτοί δεν είναι όλοι κατάλληλοι για να χρησιμοποιηθούν σε μια πτήση ρουτίνας.

Η πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ανιχνευτές που μπορούν να δώσουν τη δόση συνεχώς κατά τη διάρκεια μιας πτήσης είτε με την μορφή ρυθμού της δόσης ανά ώρα ($\mu\text{Sv} / \text{h}$) είτε ως συνολική δόση που δέχεται το πλήρωμα και οι επιβάτες για ολόκληρη τη πτήση (μSv). Τα αποτελέσματα μπορούμε να τα έχουμε στην διάθεση μας αμέσως μετά την πτήση. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αναλογικοί μετρητές ισοδύναμου ιστού

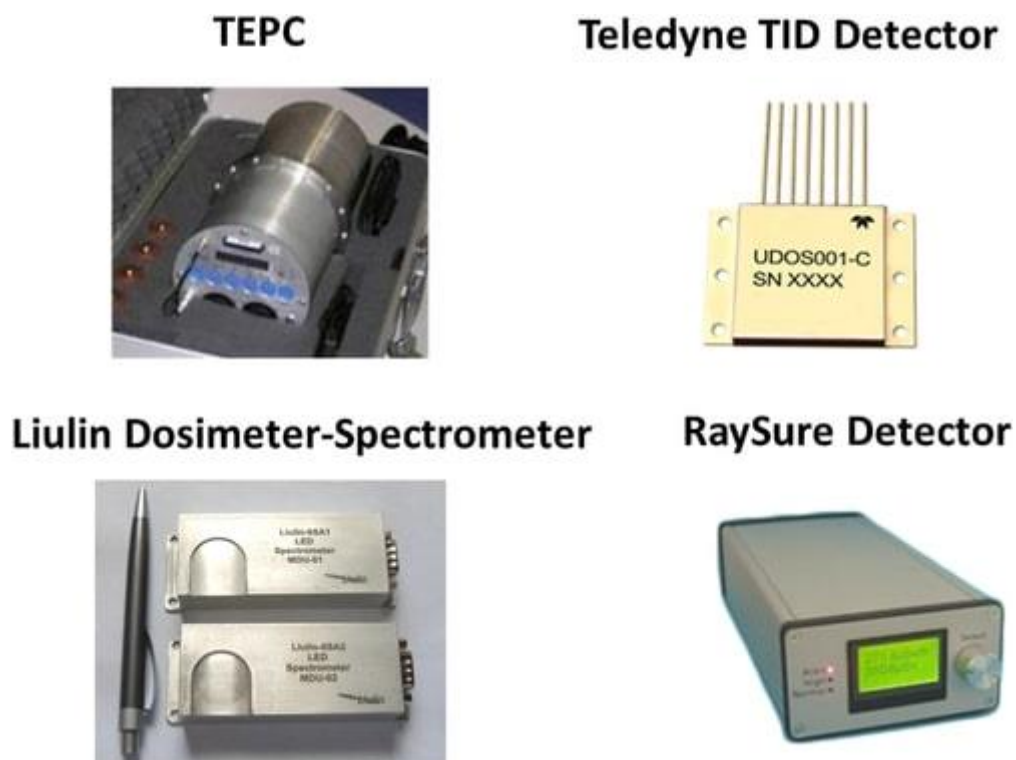
(tissue equivalent proportional counters - TEPCs), οι θάλαμοι ιονισμού (ionization chambers), οι μετρητές νετρονίων, οι μετρητές Geiger-Müller ή οι ανιχνευτές που βασίζονται σε τεχνικές ημιαγωγών (ανιχνεύουν το ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργείται όταν η ιοντίζουσα ακτινοβολία διέρχεται μέσα από ένα υλικό). Οι ανιχνευτές αυτοί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι ως προς την ανίχνευση και εύθραυστοι, γι' αυτό απαιτείται πολύ προσοχή κατά την μεταφορά και την χρήση τους. Επίσης, οι ανιχνευτές για να λειτουργήσουν χρειάζονται παροχή ρεύματος, που μπορεί να είναι είτε κάποια μπαταρία ή ακόμη μπορεί να τροφοδοτηθεί από το αεροσκάφος. Η εγκατάστασή τους ακολουθούν ορισμένες οδηγίες και κανονισμούς που ορίζονται από την κοινοτική υπηρεσία πληροφόρησης για την Έρευνα και την Ανάπτυξη (CORDIS).

Υπάρχουν ανιχνευτές που ο τρόπος λειτουργίας τους είναι να αποθηκεύουν τη δόση που αφήνει ένα σωματίδιο όταν διέρχεται μέσα από τον ανιχνευτή (παθητικοί). με την έννοια ότι αποθηκεύουν τη δόση που αφήνει ένα σωματίδιο όταν διέρχεται μέσα από τον ανιχνευτή. Οι ανιχνευτές αυτοί δεν αποτελούνται από ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συνήθως έχουν μικρό μέγεθος, που καθιστά εύκολη την χρήση τους στο αεροσκάφος (Ambrožová et al., 2011). Όμως, χαρακτηρίζονται από χαμηλή ευαισθησία και συνήθως ή χρησιμοποιείται ένα πλήθος αυτών ή χρησιμοποιούνται σε περισσότερες από μία πτήσεις, για να βελτιωθεί η πιστότητά τους. Οι ανιχνευτές θερμοφωταύγειας ανήκουν σε αυτή την κατηγορία ανιχνευτών (thermoluminescence detectors – TLDs), (Mukherjee et al., 2007; Vuković et al., 2007;). Άλλοι, είναι οι ανιχνευτές φυσαλίδων (bubble detectors) και ανιχνευτές που ανιχνεύουν την τροχιά των σωματιδίων (ένα κοινό υλικό είναι το polyallyl diglycol carbonate-PADC), (Vuković et al., 2007). Ακόμα, έχουν κατασκευαστεί ένα είδος ανιχνευτών για την ανίχνευση της συνιστώσας των νετρονίων υψηλής ακτινοβολίας. Ο τρόπος λειτουργίας βασίζεται στις σχάσεις νετρονίων που προκαλούνται σε κράμα βισμούθιου με χρυσό.

Τα όργανα μετρήσεων δεν ανταποκρίνονται σε όλες τις συνιστώσες της ακτινοβολίας όμως αυτές ενδέχεται να επιδρούν με κάποιο τρόπο που πρέπει να είναι κατανοητός για να μπορούμε να τον θεωρήσουμε ως «θόρυβο» στον τρόπο λειτουργίας της συσκευής (EURADOS, 2004). Όλοι οι ανιχνευτές, ακολουθούν τα διεθνή πρότυπα δόσεων και σε συμφωνία με αυτά γίνεται η βαθμονόμηση τους.

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού δόσεων βασίζεται στη χρήση μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά χρειάζεται να μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και το ποσοστό της συμβολής τους στην δόση, γεγονός που καθιστά την ανάπτυξή τους ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Η αξιοπιστία των μοντέλων επικυρώνεται από την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα διεθνή πειραματικά δεδομένα. Η ευκολία τους συγκριτικά με την χρήση ανιχνευτών, έχει καταστήσει την χρήση τους πλέον διαδεδομένη μεταξύ των επιστημόνων. Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα τα αποτελέσματα των οποίων επικυρώνονται από τις μετρήσεις των ανιχνευτών. Τα διάφορα έντονα φαινόμενα, για τα οποία δεν μπορεί να υπάρξει πρόβλεψη, ενσωματώνονται εκ των υστέρων με τη χρήση συγκεκριμένων δοσιμετρικών μοντέλων.



Εικόνα 3.18: Το TEPC είναι στο μέγεθος μιας μεταφερόμενης αποσκευής, το Liulin είναι περίπου στο μέγεθος ενός μικρού κινητού τηλεφώνου, ο ανιχνευτής TID είναι μόνο στο μέγεθος αντίχειρα και ο ανιχνευτής RaySure έχει περίπου το μέγεθος ενός τυπικού ψηφιακού πολυμέτρου πάγκου.

(Πηγή: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016SW001407>)

3.17. Η μελέτη των διδύμων της NASA: Πολυδιάστατη ανάλυση επανδρωμένης διαστημικής αποστολής, διάρκειας ενός έτους

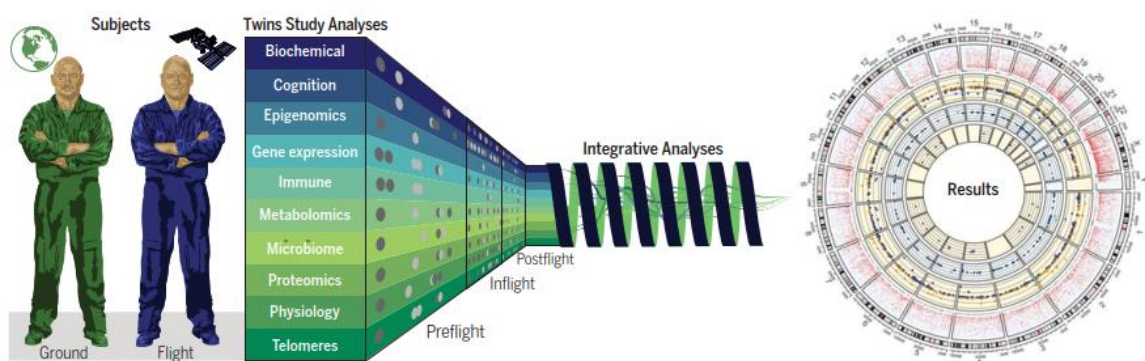
Μέχρι σήμερα, 559 άνθρωποι έχουν συμμετάσχει σε διαστημικές αποστολές, αλλά οι αποστολές μεγάλης διάρκειας (> 300 ημέρες), είναι στο σύνολό τους οχτώ. Αποστολές

μεγάλης διάρκειας, που θα μεταφέρουν ανθρώπους στον Άρη και πέρα από αυτόν τον πλανήτη, προγραμματίζονται από κράτη και ιδιωτικές εταιρείες στην επόμενη δεκαετία. Ως εκ τούτου, απαιτούνται ολοκληρωμένες μελέτες για να εκτιμήσουμε τον αντίκτυπο που έχει μια μεγάλης διάρκειας διαστημική πτήση στο ανθρώπινο σώμα, τον εγκέφαλο και συνολική φυσιολογία του ανθρώπου. Το διαστημικό περιβάλλον γίνεται σκληρό και προκαλεί στρες εξαιτίας πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του περιορισμού, της απομόνωσης και της έκθεσης σε περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες όπως μικρο-βαρύτητα, ακτινοβολία και θόρυβο. Η επιλογή ενός ζεύγους μονοζυγωτικών (πανομοιότυπων) διδύμων αστροναυτών για την πρώτη αποστολή, διάρκειας ενός έτους, της NASA μας επέτρεψε να συγκρίνουμε την επίδραση της πτήσης σε διαστημικό περιβάλλον σε έναν από τους δύο διδύμους, με τον ταυτόχρονο αντίκτυπο της έκθεσης στο γήινο περιβάλλον στον άλλο, γενετικώς αντίστοιχο, δίδυμο.

Οι γνωστές επιπτώσεις της πτήσης διαστημικού περιβάλλοντος για την ανθρώπινη υγεία, την απόδοση, την φυσιολογία, και τις κυτταρικές και τις μοριακές διαδικασίες είναι πολυάριθμες και περιλαμβάνουν απώλεια οστικής πυκνότητας, επιπτώσεις στη γνωστική απόδοση, μικροβιακές αλλαγές και μεταβολές στη λειτουργία των γονιδίων. Ωστόσο, από προηγούμενες μελέτες συλλέχθηκαν πολύ περιορισμένα δεδομένα και ταυτόχρονα δεν ενσωμάτωσαν τα αποτελέσματα σε πολλαπλά συστήματα και όλους τους τύπους δεδομένων στο ίδιο υποκείμενο-πειραματόζωο ή περιορίστηκαν χρονικά σε αποστολές έξι μηνών. Η μέτρηση των ίδιων μεταβλητών σε έναν αστροναύτη σε αποστολή με διάρκεια ενός έτους και το δίδυμο του που συνδέεται με τη Γη, υποδεικνύει τις μετρήσεις σε βιολογικό επίπεδο που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ώστε να οριστούν τα αποτελέσματα της διαστημικής πτήσης. Παρουσιάστηκε εδώ μια ολοκληρωμένη, διαρκής και πολυδιάστατη περιγραφή της επίδρασης μιας αποστολής 340 ημερών στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό.

Για περισσότερους από 25 μήνες, συλλέχθηκαν δεδομένα όσον αφορά την φυσιολογία, τα τελομερή, την μεταγραφή του DNA, την επιγενετική, το πρωτέωμα, τον μεταβολισμό, το ανοσοποιητικό, το μικροβιολογικό, το καρδιαγγειακό, και εκείνα που σχετίζονται με την όραση αλλά και τις γνωστικές λειτουργίες. Μερικές βιολογικές λειτουργίες δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τη διαστημική πτήση, συμπεριλαμβανομένης της ανοσοαπόκρισης (λήψη T κυττάρων), στην πρώτη δοκιμή εμβολιασμού, κατά την διάρκεια της πτήσης. Ωστόσο, σημαντικές αλλαγές σε πολλούς τύπους δεδομένων παρατηρήθηκαν κατά την περίοδο διαστημικής πτήσης. Η πλειοψηφία αυτών τελικά επέστρεψε στο προκαταρκτικό στάδιο, πριν την πτήση, εντός της χρονικής

περιόδου που διήρκησε η μελέτη. Σε αυτά περιλαμβάνονται αλλαγές στο μήκος των τελομερών, στην γονιδιακή ρύθμιση τόσο σε επιγενετικό όσο και σε μεταγραφικό επίπεδο, στη σύνθεση μικροβίου του εντέρου, στο βάρος σώματος, στις διαστάσεις της καρωτιδικής αρτηρίας, στο πάχος του χοριοειδούς καθώς και του περιφερικού ολικού πάχους του αμφιβληστροειδούς, και στους μεταβολίτες στον ορό του αίματος. Επιπλέον, ορισμένοι παράγοντες επηρεάστηκαν σημαντικά από το άγχος της επιστροφής στη Γη, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων κυτοκινών φλεγμονής και του γονιδίου ανοσοαπόκρισης αλλά και στην γνωστική απόδοση. Σε μερικές μετρήσεις, επίμονες αλλαγές παρατηρήθηκαν ακόμη και μετά από 6 μήνες μετά την επιστροφή στη Γη, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων έκφρασης ορισμένων γονιδίων, αυξημένη βλάβη του DNA από το χρωμοσωμικές αναστροφές, αυξημένος αριθμός του μικρού μήκους τελομερών και εξασθενημένη γνωστική λειτουργία.



Εικόνα 3.19: Πολυδιάστατες και συνεχόμενες αναλύσεις της μελέτης του πειράματος των διδύμων της NASA

(Αριστερά και μεσαία) Γενετικά πανομοιότυπα δίδυμα υποκείμενα (σε έδαφος και σε περιβάλλον διαστημικής πτήση αντίστοιχα), όπως χαρακτηρίστηκαν από 10 γενικευμένες βιοϊατρικές μεθόδους πριν την πτήση, κατά τη διάρκεια και μετά, για το σύνολο των 25 μηνών (οι κύκλοι υποδεικνύουν τα χρονικά σημεία στα οποία έγινε συλλογή των δεδομένων).

(Δεξιά) Τα δεδομένα ενσωματώθηκαν για να καθοδηγήσουν βιοϊατρικές μετρήσεις για μελλοντικές αποστολές (οι ομόκεντροι κύκλοι υποδεικνύουν, από μέσα προς τα έξω, τις κυτοκίνες, το πρωτέωμα, την μεταγραφή και την μεθυλίωση του DNA).

Το γεγονός ότι η πλειονότητα των μεταβλητών, βιολογικής και της γενικότερης ανθρώπινης υγείας, παρέμεινε σταθερή ή επέστρεψε στην αρχική κατάσταση, μετά από 340 ημέρες διαστημική αποστολή, υποδηλώνει ότι η ανθρώπινη υγεία μπορεί να διατηρηθεί, ως επί το πλείστον, κατά την διάρκεια διαστημικών πτήσεων. Οι αλλαγές σε μοριακό επίπεδο (π.χ. γονιδιακή έκφραση) και οι επιπτώσεις από τους παράγοντες κινδύνου, όπως αυτοί έχουν προσδιοριστεί από το υπάρχον πείραμα, για αποστολές μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας (> 1 έτος), παραμένουν εκτιμήσεις και πρέπει να αποδειχθούν με τις υπάρχουσες μετρήσεις σε μελλοντικούς αστροναύτες. Τέλος, οι διάφορες αλλαγές γράφτηκαν σε αυτή τη μελέτη, επισημαίνοντας μηχανισμούς που μπορεί ο ανθρώπινος οργανισμός να είναι ευάλωτος σε μια πτήση σε διαστημικό περιβάλλον και πιθανόν να απαιτούν προστασία, για αποστολές μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. Έτσι, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμεύσουν σαν οδηγός για στοχευμένα «αντίμετρα» ή για παρακολούθηση-έλεγχο κατά τη διάρκεια μελλοντικών αποστολών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εφαρμογή των κυριότερων υπολογιστικών μοντέλων

4.1. Υπολογιστικά μοντέλα

Έχει δημιουργηθεί ένας αριθμός υπολογιστικών μοντέλων, που μας παρέχουν την δυνατότητα να μελετήσουμε τις επιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (ηλιακής και γαλαξιακής) σε βιολογικό και τεχνολογικό επίπεδο. Η λειτουργία τους βασίζεται σε προσομοιώσεις αλλά και σε χρησιμοποίηση πραγματικών δεδομένων, από όργανα μέτρησης των συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας (συλλογή μετρήσεων σε βάση δεδομένων). Στη συνέχεια γίνεται χρήση των πιο διαδεδομένων τέτοιων μοντέλων και αναλύεται η αρχή λειτουργίας μερικών από αυτών (Sievert, Avidos, Cari-7, Dyastima, Planetocosmics / Magnetocosmics), ενώ παράλληλα θα υπολογίσουμε και διάφορα μεγέθη δοσιμετρίας.

Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου, θα γίνει παρουσίαση μιας νέα εφαρμογής, το μοντέλο DYASTIMA-R, που έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών/Τμήμα Φυσικής. Η χρήση αυτής της εφαρμογής είναι σημαντική για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας (πρωτογενούς και δευτερογενούς) με την ύλη, στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας καθώς και μας παρέχει την δυνατότητα του υπολογισμού της δόσης και της ισοδύναμης δόσης.

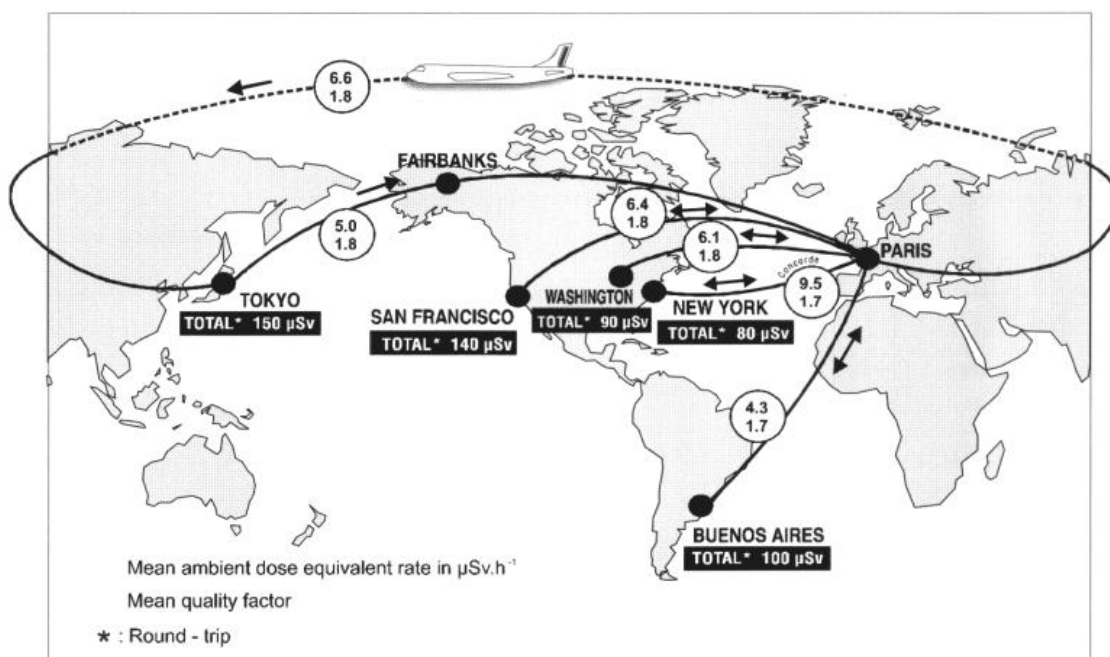
4.2. SIEVERT

Στη Γαλλία, το σύστημα SIEVERT (Système informatisé d'évaluation en vol de l'exposition aux Rayonnement cosmique dans le transport aérien-Υπολογιστικό σύστημα εκτίμησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία στις αεροπορικές πτήσεις), παραδόθηκε στις αεροπορικές εταιρείες, βοηθώντας τους στην εφαρμογή του άρθρου 42 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας.

Αυτό το εργαλείο υπολογισμού και εκτίμησης δόσεων αναπτύχθηκε από τη Γαλλική Γενική Διεύθυνση Πολιτικής Αεροπορία (DGAC) και από τους συνεργάτες: το Ινστιτούτο Ακτινοπροστασίας και πυρηνικής ασφάλειας (IRSN), το Παρατηρητήριο των Παρισίων και το Γαλλικό Ινστιτούτο για την έρευνα στους πόλους - Paul-Émile Victor (IPEV). Αυτή η υπηρεσία είναι διαθέσιμη σε ένα διακομιστή διαδικτύου και είναι

προσβάσιμη μόνο σε εταιρείες που έχουν υποβάλει αίτηση στη DGAC. Ωστόσο, παρέχεται μια έκδοση, με ελεύθερη προσβασιμότητα που επιτρέπει στους επιβάτες να αξιολογήσουν τη δόση που έλαβαν κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Αυτός ο διακομιστής λειτουργεί από το IRSN.

Το σύστημα SIEVERT σχεδιάστηκε για να είναι ένα εργαλείο, σε απόλυτη συμφωνία με τους κανονισμούς για τη δοσιμετρία των αεροπορικών πτήσεων, για τη δημιουργία βάση δεδομένων στην οποία μπορούν να εισαχθούν δοσομετρικά δεδομένα από ήδη υπάρχοντες κώδικες, όπως το CARI (O'Brien et al., 1996), κατά την διάρκεια κανονικής ηλιακής δραστηριότητας. Αυτό το σύστημα μας παρέχει δόσεις από τις εκάστοτε διαδρομές αεροσκαφών. Αυτές οι τιμές υπολογίζονται με μοντέλα που έχουν επιβεβαιωθεί με μετρήσει σε αρκετές δεκάδες πτήσεις, έχοντας ικανοποιητικό ποσοστό αβεβαιότητας. Επίσης, σε περίπτωση που συμβεί ηλιακή έκλαμψη, έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο που αξιολογεί τον αντίκτυπο σε σχέση με την λαμβανόμενη δόση (Lantos and Fuller, 2003; Lantos et al., 2001).

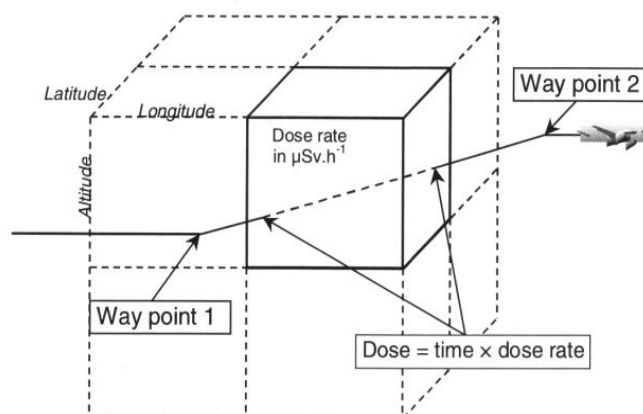


Εικόνα 4.1: Οι δόσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια διαφορετικών πτήσεων που λαμβάνονται από τις μετρήσεις που ελήφθησαν κατά το 1996 και 1998 με τη χρήση του εξοπλισμού NAUSICAA. Οι κύκλοι περιέχουν τον μέσο ισοδύναμο ρυθμό δόσης στην πτήση σε $\mu\text{Sv} / \text{h}$ και μέση τιμή του παράγοντα ποιότητας ακτινοβολίας (δόση ισοδύναμη με την αναλογία απορροφούμενης δόσης). Το συνολικό ισοδύναμο δόσης (μέσος ρυθμός $\times$ χρόνο) δίδεται για μια κυκλική πτήση.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)

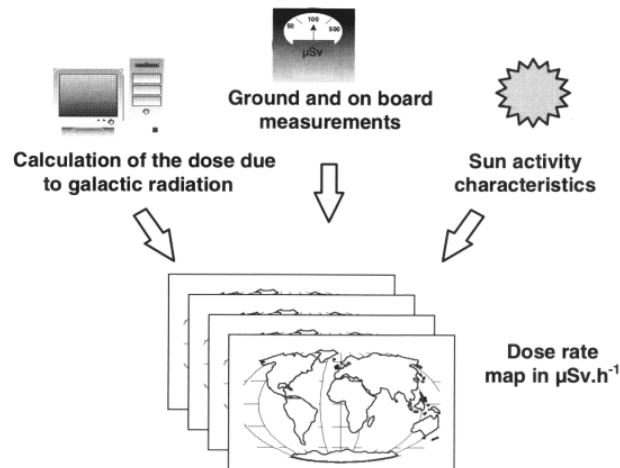
Το μοντέλο SIEVERT υπολογίζει την δόση χωρίζοντας τον εναέριο χώρο σε κελιά, με διαστάσεις 1000 πόδια υψόμετρο, 10^0 γεωγραφικό μήκος και 2^0 γεωγραφικό πλάτος. Στο άθροισμα τους σχηματίζουν ένα χάρτη με 26500 κελιά και σε κάθε ένα από αυτά αποδίδεται μια τιμή ρυθμού ενεργού δόσης. Ανάλογα με τον χρόνο παραμονής του αεροπλάνου σε κάθε κελί, υπολογίζεται η αντίστοιχη δόση (Εικόνα 4.3). Το σύνολο τους αθροίζεται και έτσι υπολογίζεται η δόση που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της πτήσης.

Το IRSN ενημερώνει τον χάρτη ρυθμού δόσεων σε μηνιαία βάση λαμβάνοντας υπόψιν την ηλιακή δραστηριότητα (Εικόνα 4.4). Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ενός υπολογιστικού μοντέλου (επί του παρόντος CARI 6 [O'Brien et al., 1996], που αναπτύχθηκε από την Federal Aviation Administration) που επιτρέπει τη λήψη της δόσης σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου έως το ύψος των 80000 ft. Συστηματικές μετρήσεις δόσεων ακτινοβολίας, με χρήση δοσιμέτρων που είναι εγκατεστημένοι στο έδαφος και σε αεροσκάφη, βοηθούν στην επιβεβαίωση της ακρίβειας των μετρήσεων ή στη διόρθωσή τους. Σε περίπτωση ηλιακής έκλαμψης σημαντικού μεγέθους, δημιουργείται και επικυρώνεται ένας ειδικός χάρτης. Οι αστροφυσικοί στο Παρατηρητήριο του Παρισιού καλούνται επίσης να αξιολογήσουν το επιπτώσεις της ηλιακής έκλαμψης. Ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει αυτή η σύνθετη μελέτη είναι σχετικά μεγάλος, οπότε χρειάζεται να περιμένουμε αρκετές εβδομάδες για να υπολογίσουμε τις δόσεις που λαμβάνονται κατά τις πτήσεις κατά τη διάρκεια ηλιακής έκλαμψης.



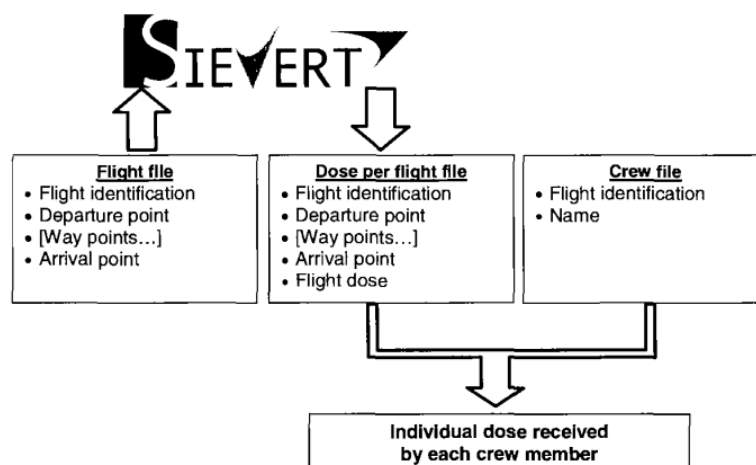
Εικόνα 4.2: Αρχή λειτουργίας για τον υπολογισμό της δόσης κατά τη διάρκεια μιας πτήσης με το μοντέλο SIEVERT.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)



Εικόνα 4.3: Τα διάφορα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τη λειτουργία του μοντέλου SIEVERT.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)



Εικόνα 4.4: Μέρος ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του SIEVERT και των αεροπορικών εταιρειών.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)

Τώρα ας δούμε σε στάδια την διαδικασία που ακολουθείται για την χρήση του μοντέλου SIEVERT από τις αεροπορικές εταιρίες. Η εκάστοτε εταιρεία ετοιμάζει ένα αρχείο ολοκληρωμένων ή προγραμματισμένων πτήσεων και το αποστέλλει στο δίκτυο του SIEVERT. Στη συνέχεια, το σύστημα ολοκληρώνει το αρχείο προσθέτοντας την ενεργό δόση που αντιστοιχεί σε κάθε πτήση (Εικόνα 4.5). Οι τιμές δόσεων υπολογίζονται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά πτήσης, χρησιμοποιώντας τα δοσιμετρικά δεδομένα που

έχουν εισαχθεί και είναι επικυρωμένα από το IRSN. Όσο πιο λεπτομερείς είναι οι πληροφορίες σχετικά με τη διαδρομή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια στον υπολογισμό της τιμής της δόσης. Εάν οι πληροφορίες είναι ελάχιστες, η τιμή της δόσης αξιολογείται χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο προφίλ διαδρομής (Εικόνα 4.6). Τα δεδομένα, σε αυτό το στάδιο, είναι ανώνυμα. Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να προστεθούν οι δόσεις που έλαβε κάθε μέλος του προσωπικού πτήσης. Αυτές οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες στο εκάστοτε μέλος του πληρώματος και κοινοποιείται στην επαγγελματική ιατρική υπηρεσία και στο εθνικό μητρώο.

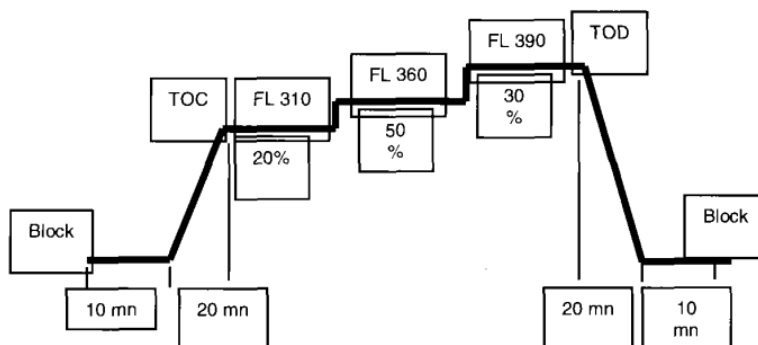
Παρέχεται επίσης η δυνατότητα στο ευρύ κοινό να εκτιμήσει τη δόση που έλαβε κατά τη διάρκεια ενός ή περισσότερων πτήσεων με πρόσβαση στην ιστοσελίδα του SIEVERT ([www / sievert-system.com](http://www.sievert-system.com), Εικόνα 4.7). Αυτή η αξιολόγηση εκτελείται χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που περιέχονται στο εισιτήριο της εκάστοτε πτήσης. Επιπλέον, γενικές πληροφορίες για τις κοσμικές ακτίνες, τον κανονισμό λειτουργίας και τον κίνδυνο που σχετίζεται με την ακτινοβολία είναι διαθέσιμος σε αυτό το site.

Κατά την διάρκεια του τακτικού προγραμματισμένου στάδιο ελέγχου (VSR), το οποίο προηγείται του υπολογισμού των δόσεων, λαμβάνονται πλήρους κλίμακας υπολογισμοί από το τμήμα δοσιμετρίας της IRSN και σε άμεση συνεργασία με την Air France. Επεξεργάστηκαν δεκάδες χιλιάδες πτήσεις.

Μια στατιστική μελέτη αυτών των αρχικών αποτελεσμάτων μας επέτρεψε να επικυρώσουμε έναν ορισμένο αριθμό παραμέτρων, ιδίως εκείνων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό ενός πρότυπου προφίλ πτήσης το οποίο χρησιμοποιείται για το ευρύ κοινό, όταν είναι άγνωστο το συγκεκριμένο προφίλ. Αυτά τα αρχικά αποτελέσματα δείχνουν, μεταξύ άλλων, ότι η διασπορά στη δόση για έναν συγκεκριμένο προορισμό μπορεί να είναι σημαντική (μέχρι τον συντελεστή 1,7) καθώς το μήκος μιας πτήσης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες. Οι λαμβανόμενες τιμές σε ένα τυπικό προφίλ είναι συνήθως στο ανώτερο τμήμα της περιοχής δόσεων για ένα δεδομένης διαδρομής, ώστε να διατηρηθεί μια συντηρητική προσέγγιση.

Δοσιμετρία σε πτήση, κατά την εκδήλωση ηλιακής έκλαμψης, ανιχνεύσιμης από επίγειους μετρητές, πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στις 15 Απριλίου 2001, στην πτήση Πράγα-Νέα Υόρκη (Εικόνα 4.8). Αυτές οι μετρήσεις ελήφθησαν από τον Spurny (Spurny and Datchev, 2001). Τέτοια φαινόμενα, γνωστά ως επίγειες επαυξήσεις κοσμικής ακτινοβολίας (GLE), συμβαίνουν το πολύ, μερικές φορές το χρόνο. Το δοσιμετρικό μοντέλο που δημιουργήθηκε στο SIEVERT σε γεγονότα ηλιακών

εκλάμψεων θα μπορούσε, συνεπώς, να επικυρωθεί. Αυτό το μοντέλο βασίζεται στην απόσβεση των σωματιδίων με ενέργεια όμοια με εκείνη των ηλιακών εκλάμψεων, στην ατμόσφαιρα, καθώς και στα δεδομένα από το δίκτυο μετρητών νετρονίων που βρίσκονται στο έδαφος και μας παρέχουν πληροφορίες για την ένταση των GLE.



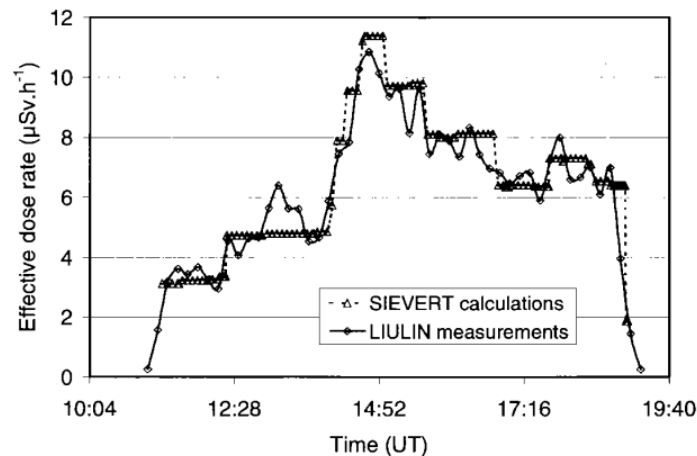
Εικόνα 4.5: Κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό ενός βασικού προφίλ, μιας υποχηματικής πτήσης μεγάλης απόστασης.

TOC: κορυφή της ανόδου, TOD: κορυφή της καθόδου, FL: επίπεδο πτήσης (ft / 100), Block: στάθμευση.

(Πηγή : <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)

Εικόνα 4.6: Πλατφόρμα καταχώρησης δεδομένων για εκτίμηση δόσης από το κοινό, με χρήση δεδομένων (τόπος αναχώρησης και άφιξης, ημερομηνία και ώρα πτήσης, αεροπορικό εισιτήριο).

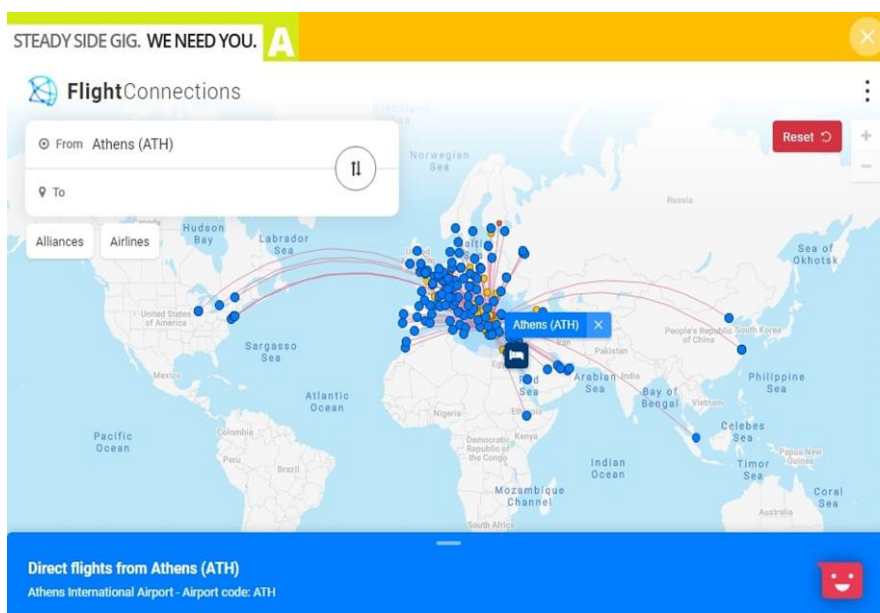
(Πηγή : <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)



Εικόνα 4.7: Προφίλ του ρυθμού δόσης όπως μετρήθηκε με τη χρήση του μετρητή "LIULIN" (ημιαγωγός ανιχνευτής) και όπως υπολογίστηκε από το SIEVERT για μια πτήση Πράγα-Νέα Υόρκη την 15η Απριλίου 2001, κατά τη διάρκεια του GLE 60 που σημειώθηκε την 14h09 UTC.

(Πηγή: : <https://www.researchgate.net/publication/245276180>)

Χρησιμοποιούμε το μοντέλο Sievert για να υπολογίσουμε την ισοδύναμη δόση που λαμβάνουν οι επιβάτες και το πλήρωμα για απευθείας πτήσεις, από το αεροδρόμιο «Ελευθέριος Βενιζέλος» (ATH), προς διάφορους προορισμούς, εντός και εκτός Ευρώπης, σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Για τον υπολογισμό των δόσεων έχει επιλεγεί η πρώτη ημέρα κάθε μήνα από το 12/2008 έως 12/2019, δηλαδή για ολόκληρο τον 24ο ηλιακό κύκλο.



Εικόνα 4.8: Απευθείας πτήσεις από Αθήνα (ATH).

(Πηγή: <https://www.flightconnections.com/flights-from-athens-ath>)

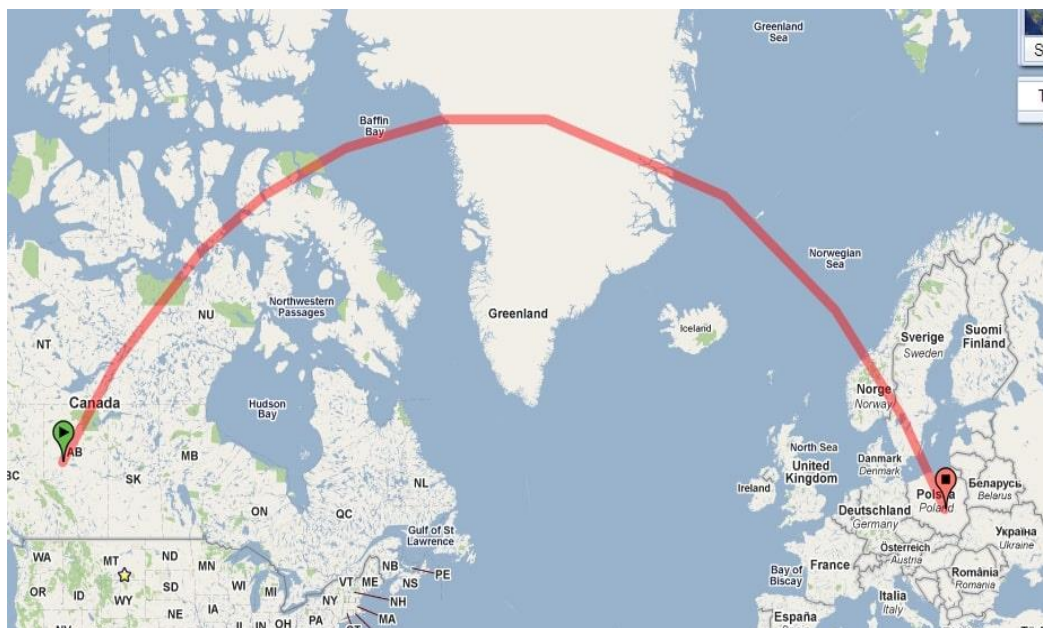
Για τον υπολογισμό της χρονικής διάρκειας των πτήσεων έχει γίνει από τον ιστιότοπο (<https://www.travelmath.com/flights/>). Έχουμε θεωρήσει ότι η μέση ταχύτητα του αεροσκάφους είναι 500mph (υποηχητική πτήση) και ο χρόνος απογείωσης-προσγείωσης είναι 30 λεπτά.

The screenshot shows a web interface for calculating flight time. At the top, there are tabs for 'DRIVING', 'DISTANCE', 'FLYING' (selected), and 'TIME'. Below the tabs, a message states: 'The flight time from Athens, Greece to Dublin, Ireland is: 4 hours, 3 minutes'. The interface includes input fields for 'From' (Athens, Greece), 'To' (Dublin, Ireland), 'Depart' (02/25/2020), 'Return' (03/02/2020), and 'Get' (flight). There are also buttons for 'SEARCH' and 'CALCULATE'. Below the main calculation, there is a section for 'Change your flying speed:' with input fields for '500 mph', '434.49 knots', and '804.67 km/h', and a 'take-off and landing: 30 minutes' field. The 'trippy' logo is visible in the bottom right corner.

Εικόνα 4.9: Παράδειγμα υπολογισμού χρονικής διάρκειας μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας.

(Πηγή: <https://www.travelmath.com/flights/>)

Θυμίζουμε ό,τι τα αεροσκάφη για να φτάσουν στον προορισμό τους, ακολουθούν μια τροχιά που ονομάζεται γεωδαισιακή.



Εικόνα 4.10: Παράδειγμα γεωδαισιακής τροχιάς επιβατικού αεροσκάφους. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της χαρτογράφησης της διαδρομής ευθείας γραμμής από ένα σημείο στην Αμερική στην Πολωνία χρησιμοποιώντας το εργαλείο μέτρησης απόστασης ([Distance Measurement Tool](#)). Τα αεροπλάνα από την Ευρώπη με προορισμό τον Καναδά ή την πολιτεία της Αλάσκας, θα ταξιδεύουν σχεδόν πάνω από το Βόρειο Πόλο.

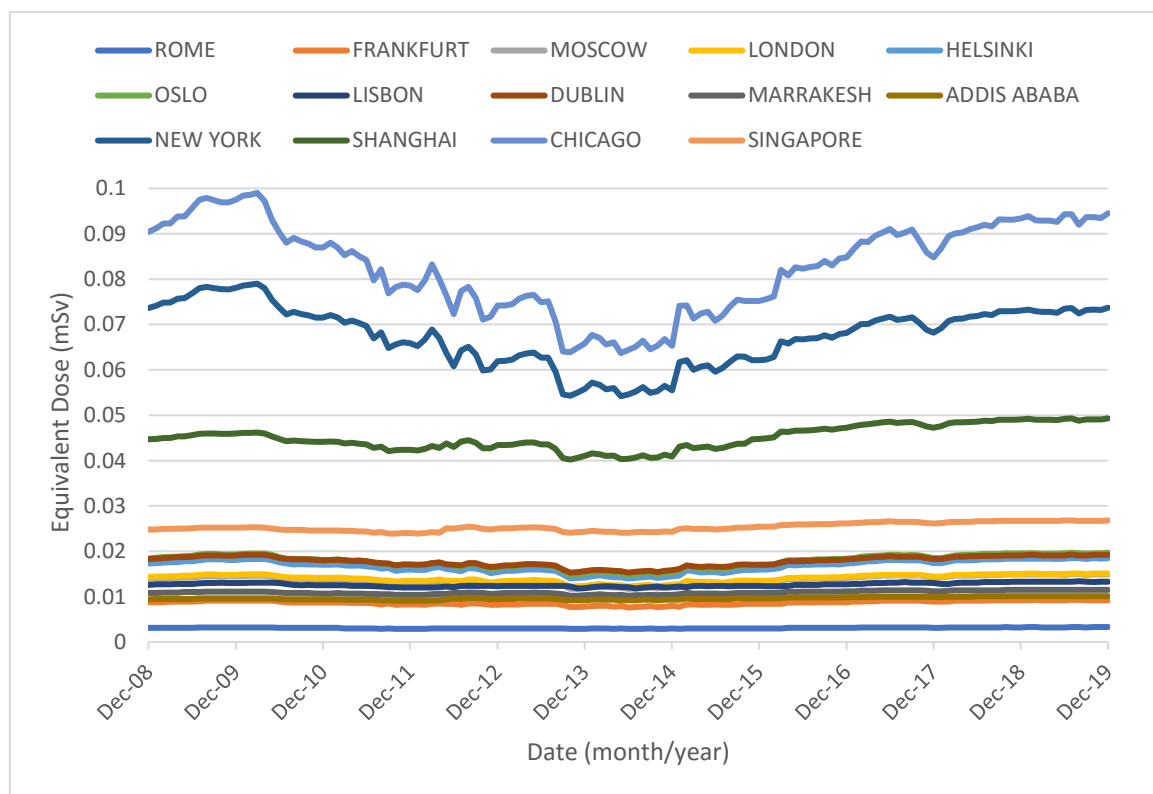
(Πηγή: <https://gis.stackexchange.com/questions/6822>)

Οι μετρήσεις έγιναν για τις εξής πόλεις-προορισμοί:

- 1) Ρώμη-Ιταλία(1h50m)
- 2) Φρανκφούρτη-Γερμανία(2h44m)
- 3) Μόσχα-Ρωσία (3h16m)
- 4) Λονδίνο-Ηνωμένο Βασίλειο (3h30m)
- 5) Ελσίνκι-Φινλανδία (3h34m)
- 6) Όσλο-Νορβηγία (3h44m)
- 7) Λισαβόνα-Πορτογαλία (4h03m)
- 8) Δουβλίνο-Ιρλανδία (4h03m)
- 9) Μαρρακές-Μαρόκο (4h12m)
- 10) Αντίς Αμπέμπα-Αιθιοπία (4h54m)
- 11) Νέα Υόρκη-ΗΠΑ (10h30m)
- 12) Σανγκάη-Κίνα (11h09m)
- 13) Σικάγο-ΗΠΑ (11h24m)

14) Τζοχόρ Μπάχρου-Σιγκαπούρη (11h45m)

Τα κριτήρια επιλογής αυτών των πόλεων ήταν στις μεν 2 πρώτες η αυξημένη συχνότητα, στις δε υπόλοιπες επιχειρούμε να δείξουμε γραφικά την εξάρτηση που έχει η υπολογιζόμενη λαμβανόμενη δόση με το γεωγραφικό πλάτος. Γι' αυτό το λόγο, έχουν επιλεγεί οι πιο μακρινοί δυνατοί προορισμοί, σε μικρά, μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη καθώς και πτήσεις με παρόμοια χρονική διάρκεια αλλά διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος.



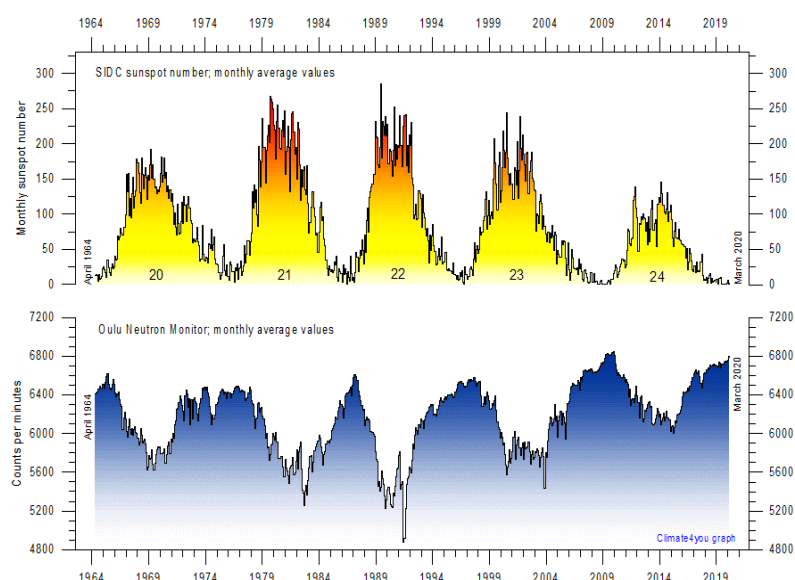
Διάγραμμα 4.2: Γραφική παράσταση της ισοδύναμης δόσης, όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Sievert, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας, σε συνάρτηση με τον χρόνο (μηνιαία διαμόρφωση), κατά την διάρκεια του 24^{ου} Ηλιακού κύκλου

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τα εξής:

- Υπάρχει σαφής εξάρτηση της ισοδύναμης δόσης που λαμβάνουμε με το γεωγραφικό πλάτος του προορισμού, καθώς και με την χρονική διάρκεια της πτήσης.

- Υπάρχει εμφανής η αντισυσχέτιση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα. Η ισοδύναμη δόση από την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο Sievert, εμφανίζει την ελάχιστη τιμή της στο μέγιστο της δραστηριότητας του ηλιακού κύκλου (2013-2014).
- Επιβεβαιώνεται η χρονική υστέρηση μεταξύ της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (GCR), όπως υπολογίστηκε με το υπολογιστικό σύστημα Sievert, και τον παρατηρούμενο αριθμό ηλιακών κηλίδων (SSN) [Eddie Ross and William J. Chaplin, 2019].

Η ανάλυση της χρονικής υστέρησης, μεταξύ έντασης της GCR και των SSN, έδειξε ότι ο Ηλιακός κύκλος 24 έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση (δύο έως τέσσερις μήνες) από τους προηγούμενους κύκλους ηλιακής δραστηριότητας με ζυγό αριθμό (όπου εμφανίζεται υστέρηση από μηδέν έως ένα μήνα). Ωστόσο, η υστέρηση του δεν είναι τόσο μεγάλη όσο εκείνων των προηγούμενων κύκλων με μονό αριθμό, και ακόμα ο Ηλιακός κύκλος 24 ακολουθεί την τάση μιας μικρής ή σχεδόν μηδενικής καθυστέρησης για ζυγούς κύκλους (μοντελοποίηση των διαγραμμάτων υστέρησης χρησιμοποιώντας ένα απλό γραμμικό μοντέλο, λόγω της διαφοράς στο σχήμα των γραφημάτων υστέρησης για κύκλους μονών και ζυγών αριθμών). Εικάζεται ότι η εκτεταμένη καθυστέρηση στον Ηλιακό κύκλο 24 σε σύγκριση με προηγούμενους κύκλους ζυγών αριθμών πιθανότατα οφείλεται στο βαθύ, εκτεταμένο ελάχιστο που παρατηρήθηκε μεταξύ των Ηλιακών κύκλων 23 και 24 αλλά και στη χαμηλή μέγιστη δραστηριότητα του 24^{ου} Ηλιακού κύκλου (Broomhall, 2017).



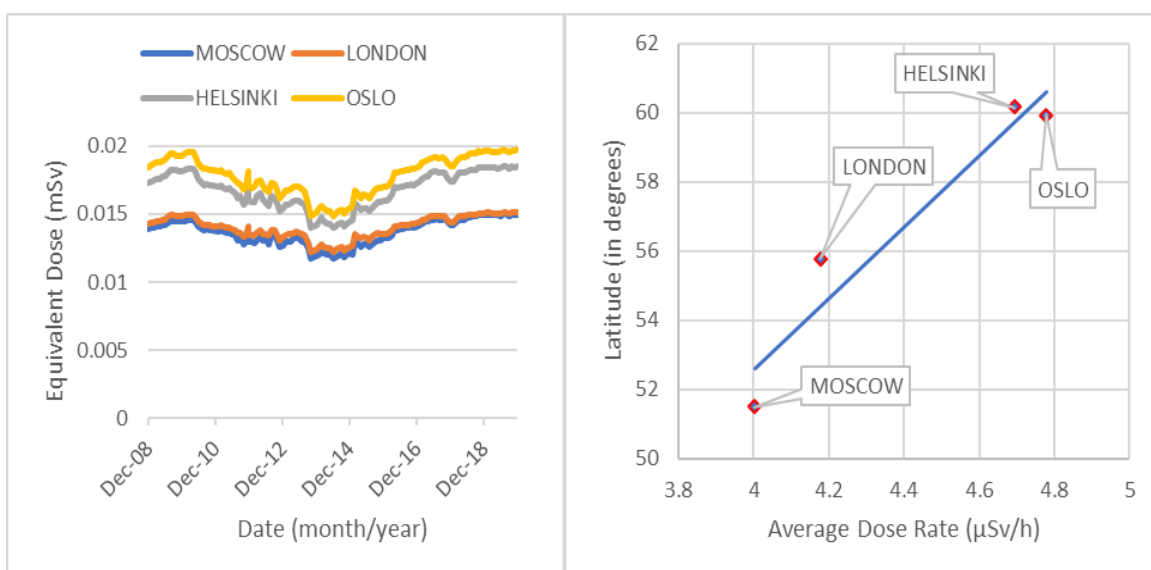
Εικόνα 4.11: Παρατηρούμενος μηνιαίος μέσος αριθμός ηλιακών κηλίδων (Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) από τον Απρίλιο του 1964 και (κάτω πίνακας) μηνιαίος μέσος αριθμός μετρήσεων του μετρητή νετρονίων του Πανεπιστημίου Ουλου (Φινλανδία)

(Πηγή: <https://www.climate4you.com/Sun.htm>)

Στη συνέχεια, ομαδοποιούμε χρονικά τα δεδομένα μας, έτσι ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί ευκρινώς η εξάρτηση της λαμβανόμενης ισοδύναμης δόσης αλλά και του μέσου ρυθμού δόσης ($\mu\text{Sv/h}$), με το γεωγραφικό πλάτος.

Group A:

1. ΜΟΣΧΑ (3h16m)
2. ΛΟΝΔΙΝΟ (3h30m)
3. ΕΛΣΙΝΚΙ (3h34m)
4. ΟΣΛΟ (3h44m)



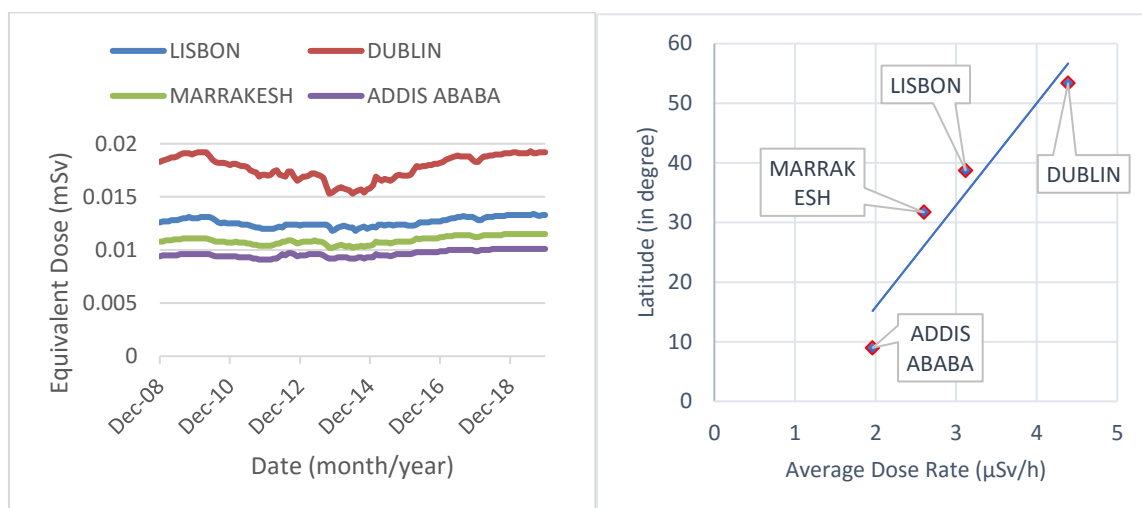
Διάγραμμα 4.2:

(Αριστερά) Γραφική παράσταση της ισοδύναμης δόσης, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας (μοντέλο Sievert), σε συνάρτηση με τον χρόνο (μηνιαία διαμόρφωση).

(Δεξιά) Γραφική παράσταση του μέσου ρυθμού δόσης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού.

Group B:

1. ΛΙΣΑΒΟΝΑ (4h03m)
2. ΔΟΥΒΛΙΝΟ (4h03m)
3. ΜΑΡΡΑΚΕΣ (4h12m)
4. ΑΝΤΙΣ ΑΜΠΙΕΜΠΙΑ (4h54m)



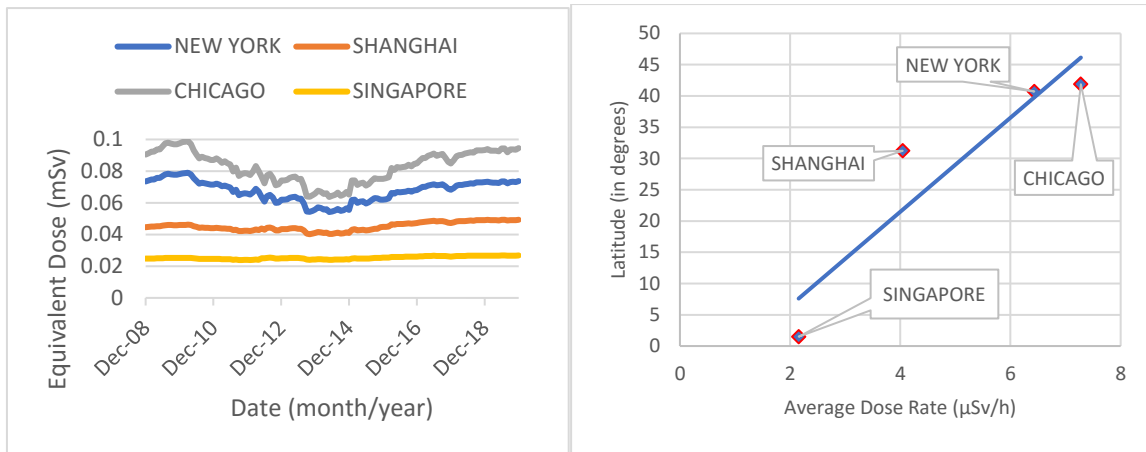
Διάγραμμα 4.3:

(Αριστερά) Γραφική παράσταση της ισοδύναμης δόσης, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας (μοντέλο Sievert), σε συνάρτηση με τον χρόνο (μηνιαία διαμόρφωση).

(Δεξιά) Γραφική παράσταση του μέσου ρυθμού δόσης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού.

Group C:

1. ΝΕΑ ΥΟΡΚΗ (10h30m)
2. ΣΑΝΓΚΑΗ (11h09m)
3. ΣΙΚΑΓΟ (11h24m)
4. ΤΖΟΧΟΡ ΜΠΑΧΡΟΥ (ΣΙΓΚΑΠΟΥΡΗ) (11h45m)



Διάγραμμα 4.4:

(Αριστερά) Γραφική παράσταση της ισοδύναμης δόσης, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας (μοντέλο Sievert), σε συνάρτηση με τον χρόνο (μηνιαία διαμόρφωση)

(Δεξιά) Γραφική παράσταση του μέσου ρυθμού δόσης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού.

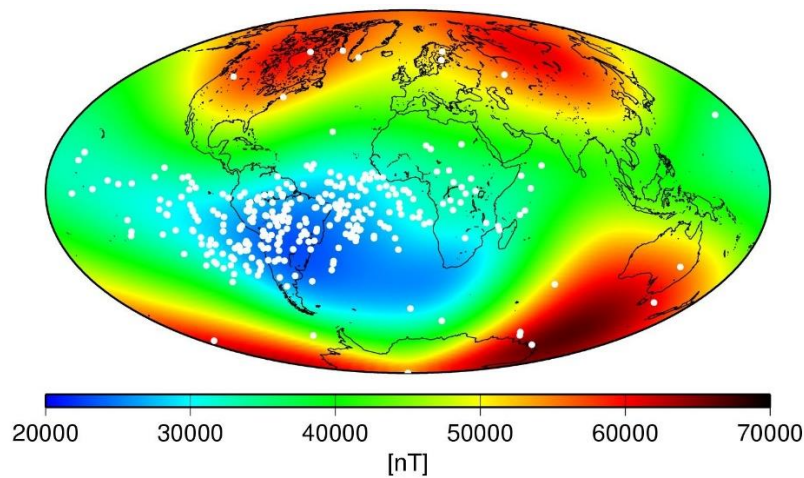
Από τα διαγράμματα 4.2, 4.3, 4.4 είναι εμφανής η εξάρτηση του μέσου ρυθμού δόσης με το γεωγραφικό πλάτος. Όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού, τόσο αυξάνεται ο μέσος ρυθμός λαμβανόμενης ισοδύναμης δόσης ($\mu\text{Sv/h}$), κατά την διάρκεια της πτήσης.

Έπειτα, θέλουμε να δούμε πως επηρεάζεται η λαμβανόμενη δόση από μια αεροπορική πτήση, όταν αυτή πραγματοποιείται κοντά στους πόλους (λόγω γεωδαισιακής τροχιάς του επιβατικού αεροσκάφους, τα αεροπλάνα από την Ευρώπη με προορισμό τον Καναδά ή την πολιτεία της Αλάσκας, θα ταξιδεύουν σχεδόν πάνω από το Βόρειο Πόλο) ή στην λεγόμενη Ανωμαλία του Νότιου Ατλαντικού. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήσαμε τις απευθείας πτήσεις από το διεθνές αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης προς:

- 1) Whitehorse-Canada (9h34m)
- 2) Anchorage-Alaska USA (9h50m)
- 3) Buenos Aires-Argentina (14h45m)

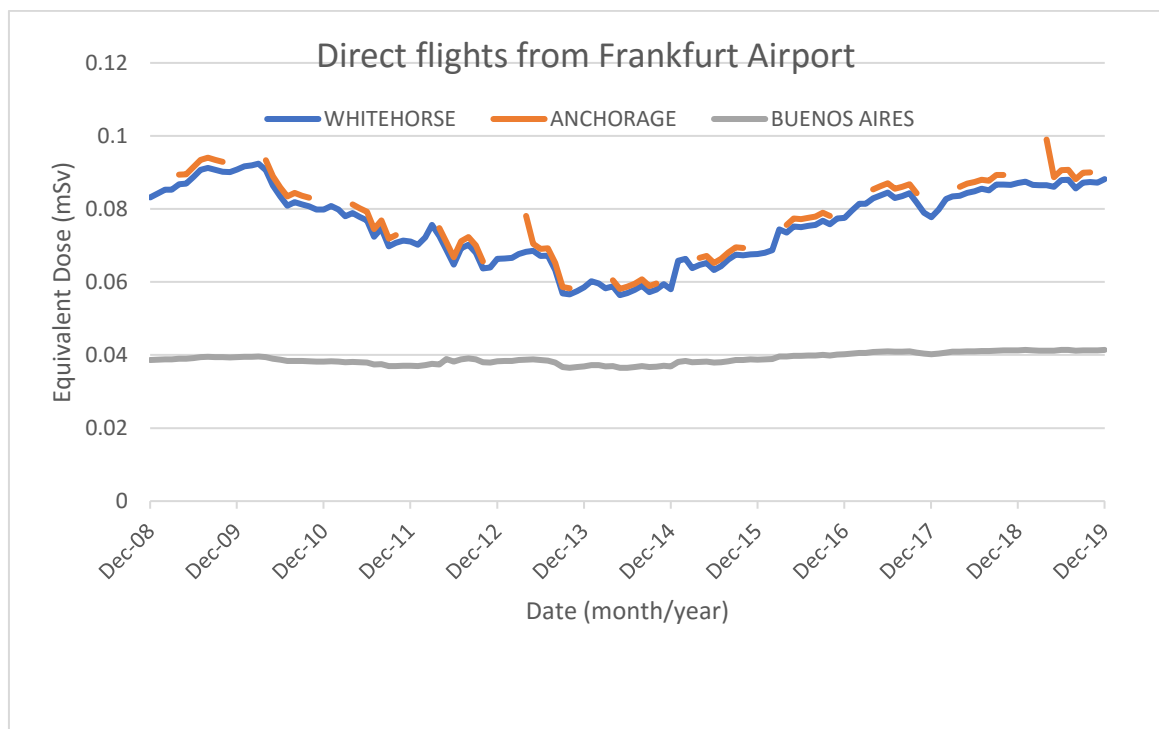
Επειδή δεν υπάρχουν απευθείας πτήσεις από το «Ελευθέριος Βενιζέλος» σε αυτούς τους απομακρυσμένους προορισμούς, παρά μόνο με ανταπόκριση, χρησιμοποιήσαμε το διεθνές αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης. Οπότε, αν κάποιος θελήσει να υπολογίσει την συνολική ακτινοβολία που θα δεχθεί κάποιος επιβάτης ή μέλος του

πληρώματος που ταξιδεύει από το αεροδρόμιο της Αθήνας στους παραπάνω τρεις προορισμούς, δεν έχει παρά να αθροίσει τις δόσεις.



Εικόνα 4.12: Γραφική αναπαράσταση της «Ανωμαλίας του Νοτίου Ημισφαιρίου», με το μαγνητικό πεδίο της Γης να παριστάνεται σε χρωματικές αποχρώσεις, ανάλογα με την ένταση του, στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη.

(Πηγή: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/09/South_Atlantic_Anomaly)



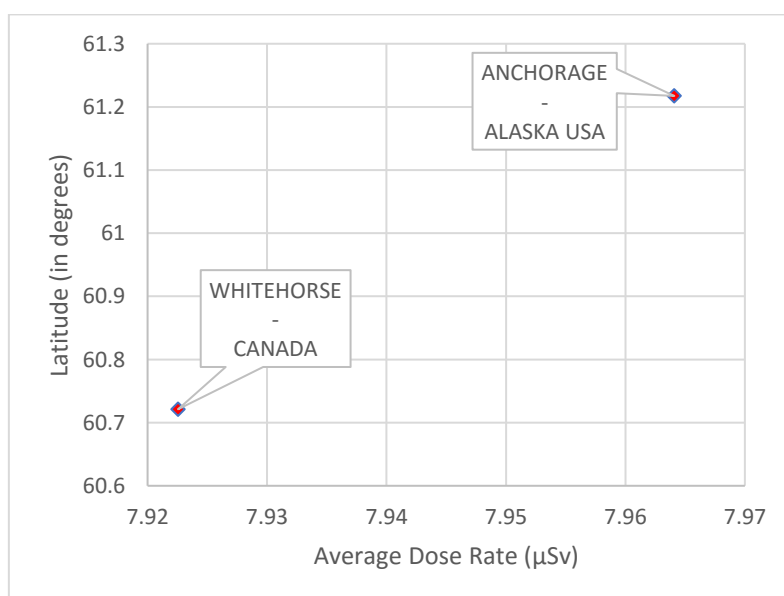
Διάγραμμα 4.5: Γραφική παράσταση της ισοδύναμης δόσης, όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Sievert, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με

αφετηρία το διεθνές αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης, σε συνάρτηση με τον χρόνο (μηνιαία διαμόρφωση), κατά την διάρκεια του 24^{ου} Ηλιακού κύκλου.

Παρατηρούμε ότι οι απευθείας πτήσεις από τον διεθνή αερολιμένα της Φρανκφούρτης προς το διεθνές αεροδρόμιο Άνκορατζ, στην πολιτεία της Αλάσκας των ΗΠΑ (ICAO: PANC), σταματούν σχεδόν τον μισό χρόνο, από τέλος Οκτωβρίου μέχρι τέλος Μαρτίου λόγω αρκτικού χειμώνα. Κατά την διάρκεια του αρκτικού χειμώνα, το περιβάλλον καθίσταται εξαιρετικά αφιλόξενο για την ανθρώπινη ζωή. Ήδη από τον Οκτώβριο οι θερμοκρασίες πέφτουν και κάτω από τους -20°C , ενώ τις ακτές και τα νοτιότερα τμήματα μαστίζουν συχνές χιονοθύελλες που κάνουν αδύνατη την πραγματοποίηση πτήσεων, από και προς αυτές τις περιοχές.

Είναι εμφανές και δω η εξάρτηση της λαμβανόμενης ισοδύναμης δόσης με το γεωγραφικό πλάτος. Ακόμα, προφανώς, ο μέσος ρυθμός λαμβανόμενης ισοδύναμης δόσης ($\mu\text{Sv/h}$) αυξάνεται όσο μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού (βλέπε παράρτημα).

Για τους προορισμούς Whitehorse-Canada και Anchorage-Alaska USA, που έχουν μικρή διαφοροποίηση στο γεωγραφικό πλάτος, κάνουμε ξεχωριστό διάγραμμα, σε μεγαλύτερη κλίμακα. Βλέπουμε την εξάρτηση της λαμβανόμενης δόσης (μέσος ρυθμός) ακόμα και σε μικρή διαφοροποίηση στο γεωγραφικό πλάτος της πόλης προορισμού.



Διάγραμμα 4.6: Γραφική παράσταση του μέσου ρυθμού δόσης, που λαμβάνουμε κατά την διάρκεια μιας απευθείας πτήσης με αφετηρία το διεθνές αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης (μοντέλο Sievert), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης Whitehorse-Canada και Anchorage-Alaska USA.

Για την πόλη προορισμού Μπουένος Άιρες στην Αργεντινή, όπου η πτήση περνάει πλησίον της Ανωμαλίας του Νοτίου Ημισφαιρίου, δεν παρατηρείται αφύσικα μεγάλη τιμή, για το γεωγραφικό πλάτος της, στην λαμβανόμενη ισοδύναμη δόση (όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο Sievert) αν και έχει την μεγαλύτερη χρονική διάρκεια (14h45m). Αν για παράδειγμα, υπολογίσουμε, με το ίδιο μοντέλο, την μέση ισοδύναμη δόση (για τον 24^ο Ηλιακό κύκλο) που λαμβάνουμε για πτήση από το αεροδρόμιο της Φρανκφούρτης με προορισμό μια πόλη με το παραπλήσιο γεωγραφικό πλάτος όπως το Κέιπ Τάουν στην Ν.Αφρική, βλέπουμε διαφορές στην τιμή της τάξης του 20% (και ~2% για τον μέσο ρυθμό λαμβανόμενης δόσης). Η διαφορά αυτή, δεν μας δίνει σαφή εικόνα αύξησης της λαμβανόμενης ισοδύναμης δόσης εξαιτίας πτήσεων πλησίον της Ανωμαλίας του Νοτίου Ημισφαιρίου διότι η διαφορά αυτή είναι μέσα στο σφάλμα υπολογισμού της ισοδύναμης δόσης, με το μοντέλο Sievert. Βέβαια, μπορεί να οφείλεται στην διαφορά στην χρονική διάρκεια του ταξιδιού. Κάνοντας χρήση του μέσου ρυθμού δόσης, η μέση λαμβανόμενη ισοδύναμη δόση, για την πτήση με προορισμό το Κέιπ Τάουν, διαφοροποιείται σημαντικά και αγγίζει την μέση ισοδύναμη δόση για την πτήση με προορισμό το Μπουένος Άιρες (απόκλιση ~1,67%).

ARRIVAL AIRPORT	CITY	LATITUDE	AVERAGE DOSE (mSv)	AVERAGE DOSE RATE (μSv/h)
CAPE (12h08m)	TOWN	-33.918861	0.031594737	2.604055056
BUENOS (14h45min)	AIRES	-34.603722	0.039041353	2.646871416

Πίνακας 4.1: Το γεωγραφικό πλάτος, η μέση ισοδύναμη δόση και ο μέσος ρυθμός δόσης για πτήσεις με πόλεις προορισμού το Κέιπ Τάουν και το Μπουένος Άιρες.

4.3. AVIDOS (AVIDOS 2.0)

Το AVIDOS είναι μια διαδικτυακή υπηρεσία του Seibersdorf Laboratories, που βρίσκεται στην Αυστρία, η οποία είναι μέρος του δικτύου Διαστημικού καιρού, του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), στη διεύθυνση: <http://swe.ssa.esa.int/web/guest/avidos-federated>.

Το AVIDOS είναι ενημερωτικό και εκπαιδευτικό ηλεκτρονικό λογισμικό για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία σε υψόμετρο πτήσης κατά τη διάρκεια ήρεμων και έντονων συνθηκών, του Ηλίου. Είναι ένα μοντέλο πολλαπλών παραμέτρων, βασισμένο σε προσομοιώσεις έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας τον κώδικα FLUKA Monte Carlo. Υπολογίζει δόσεις ακτινοβολίας, τόσο την ισοδύναμη όσο και την ενεργό δόση, για πτήσεις μεταξύ οποιωνδήποτε δύο τοποθεσιών και κάνει μια σύγκριση της εκτιμώμενης έκθεσης με τον μέσο όρο της φυσικής ακτινοβολίας υποβάθρου στη Γη. Η νέα έκδοση AVIDOS 2.0, πραγματοποιεί ετήσια πρόβλεψη των επιπτώσεων της ακτινοβολίας εξαιτίας της Γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας (GCR). Η πρόβλεψη αυτή βασίζεται σε ένα πρόγραμμα πρόβλεψης του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (SILSO), που αναπτύχθηκε από το Βασιλικό Παρατηρητήριο του Βελγίου. Η πρόβλεψη των επιπτώσεων της κοσμικής ακτινοβολίας σε υψόμετρα που πραγματοποιούνται οι εμπορικές πτήσεις αεροσκαφών, κατά την διάρκεια γεγονότων ηλιακών ενεργειακών σωματιδίων (SEP), είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω των σύνθετων χαρακτηριστικών των SEP και της τυχαίας, μη προβλέψιμης μέχρι σήμερα, εμφάνισής τους. Με την ανάπτυξη του AVIDOS 2.0, επιχειρείται τώρα η πρόβλεψη της επίδρασης στην έκθεση, σε υψόμετρο πτήσεων, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος SEP, χρησιμοποιώντας τρεις συνιστώσες: το μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo, τα δεδομένα πραγματικού χρόνου από τον σταθμό καταγραφής νετρονίων Oulu και το σύστημα GLE-Alert, που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και έχει αναπτυχθεί από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

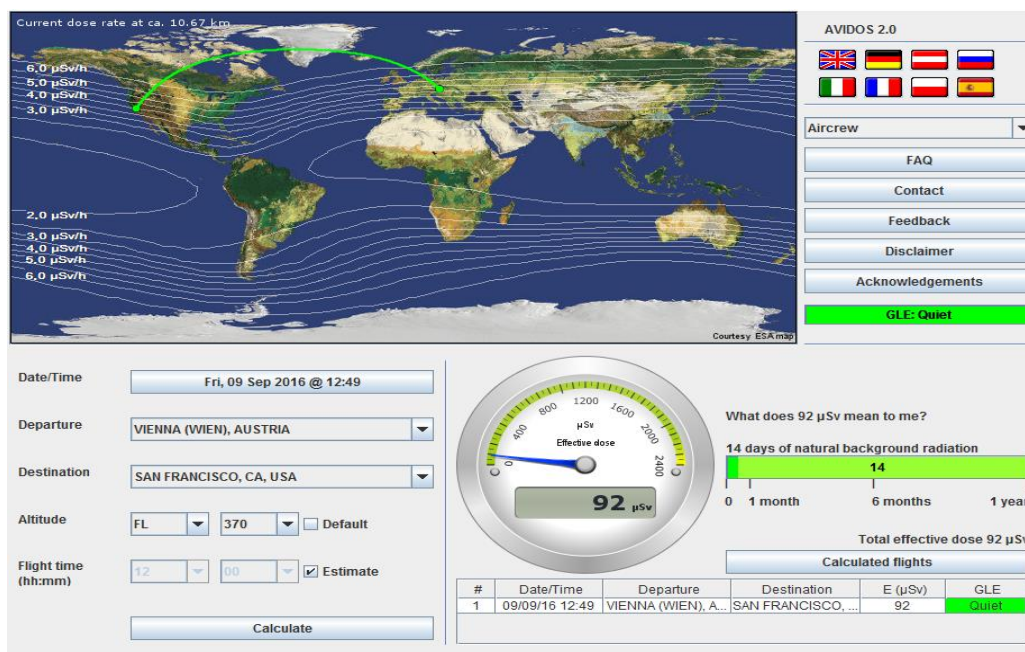
Ακόμα, η πλατφόρμα Avidos διατίθεται σε 4 λειτουργίες, ανάλογα την χρήση που προορίζεται:

- Public
- Aircrew
- Waypoints
- Science

Η λειτουργία Science σχεδιάστηκε για ερευνητές και ειδικούς στον τομέα των δόσεων ακτινοβολίας σε υψόμετρα πτήσης, ιδίως κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών συνθηκών. Με αυτόν τον τρόπο οι χρήστες μπορούν να αναλύσουν δεδομένα δόσεων για διαφορετικά φάσματα ηλιακών πρωτονίων ή να διερευνήσουν διαφορετικές διαδρομές πτήσης για την ίδια έντονη ηλιακή δραστηριότητα.

Επιγραμματικά, η λειτουργία Science προσφέρει:

- αρκετά ενσωματωμένα φάσματα ηλιακών πρωτονίων,
- αρκετές αντιπροσωπευτικές διαδρομές πτήσεων,
- όλες οι μεταβλητές των φασμάτων και των πτήσεων είναι επεξεργάσιμες,
- Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ως Ενεργό (E) και Ισοδύναμη δόση (H).



Εικόνα 4.13: Παράδειγμα χρήσης της πλατφόρμας Avidos 2.0 (Aircrew Mode)
(Πηγή: <https://www.seibersdorf-laboratories.at/galerie/gallery-detail/flugdosimetrie>)

Η ανάπτυξη του AVIDOS υποστηρίχθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος, το Αυστριακό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Μεταφορών και Καινοτομίας και την Αυστριακή Υπηρεσία Αεροπορίας και Διαστήματος (ALR).

Χρησιμοποιήσαμε την πλατφόρμα του υπολογιστικού μοντέλου Avidos για να παρατηρήσουμε την επίδραση των GLE σε πτήσεις σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και συγκεκριμένα για πτήση από το αεροδρόμιο της Στοκχόλμης στη Σουηδία, με προορισμό

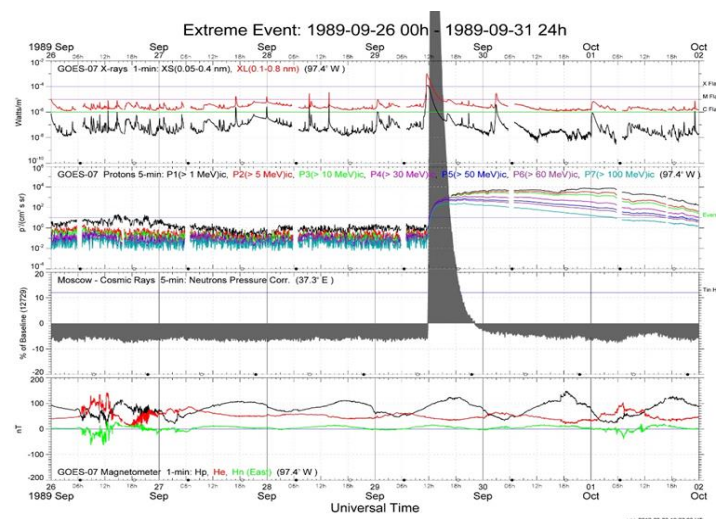
το Ρέικιαβικ στην Ισλανδία. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι συντεταγμένες των δύο αυτών πόλεων.

CITY	LATITUDE	LONGITUDE
STOCKHOLM	59.334591	18.06324
REYKJAVIK	64.128288	-21.827774

Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες για τις πόλεις της Στοκχόλμης και του Ρέικιαβικ

Ένα συμβάν καταγράφεται ως επίγεια επαύξηση κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancements-GLE) όταν συμπίπτει χρονικά μια σημαντική στατιστικά αύξηση του ρυθμού καταμέτρησης, σε τουλάχιστον δύο ανιχνευτές νετρονίων, σε διαφορετική τοποθεσία, με τον έναν τουλάχιστον ανιχνευτή να βρίσκεται κοντά στη στάθμη της θάλασσας. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να συνοδεύεται από μια καταγραφή αντίστοιχης αύξησης στη ροή των πρωτονίων, όπως καταμετρώνται από όργανα που βρίσκονται στο διάστημα (Poluianov et al., 2017).

Η συχνότητα εμφάνισης των GLE είναι περίπου 10-15 ανά δεκαετία. Η επίσημη λίστα των GLE διατηρείται στη διεθνή βάση δεδομένων των GLE (<http://gle.oulu.fi/#/>). Το μεγαλύτερο από αυτά τα γεγονότα, που ονομάζεται GLE παρατηρήθηκε στις 23 Φεβρουαρίου 1956. Το πιο πρόσφατο GLE (72) εμφανίστηκε στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 ως αποτέλεσμα μιας ηλιακής έκλαμψης κατηγορίας X και μετρήθηκε στην επιφάνεια τόσο της Γης (από τους ανιχνευτές νετρονίων) όσο και του Άρη (από τον Ανιχνευτή Αξιολόγησης Ακτινοβολίας στον Άρη που βρίσκεται στο όχημα Curiosity).



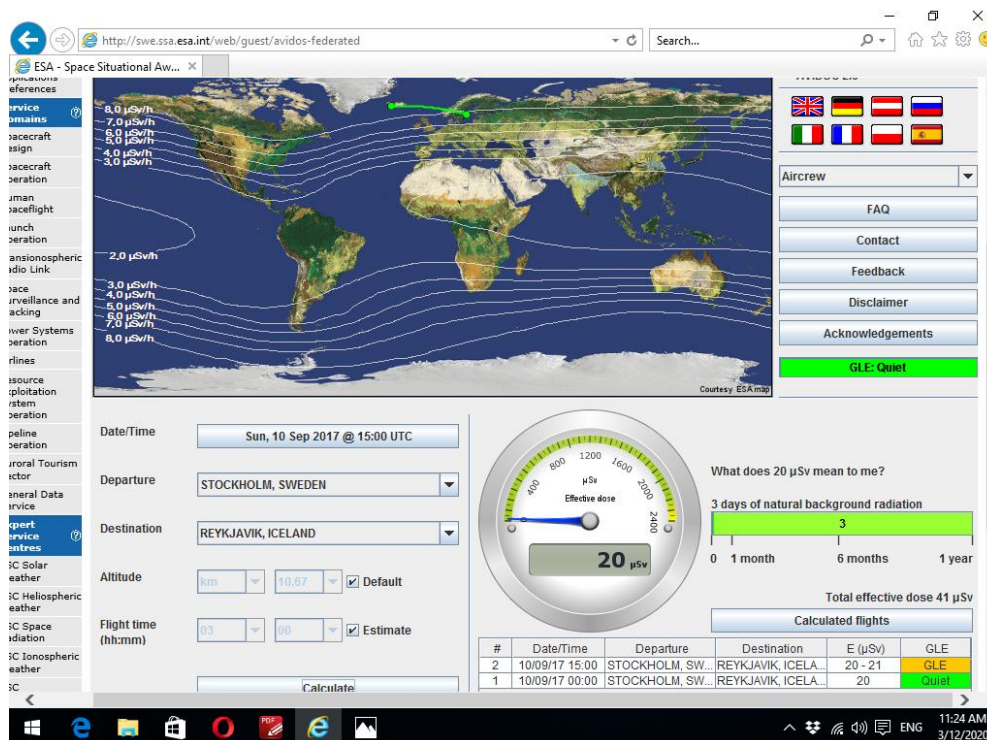
Εικόνα 4.14: Επίγεια επαύξηση κοσμικής ακτινοβολίας, τον Σεπτέμβριο του 1989 (GLE 42).

(Πηγή: ["Extreme Space Weather Events" National Geophysical Data Center](#))

Εμείς, στο πείραμά μας, θα υπολογίσουμε την επίδραση δύο τέτοιων γεγονότων, του GLE 42 και του GLE 72, στην ενεργό δόση E, κατά την διάρκεια μιας πτήσης από την Στοκχόλμη στην πόλη Ρέικιαβικ.

Αρχικά, χρησιμοποιήσαμε την πλατφόρμα Avidos για να υπολογίσουμε την ενεργό δόση που λαμβάνουν οι επιβάτες και το πλήρωμα, κατά την διάρκεια μιας πτήσης από την πόλη της Στοκχόλμης με προορισμό την πόλη Ρέικιαβικ, ενώ έχουμε εκδήλωση της επίγειας επαύξησης κοσμικής ακτινοβολίας GLE 72. Η εν λόγω επαύξηση, έλαβε χώρα στις 16:06 UT, οπότε επιλέξαμε την ώρα αναχώρησης να είναι κοντά σε αυτή την ώρα (η πτήση διαρκεί περίπου 3 ώρες και 10 λεπτά, θεωρώντας ότι η ταχύτητα του αεροσκάφους είναι 500mph και ο χρόνος απογείωσης και προσγείωσης διαρκεί 30 λεπτά), για να φανεί η επίδραση στους επιβάτες και στο πλήρωμα της πτήσης.

Από το αποτέλεσμα που μας δίνει το Avidos βλέπουμε ότι η ενεργός δόση που λαμβάνουν οι επιβάτες και το πλήρωμα της πτήσης κατά την διάρκεια εκδήλωσης του φαινομένου GLE 72, δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή που λαμβάνουν όταν επικρατούν ήρεμες σχετικά συνθήκες, δίχως κάποια αξιοσημείωτη εμφάνιση φαινομένων ηλιακής-επίγειας δραστηριότητας. Παρατηρείται μια αύξηση που φτάνει μέχρι το 5% και θεωρείται αμελητέα όσον αφορά την ενεργό δόση των 20 μSv που λαμβάνονται σε συνθήκες ήπιας ηλιακής δραστηριότητας. Μάλιστα, σε αντιστοιχία που κάνει το μοντέλο σε μέρες λαμβανόμενης δόσης από την φυσική ακτινοβολία υποβάθρου, το νούμερο αυτό δεν φαίνεται να αλλάζει και στις δύο περιπτώσεις αντιστοιχεί σε 3 ημέρες έκθεσης στην φυσική ακτινοβολία υποβάθρου.



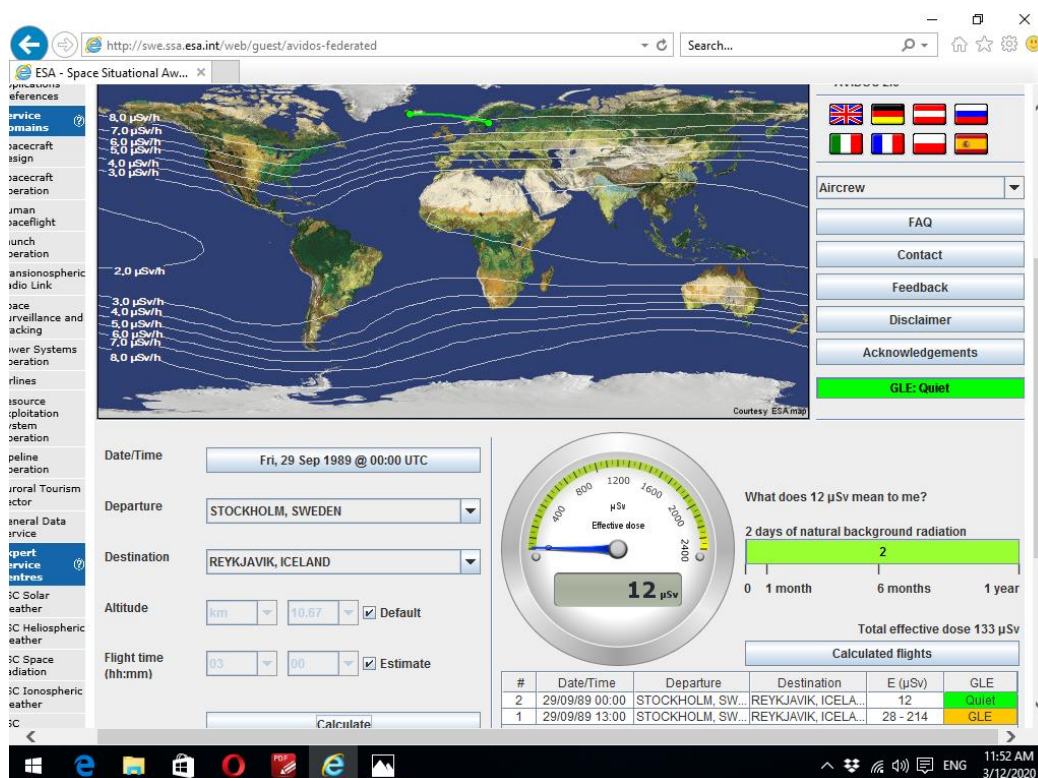
Εικόνα 4.15: Η επίδραση της επίγειας επαύξησης κοσμικής ακτινοβολίας στην τιμή της ενεργού δόσης που λαμβάνουν οι επιβάτες μιας πτήσης από την Στοκχόλμη στο Ρέικιαβικ, κατά την διάρκεια του GLE 72.

Στη συνέχεια, με το Avidos πραγματοποιούμε παρόμοιο υπολογισμό της ενεργού δόσης, για την ίδια πτήση αλλά σε διαφορετική ημερομηνία και ώρα ώστε να παρατηρήσουμε την επίδραση του φαινομένου GLE 42 στο πλήρωμα και τους επιβάτες της πτήσης. Η επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας GLE 42 έλαβε χώρα στις 29 Σεπτεμβρίου 1989 και ώρα 13:25 UT, όπου το φαινόμενο έλαβε την μέγιστη τιμή του.

Το αποτέλεσμα του υπολογισμού με το μοντέλο Avidos μας δείχνει ότι, η ενεργός δόση που λαμβάνουν οι επιβάτες και το πλήρωμα της πτήσης κατά την διάρκεια εκδήλωσης του φαινομένου GLE 42, διαφέρει σημαντικά από αυτή που λαμβάνουν σε συνθήκες ήπιας ηλιακής δραστηριότητας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια αύξηση που φτάνει από το 133,33% (28 μSv) μέχρι το 1683,33% (214 μSv), με το πρόγραμμα να μας δίνει τον μέσο όρο της ενεργού δόσης στα 121 μSv, δηλαδή αύξηση 908,33% σε σχέση με την τιμή της ενεργού δόσης των 12 μSv που λαμβάνονται σε συνθήκες ήπιας ηλιακής δραστηριότητας. Μάλιστα, σε αντιστοιχία που κάνει το μοντέλο σε μέρες λαμβανόμενης δόσης από την φυσική ακτινοβολία υποβάθρου, το νούμερο αυτό διαφοροποιείται σημαντικά και από δύο (2) ημέρες έκθεσης στην φυσική ακτινοβολία υποβάθρου, ανέρχεται σε δεκαοχτώ (18) ημέρες.

Κάνοντας μια αντιστοίχιση της ενεργού δόσης που λαμβάνουμε σε μια τέτοια πτήση, υπό την επίδραση του GLE 42, βλέπουμε ότι ισοδυναμεί με την δόση που λαμβάνει κάποιος άνθρωπος κάνοντας μια ακτινογραφία θώρακος ($\approx 20 \mu\text{Sv}$) (στην κατώτερη λαμβανόμενη δόση) και με το ετήσιο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο έκθεσης σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο, σύμφωνα με τον Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών EPA. Αν δεχτούμε ως μέση τιμή ενεργού δόσης τα $121 \mu\text{Sv}$, όπως μας δίνει το μοντέλο Avidos, τότε μπορούμε να δούμε πως η δόση αυτή αντιστοιχεί περίπου στη συνολική δόση που έλαβαν οι εργαζόμενοι στο δημαρχείο της Φουκοσίμα, 2 εβδομάδες μετά το ατύχημα του πυρηνικού εργοστασίου.

Το συμβάν GLE 42 επιλέχθηκε επειδή αποδείχθηκε το πιο έντονο γεγονός με την μεγαλύτερη ένταση, στο σχετικιστικό ενεργειακό εύρος, για τον 22^ο ηλιακό κύκλο. Σύμφωνα με το σύνολο των δεδομένων (συμπεριλαμβανομένων των αρχείων από τους μετρητές νετρονίων) που χρησιμοποιήθηκαν για την διαμόρφωση του καταλόγου SPE 1987-1996 (Sladkova et al. 1998), το φάσμα του GLE42 προσδιορίστηκε με ενέργειες τουλάχιστον πάνω από 10 GeV.



Εικόνα 4.16: Η επίδραση της επίγειας επαύξησης κοσμικής ακτινοβολίας στην τιμή της ενεργού δόσης που λαμβάνουν οι επιβάτες μιας πτήσης από την Στοκχόλμη στο

Ρέικιαβικ, κατά την διάρκεια του GLE 42 σε σχέση με την ενεργό δόση που λαμβάνουν για την ίδια πτήση, σε διαφορετική ώρα πραγματοποίησή της.

4.4. CARI

4.4.1. Γενικά

Η χρηματοδότηση του έργου αυτού υποστηρίχθηκε από το τμήμα ερευνών της αεροδιαστημικής ιατρικής, του ινστιτούτου πολιτικής αεροδιαστημικής ιατρικής (Aerospace Medical Research Division of the Civil Aerospace Medical Institute-CAMI) που λειτουργεί υπό την αιγίδα του τμήματος μεταφορών ομοσπονδιακής αεροπορίας/τμήμα διοίκησης αεροδιαστημικής ιατρικής των Ηνωμένων Πολιτειών.

Το CARI-7A αναπτύχθηκε για να ξεπεράσει αρκετούς περιορισμούς CARI-6:

1. το όριο υψομέτρου για τους υπολογισμούς έχει επεκταθεί από τα 27 στα 100 χιλιόμετρα
2. η προσεγγιστική εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης πλέον δεν είναι υποχρεωτική και δίνεται σαν επιλογή
3. δεν απαιτείται εξομοιωτής (emulator) του λειτουργικού συστήματος (DOS) σε σύγχρονα συστήματα
4. ο χρήστης μπορεί τώρα να επιλέξει από πολλαπλά μοντέλα GCR.
5. η μείωση Forbush και η γεωμαγνητική καταιγίδα συμπεριλαμβάνονται απευθείας
6. η ροή των σωματιδίων, η ενεργός δόση και η ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος ($H^*(10)$) είναι νέες επιλογές

Το CARI-7A χρησιμοποιεί σύγχρονα μοντέλα GCR, σε συνδυασμό με δεδομένα ατμοσφαιρικών καταγισμών όπως υπολογίζονται με το λογισμικό MCNPX 2.7.0, που αποτελεί έναν αξιόπιστο τρόπο υπολογισμού για την μεταφορά σωματιδίων σε Monte Carlo, το οποίο έχει την ικανότητα να μοντελοποιήσει πυρηνικές αλληλεπιδράσεις υψηλής ενεργείας των HZE (high (H) atomic number (Z) and energy (E)) με άτομα της ατμόσφαιρας. Με αυτό τον τρόπο γίνεται μη απαραίτητη η χρήση της αρχής της υπέρθεσης για προσέγγιση στον υπολογισμό του ζητούμενου μεγέθους. Για να φτιαχτεί το CARI-7A, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MCNPX 2.7.0 για να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων του συνόλου των φασμάτων ατμοσφαιρικών σωματιδίων που προκύπτουν από προσπίπτοντα πρωτογενή σωματίδια GCR, ισότροπα, με ενέργειες μέχρι 1 TeV και σε επιλεγμένα υψόμετρα. Τα φάσματα των σωματιδίων σε κάθε υψόμετρο στη συνέχεια

μετατράπηκαν σε δόσεις με τη χρήση υπαρχόντων συντελεστών που συσχετίζουν τα φαινόμενα αυτά με τις δόσεις. Με αυτή τη βάση δεδομένων, η ατμοσφαιρική απόκριση στην επίδραση της GCR μπορεί να διαβαθμιστεί ώστε να ταιριάζει με την επίδραση GCR για οποιοδήποτε χρονικές συνθήκες. Το μοντέλο που προέκυψε συγκρίθηκε με τις μετρήσεις καθώς και με άλλα μοντέλα ικανά για παρόμοιους υπολογισμούς. Στο μέτρο του δυνατού, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις τόσο σε υψόμετρα εμπορικών πτήσεων αλλά και υψόμετρα πάνω από το μέγιστο Pfozter. Σε χαμηλότερα υψόμετρα, η σύγκριση περιλάμβανε τα περισσότερα γνωστά προγράμματα υπολογισμού δόσεων, ενώ σε μεγάλα υψόμετρα για την σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα NAIRAS και PHITS.

4.4.2. Μοντέλα GCR

Υπάρχουν πολλά μοντέλα διαθέσιμα που μπορούν να περιγράψουν το περιβάλλον των GCR στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Με βάση την αξιολόγηση της NASA των μοντέλων GCR, δύο περιλαμβάνονται σήμερα στο CARI-7A: το ISO 15390: 2004 (ISO) και το μοντέλο των Badhwar και O'Neill το 2011 (BO11). Το ISO και το μοντέλο BO11 είναι δύο από τα καλύτερα σύγχρονα μοντέλα που είναι διαθέσιμα. Κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα παρέχει το φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στην τροχιά της Γης (δηλ. σε απόσταση 1 AU από τον Ήλιο), αλλά μακριά από το μαγνητικό πεδίο της Γης, μέσω της ηλιακής διαμόρφωσης ενός υποθετικά σταθερού, σε τοπικό επίπεδο, διαστρικού φάσματος GCR (Local Interstellar GCR Spectrum-LIS). Κατά την ενσωμάτωση, το κάθε μοντέλο διατηρεί το δικό του LIS και την δική του ηλιακή διαμόρφωση. Τα μοντέλα αυτά μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν ή και να προστεθούν νέα μοντέλα με ελάχιστη ή καθόλου (στην περίπτωση ενός προκαθορισμένου φάσματος) προσπάθεια κωδικοποίησης.

Για να υπολογίσετε τις μειώσεις Forbush και άλλες μικρές διαμορφώσεις στην ηλιακή δραστηριότητα, σε χρονική κλίμακα από μια ώρα έως μια μέρα, εξαιτίας παροδικών συνθηκών διαστημικού καιρού, η ροή των GCR διαμορφώνεται σε αναλογία (1:1) με τις ωριαίες μεταβολές στον ρυθμό καταγραφής των ανιχνευτών νετρονίων που βρίσκονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και σε υψόμετρο κοντά στη θάλασσα (Lantos, 2005). Για τις περιόδους πριν από τον Οκτώβριο του 1995, χρησιμοποιούνταν τα δεδομένα από τον ανιχνευτή νετρονίων Deep River (Καναδά). Μετά, η λειτουργία του εν λόγω ανιχνευτή τερματίστηκε και από τότε μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από τον ανιχνευτή Apatity (Ρωσία).

Στο CARI-6 δεν ήταν δυνατόν να μελετήσουμε ακραία φαινόμενα, όπως πρωτονικά γεγονότα, μειώσεις Forbush ή GLEs, καθώς δεν παρέχει ωριαίες ή ημερήσιες τιμές αλλά αποκλειστικά μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

a. Σωματίδια

Ενώ γενικά η ηλιακή δραστηριότητα δεν είναι σταθερή, η διαπλανητική κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από περίπου 85% πρωτόνια, 14% α-σωματίδια και 1% βαρύτεροι πυρήνες, και οι ροές των σωματιδίων με βάρος μεγαλύτερο από το σίδηρο να είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από τον σίδηρο. Η πρωτογενής GCR που επιλέχτηκε (ιόντα H-Fe για μεταφορά πυρηνικών αντιδράσεων, ισοδύναμες ροές p και n για την προσέγγιση με χρήση υπέρθεσης), επιλέχτηκε με βάση το σημαντικό ρόλο που παίζει στον ρυθμό δόσης, στην ατμόσφαιρα. Εκτός από αυτά ιόντα, άλλα σωματίδια που μεταφέρονται στην πρωτογενή γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία είναι: νετρίνα, καόνια, μιονία, πιόνια, φωτόνια, e^+ , e^- , n^0 , d^+ , t^+ και $3He^{++}$. Τα καόνια, τα νετρίνα και το π^0 δεν συμπεριλήφθηκαν στις υπολογιζόμενες δόσεις.

b. Γεωμαγνητισμός

Το μοντέλο MCNPX 2.7.0 δεν επιτρέπει τον καθορισμό των «εξωτερικών» μαγνητικών πεδίων, έτσι οι επιδράσεις των πεδίων συμπεριλαμβάνονται ως διαμορφώσεις στο πρωταρχικό φάσμα εισόδου της GCR στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας ως βασικά δεδομένα για δημιουργία φίλτρων υψηλής διέλευσης στην ατμόσφαιρα, την επίδραση της κατακόρυφης δυσκαμψίας (R_c), στην τοποθεσία και το υψόμετρο που εισήγαγε ο χρήστης. Η μέθοδος του Al Anid χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την επίδραση στην τιμή της κατακόρυφης δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια γεωμαγνητικών διαταραχών, έχοντας τον δείκτη K_p μεγαλύτερο του 5 (δηλαδή γεωμαγνητικές καταιγίδες).

Μόλις υπολογιστεί η πραγματική κατακόρυφη αποκοπή, ο ουρανός πάνω από τον ορίζοντα στη θέση και στο υψόμετρο που θέλουμε, χωρίζεται σε 900 τομείς με διαστάσεις περίπου $1,9^\circ$ με 20° , βασιζόμενοι στις μέσες τιμές των ζενιθίων και αζιμουθιακών γωνιών. Δύο επιλογές είναι διαθέσιμες στο χρήστη για χειρισμό της κατακόρυφης αποκοπής κατά τη διάρκεια της μεταφοράς μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης.

Για την πρώτη επιλογή, η δυσκαμψία R_c εκχωρείται σε όλους τους τομείς, δηλαδή η R_c χρησιμοποιείται ως μαγνητική δυσκαμψία για ολόκληρο τον ουρανό. Στην προσέγγιση αυτή, τα σωματίδια που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από οποιαδήποτε

κατεύθυνση με δυσκαμψία κάτω από το R_c , απορρίπτονται. Για την εκτίμηση της ακρίβειας αυτής της προσέγγισης, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας για μεταφορά ακτινοβολία FLUKA (Monte Carlo) σε συνδυασμό με την απόκριση του ανιχνευτή νετρονίων (Clem et al., 1997). Βρέθηκε πως η κατακόρυφη αποκοπή είναι εντός 10% της τιμής της αποκοπής, από 2 έως 13 GV, με βελτίωση της ακρίβειας (σε όρους ποσοστού απόκλισης) σε μεγαλύτερες τιμές αποκοπής.

Η δεύτερη επιλογή χρησιμοποιεί τη μέθοδο Smart και Shea, με βάση την εξίσωση του Störmer, για τον υπολογισμό των μη κατακόρυφων αποκοπών,

$$R_\alpha = 4R_V \left\{ \left[1 + (1 - \sin(\varepsilon) \sin(\phi) \cos^3(\lambda))^{1/2} \right]^2 \right\}^{-1} \quad (1)$$

όπου R_α είναι η δυσκαμψία αποκοπής σε γωνιακή κατεύθυνση α , ε η γωνία από το ζενίθ του τόπου, ϕ η αζιμουθιακή γωνία μετρημένη δεξιόστροφα από το μαγνητικό βορρά και λ είναι η γεωμαγνητικό γεωγραφικό πλάτος.

c. GCR στην γήινη ατμόσφαιρα

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια εκδοχή με βάθος 100 χιλιομέτρων της US Standard Atmosphere του 1976, έχοντας υποστεί κατάλληλη τροποποίηση για χρήση στο MCNPX. Αποτελείται από ένα ενιαίο προφίλ που αντιπροσωπεύει μια εξιδανικευμένη, σταθερή ατμόσφαιρα για μέτρια ηλιακή δραστηριότητα.

Το MCNPX 2.7.0 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των φασμάτων ατμοσφαιρικών σωματιδίων ανά μονάδα πρωτογενών σωματιδίων που προκύπτουν από τα ιόντα GCR που αλληλεπιδρούν με τα ατμοσφαιρικά συστατικά. Οι πρωτογενείς εισέρχονται στο ατμοσφαιρικό μοντέλο ισοτροπικά σε υψόμετρο 100 χιλιομέτρων, με ενέργειες από 1 MeV έως 1 TeV. Αυτό εξετάστηκε λεπτομερώς ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος υπολογισμού. Επειδή οι φορτισμένοι πυρήνες με ενέργεια κάτω 1 MeV σταματούν γρήγορα (π.χ. ένα ιόν He με ενέργεια 1 MeV έχει μια περιοχή περίπου 0,6 cm σε ξηρό αέρα σε STP (Standard conditions for Temperature and Pressure)), η ενέργεια του 1 MeV επιλέχθηκε ως η ελάχιστη ενέργεια για τα πρωτογενή GCR ιόντα. Το ανώτατο όριο ενέργειας 1 TeV υιοθετήθηκε με βάση συζητήσεις με προγραμματιστές MCNPX.

Κατά τη χρήση του MCNPX, τα υπολογισμένα δεδομένα των καταγισμών έχουν την μορφή δέσμης στην πλατφόρμα CARI. Σαν εναλλακτική λύση των εξαρτώμενων από γωνία μαγνητικών δυσκαμψιών, χρησιμοποιούμε την εξίσωση Chapman:

$$X_{\text{NonVertical}} = X(\cos(\varepsilon))^{-1} \quad (2)$$

όπου X είναι το κατακόρυφο βάθος σε $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ και ε είναι η γωνία από το ζενίθ σε ακτίνια. Το μέγιστο βάθος που μπορεί να υπολογιστεί ένας ισοτροπικός ατμοσφαιρικός καταγισμός είναι 1035 g cm^{-2} .

4.4.3. Επιλογές προγράμματος

Το CARI-7A προσφέρει στον χρήστη τέσσερις επιλογές για την μεταφορά ενέργειας των ατμοσφαιρικών καταγισμών:

1. Χρησιμοποίηση του R_c ως δυσκαμψία αποκοπής για όλες τις γωνίες προσέγγισης και χρησιμοποιούνται τα ισοτροπικά δεδομένα καταγισμών όπως είναι.
2. Αντιμετωπίζεται το ισοτροπικά περιστασιακό καταγισμό όπως είναι, και χρησιμοποιούνται εξαρτώμενες από γωνίες δυσκαμψίες αποκοπής για να περιοριστεί ο ισοτροπικός καταγισμός εισόδου, κάνοντας χρήση της εξίσωση (1).
3. Χρησιμοποίηση R_c ως δυσκαμψία αποκοπής για όλες τις γωνίες προσέγγισης, και αντιμετωπίζονται τα δεδομένα των ισοτροπικά γεγονότα καταγισμών σαν ακτινωτά, χρησιμοποιώντας το βάθος κλίσης όπως υπολογίζεται με την εξίσωση (2).
4. Να θεωρήσουμε τα δεδομένα των καταγισμών ως ακτινωτά, χρησιμοποιώντας τις εξαρτώμενες από γωνία δυσκαμψίες αποκοπής καθώς και του βάθους κλίσης.

Για καθεμία από τις τέσσερις επιλογές μεταφοράς, μπορεί να προκύψουν καταγισμοί που μπορούν να κατασκευαστούν είτε χρησιμοποιώντας το σύνολο των δεδομένων των πυρηνικών μεταφορών ατμοσφαιρικών καταγισμών (δηλ. πρωτόνια μέσω πυρήνων σιδήρου εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, που είναι γνωστοί ως πυρήνες μεταφοράς) ή με προσεγγιστική επεξεργασία των δεδομένων ατμοσφαιρικών καταγισμών (μετά από γεωμαγνητικό φιλτράρισμα, σωματίδια άλφα και βαρύτερα ιόντα εισέρχονται στην ατμόσφαιρα ως ισοδύναμες πρόσθετες επιδράσεις ελεύθερων νετρονίων και πρωτονίων, ίδιας ποσότητας ενέργειας ανά νουκλεόνιο).

4.4.4. Επιλογές εξόδου-μετατροπή της σωματιδιακής ροής GCR σε δόση

Υπάρχουν πέντε επιλογές εξόδου για μετατροπή της σωματιδιακής ροής GCR σε δόση:

1. επιδράσεις στα ατμοσφαιρικά σωματίδια
2. ενεργός δόση με βάση τις συστάσεις που περιλαμβάνονται στην ICRP Pub.(E₆₀)
3. ενεργός δόση με βάση τις συστάσεις που περιλαμβάνονται στην ICRP Pub. (E₁₀₃)

4. ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)$

5. ολοσωματική απορροφήσιμη δόση

Μπορεί να υπολογιστεί είτε η συνολική ή είτε η δόση από ένα συγκεκριμένο σωματίδιο (μια πλήρης λίστα με 37 σωματίδια (με χρήση του MCNPX 2.7.0) (Copeland, 2014).

Ενώ είμαστε κοντά στη Γη, τα ισοτροπικά μοντέλα με έκθεση από πάνω είναι πιο ρεαλιστικά από τα ισοτροπικά μοντέλα που αφορούν την έκθεση ακτινοβολίας επιβατών σε μέσα εναέριας μεταφοράς. Γι' αυτό το λόγο, το πρόγραμμα CARI-7A χρησιμοποιεί συντελεστές ισότροπης έκθεσης, δεδομένου ότι μας παρέχουν την καλύτερη αντιστοίχιση με τους συντελεστές της ισότροπης έκθεσης από πάνω, οι οποίοι και μπορούν να συγκριθούν. Οι συντελεστές των σωματιδίων στον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ δεν είναι διαθέσιμοι και χρησιμοποιούνται απευθείας για την υποκατάστασή τους, οι συντελεστές για την E_{103} . Τέλος, για τις ενέργειες σωματιδίων για περιοχές εκτός του εύρους των πινάκων, χρησιμοποιούνται οι ακραίες τιμές.

4.4.5. Δόσεις πτήσεων

Οι δόσεις των πτήσεων υπολογίζονται ολοκληρώνοντας τις δόσεις μιας μόνο τοποθεσίας, κατά μήκος της διαδρομής, όπως προκύπτει από τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης. Θεωρείται ότι το αεροσκάφος ακολουθεί μια διαδρομή που περιγράφεται από μια γεωδαιτική πορεία (δηλαδή τη συντομότερη δυνατή διαδρομή) μεταξύ της αφετηρίας και του αεροδρομίου προορισμού και ξεκινά από την καθορισμένη ώρα (εάν έχει οριστεί). Η γεωδαιτική πορεία της διαδρομής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα προγράμματα FORWARD και INVERSE. Για τον υπολογισμό της διαδρομής, έχουμε κάνει την υπόθεση ότι ταξιδεύουμε με σταθερή ταχύτητα, όπως και ό,τι σταθερός είναι ο ρυθμός ανόδου και καθόδου. Στο αποτέλεσμα, λοιπόν, υπολογίζεται η πτήση στο κάθε λεπτό της και αθροίζονται συνολικά τα επί μέρους.

4.4.6. Αβεβαιότητες προγράμματος

Κάθε υπολογιστικό μοντέλο χαρακτηρίζεται από κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας, όσον αφορά στον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών-δόσεων. Το μοντέλο CARI-7A μεταχειρίζεται τον κώδικα MCNPX 2.7.0 (Monte Carlo N-Particle code). Αν θεωρήσουμε τα μοντέλα GCR (ISO 15390 και BO11) και τους συντελεστές μετατροπής ροής σε δόση ως σταθερές, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε τα αποτελέσματα ως καθορισμένα, δηλ. μας

δίνουν τα ίδια αποτελέσματα για το ίδιο υπολογισμό. Οι αναφερθείσες αβεβαιότητες είναι μόνο στατιστικές και ανάλογες με τις αναφερόμενες αβεβαιότητες για τους συντελεστές ροής σε δόση, όπως υπολογίζονται με κώδικα FLUKA και αβεβαιότητες στη ροή των σωματιδίων που αναφέρθηκαν από το MCNPX. Έτσι, εμφανίζεται συσσώρευση στατιστικών αβεβαιοτήτων των αποτελεσμάτων όσον αφορά την διαδικασία υπολογισμού. Όταν συνδυάζονται υποθέτοντας ότι είναι ανεξάρτητοι και έχουν κανονικότητα, ποικίλλουν ανάλογα με την κατακόρυφη και κάθετη δυσκαμψία αποκοπής, ανέρχονται σε περίπου 0,5% (0,1-0,8%) για την ενεργό δόση (στο βαθμό που τα δεδομένα δεν είναι πραγματικά ανεξάρτητα, κλπ., αυτό έχει μικρή σημασία. Υπάρχουν αρκετές άλλες πηγές αβεβαιότητας στα μοντέλα που είναι μεγαλύτερες από αυτές, συμπεριλαμβανομένων γνωστές αδυναμίες στις μεθόδους, όπως:

1. Η έλλειψη των επιδράσεων τοπικού μαγνητικού πεδίου στο MCNPX με όσον αφορά τις διαδρομές σωματιδίων,
2. παράβλεψη της επανεισόδου των σωματιδίων.
3. οι διαφορές των διαφόρων GCR μοντέλων (προφανείς με την σύγκριση των αποτελεσμάτων ISO και BO11 που περιλαμβάνονται παρακάτω),
4. οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να αποδοθούν οι άγνωστοι συντελεστές μετατροπής ροής-δόσης, όπως είναι οι συντελεστές βαρέων ιόντων,
5. η εισαγωγή (κατόπιν σύμβασης) της κατακόρυφης δυσκαμψίας,
6. επίδραση της δομής του αεροσκάφους και της φόρτωσης του και το ατμοσφαιρικό μοντέλο.

Συνδυάζοντας τις εκτιμώμενες αβεβαιότητες από αυτές πηγές και έχοντας συντελεστή ασφαλείας 2 για υπολογισμό ενός μόνο σημείου σε βάθος 250 g cm^{-2} , η αβεβαιότητα εκτιμάται στο 33%.

4.4.7. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο ISO GCR είναι πολύ κοντά σε σχέση με εκείνα που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο BO11 GCR, αλλά σταθερά υψηλότερα σε τιμή κατακόρυφης δυσκαμψίας $R_c = 17 \text{ GV}$. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο BO11 πιστεύεται ότι είναι η πιο ακριβής από τα δύο GCR μοντέλα.

Ακόμα, στους υπολογισμούς μας θεωρούμε ότι τα δεδομένα των καταγισμών προέρχονται από προσομοίωση ισοτροπικής ακτινοβολίας, στο σύνολο του ουράνιου θόλου και γνωρίζουμε ότι τα αποτελέσματα, κάνοντας χρήση των πυρηνικές μεταφορών

για HZEs, είναι πιο ρεαλιστικά σε μεγάλα υψόμετρα, από ότι ο προσεγγιστικός υπολογισμός με χρήση υπέρθεσης.

4.4.8. Μετρήσεις σε υψόμετρο εμπορικής πτήσης

Το 2010, το ICRU δημοσίευσε ένα σύνολο τιμών ισοδύναμων δόσεων $H^*(10)$ που προέρχονται από μετρήσεις για εμπορική πτήση υψόμετρα σε βάθη 293, 243 και 201 $g \cdot cm^{-2}$ (σε επίπεδα πτήσεων-flight level (FL) 310, 350 και 390 [επίπεδο πτήσης είναι ένα πρότυπο της αεροπορικής βιομηχανίας για τα αναφερόμενα υψόμετρα και την ισοδυναμία τους σε εκατοντάδες πόδια (ft), έτσι, το FL 300 ισοδυναμεί σε υψόμετρο περίπου 9 km ή σε ατμοσφαιρικό βάθος 306 $g \cdot cm^{-2}$]). Το σύνολο αυτό προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένα για την επαλήθευση και αξιολόγηση της δόσης, όπως προκύπτει από τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα. Το σύνολο προέκυψε με πάνω από 20.000 μετρήσεις που έγιναν από το 1992 έως το 2006, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία οργάνων-ανιχνευτών, και αναλύθηκαν με τις μεθόδους ανάλυσης Bayesian για την χρησιμοποίησή τους για τη δημιουργία του υπολογιστικού λογισμικού υπολογισμού της δόσης FDOScale. Η ICRU θεωρεί κατάλληλα μοντέλα τη δοσιμετρία στην αεροπλοΐα εάν τα αποτελέσματα είναι σταθερά εντός 30% των δεδομένων.

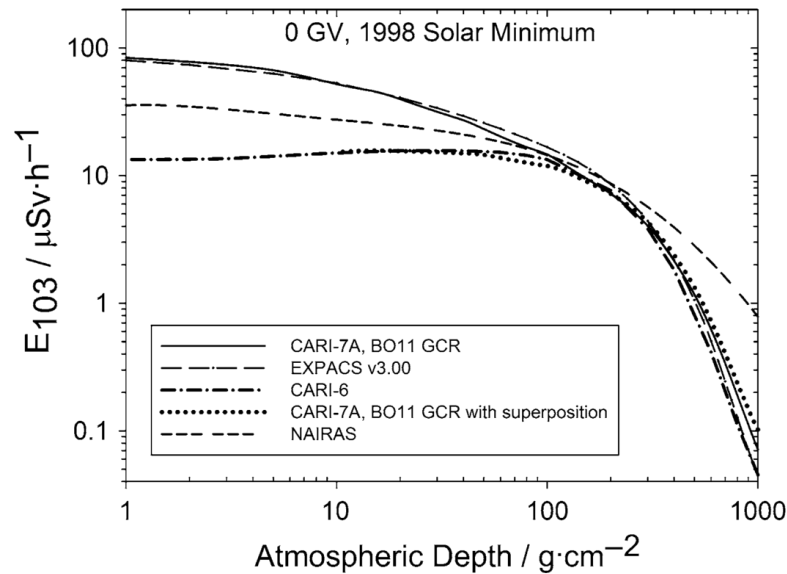
Από τις αποκλίσεις (%) των υπολογισμών του μοντέλου CARI-7A (χρησιμοποιώντας το BO11 Μοντέλο GCR και πυρηνική μεταφορά για HZEs), της ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ σε σχέση με τα δεδομένα ICRU, παρατηρούμε ότι υπάρχει εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των δύο, με το ποσοστό της διαφοράς να κυμαίνεται από -4 σε 14%, με τις μέσες τιμές να πλησιάζουν το 5%, σε κάθε υψόμετρο.

Η αξιοσημείωτη εξαίρεση είναι η δια-ισημερινή διαδρομή, για την οποία η ισοδύναμη δόση $H^*(10)$ υπερβαίνει κατά 34% την αντίστοιχη στη βάση δεδομένων της ICRU (2010).

4.4.9. Συγκρίσεις με τα μοντέλα

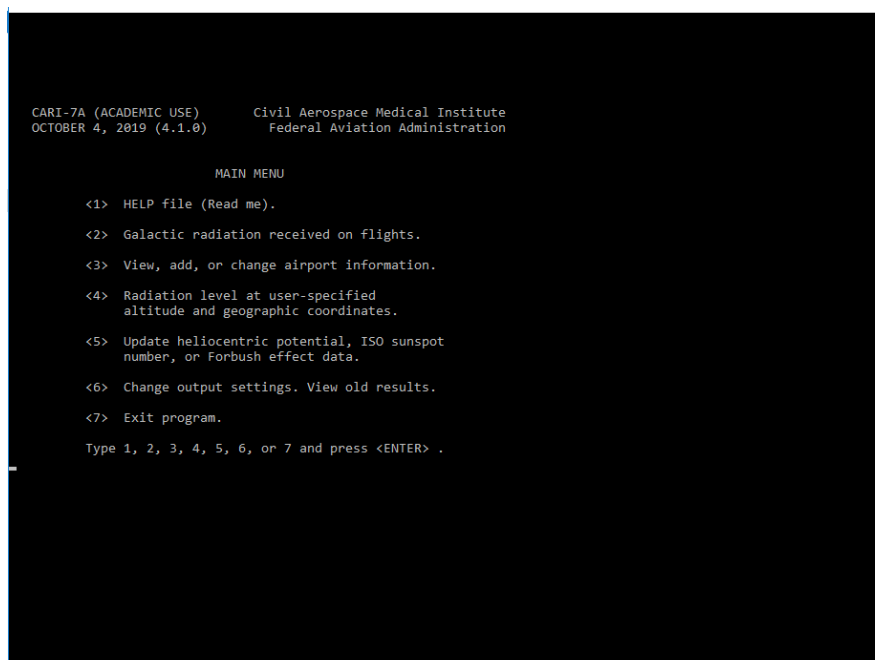
Η εικόνα 4.17 δείχνει το προφίλ της ενεργού δόσης υπολογισμένο με το μοντέλο CARI-7A (BO11 GCR), με και χωρίς να χρησιμοποιηθεί προσέγγιση υπέρθεσης, το μοντέλο EXPACS v3.00 (βασισμένο στο PHITS), το μοντέλο NAIRAS (με βάση το HZETRN) και μια ειδική παραλλαγή του CARI-6 (με βάση το LUIN2000), τροποποιημένο για να αφαιρεθεί ο περιορισμός του υψομέτρου και να μπορεί να υπολογίζει την ενεργό δόση όπως συνιστάται στο ICRP Pub. 103.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω μοντέλα βλέπουμε ότι το CARI-7A, το NAIRAS, το EXPACS αλλά και τα άλλα δύο μοντέλα με τις πυρηνικές μεταφορές των HZEs, δίνουν αξιόπιστες και παραπλήσιες τιμές είναι σε υψόμετρα εμπορικών πτήσεων. Και τα τρία υπολογιστικά μοντέλα έχουν την λογική απόκλιση ($\pm 30\%$) σε υψόμετρα μεταξύ 40 και 300 g cm⁻², αλλά το μοντέλο NAIRAS αποκλίνει σημαντικά σε υψηλότερες και χαμηλότερες τιμές υψομέτρου.



Εικόνα 4.17: Ο ρυθμός της ενεργού δόσης σε συνάρτηση με το ατμοσφαιρικό βάθος, σύμφωνα με το ICRP Pub. 103, όπως υπολογίζεται από το:

- a. CARI-7A χρησιμοποιώντας BO11 GCR, με τις μαγνητικές δυσκαμψίες να είναι ανεξάρτητες από γωνίες και βάθος, και πυρηνικής μεταφορά των HZEs.
- b. EXPACS.
- c. CARI-6, το οποίο χρησιμοποιεί προσέγγιση υπέρθεσης.
- d. CARI-7A όπως προηγουμένως, αλλά χρησιμοποιώντας την προσέγγιση υπέρθεσης αντί για πυρηνική μεταφορά των HZEs.
- e. και NAIRAS.



Εικόνα 4.18: Το περιβάλλον για τον υπολογισμό δόσεων, του προγράμματος CARI-7A.

Με χρήση του προγράμματος Car7-7A, πραγματοποιούμε υπολογισμούς για την μέσο ετήσιο ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, για περιοχές με διαφορετικές συντεταγμένες πάνω στη Γη, που χαρακτηρίζονται από διαφορετική τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας R_c .

Σύμφωνα με την έκθεση ICRP 103, ως ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)$ καλούμε τη δόση που ισοδυναμεί σε ένα σημείο του πεδίου ακτινοβολίας την οποία θα παρήγαγε το αντίστοιχο διευρυμένο και ευθυγραμμισμένο πεδίο στη σφαίρα ICRU, σε βάθος $d=10\text{mm}$, στην ακτίνα που είναι αντίθετη προς την κατεύθυνση του ευθυγραμμισμένου πεδίου. Ως σφαίρα ICRU ορίζεται μια σφαίρα με υλικό ισοδύναμο του ιστού (με διάμετρο 30cm , μαλακού ιστού κατά ICRU με πυκνότητα: 1 g/cm^3 και η μάζα αυτή έχει της εξής σύνθεση: 76,2% οξυγόνο, 11,1% άνθρακας, 10,1% υδρογόνο και 2,6% άζωτο).

Επιλέγουμε τις κατάλληλες συντεταγμένες έτσι ώστε να έχουμε περιοχές με τέσσερις (4) διαφορετικές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας R_c , με τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ υπολογισμένο στο υψόμετρο των 35000ft δηλαδή περίπου στα 10668km. Διεθνώς έχει επικρατήσει να αναγράφεται ως FL350 (Flight Level) και θεωρείται το πιο συνηθισμένο υψόμετρο εμπορικών πτήσεων.

Number	Latitude (degrees)	Longitude (degrees)	Rc (GV)	$\approx$ Rc (GV)
1	90	0	0	0
2	45	0	4,84	5
3	35	30	9,34	10
4	20	150	15	15

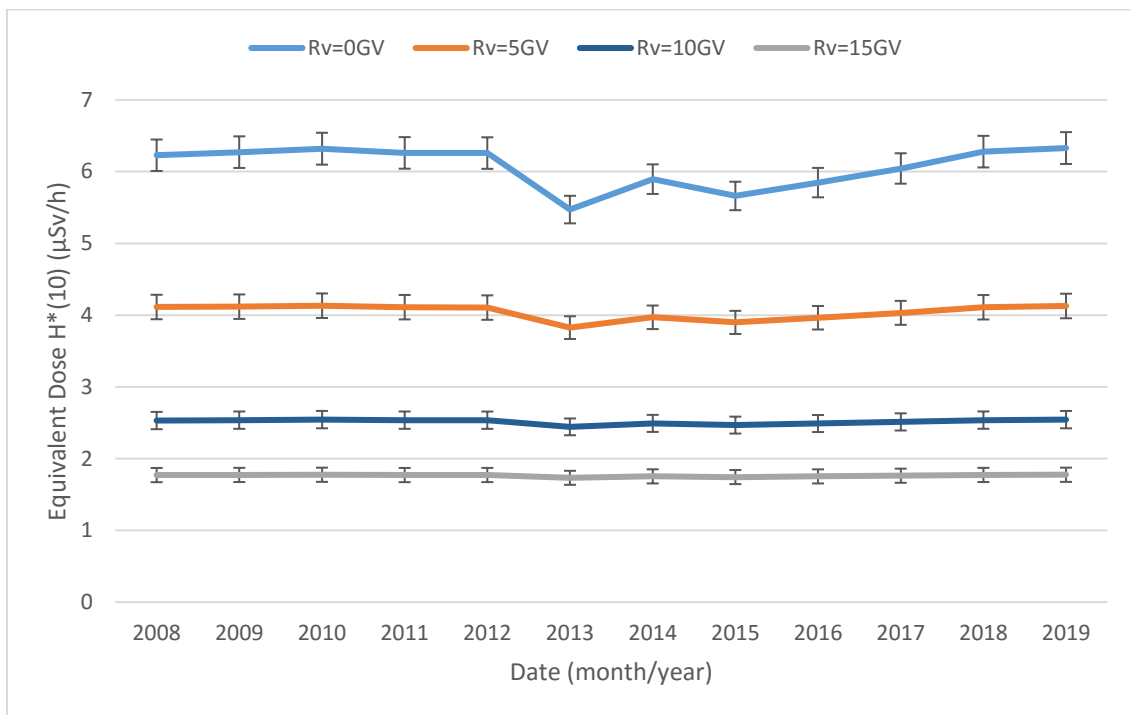
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας των περιοχών (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) που επιλέχθηκαν με βάση την τιμή της μαγνητικής δυσκαμψίας τους.

Η τιμή της μαγνητικής δυσκαμψίας υπολογίστηκε με βάση τους αλγόριθμους των Smart και Shea (2001) και με την βάση δεδομένων από το Διεθνές Πλαίσιο Αναφοράς Γεωμαγνητικού (International Geomagnetic Reference Frame).

Εικόνα 4.19: Το γραφικό περιβάλλον υπολογισμού της τιμής της μαγνητικής δυσκαμψίας αποκοπής των εισερχόμενων πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, για συγκεκριμένες συντεταγμένες.

(Πηγή: <http://cosmos.hwr.arizona.edu/Util/rigidity.php>)

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η τιμή της μαγνητικής δυσκαμψίας Rc έχει στρογγυλοποιηθεί ώστε να έχουμε ακέραιες τιμές. Οι τιμές όπως υπολογίστηκαν καθώς και όπως προέκυψαν μετά την στρογγυλοποίησή τους, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.3.



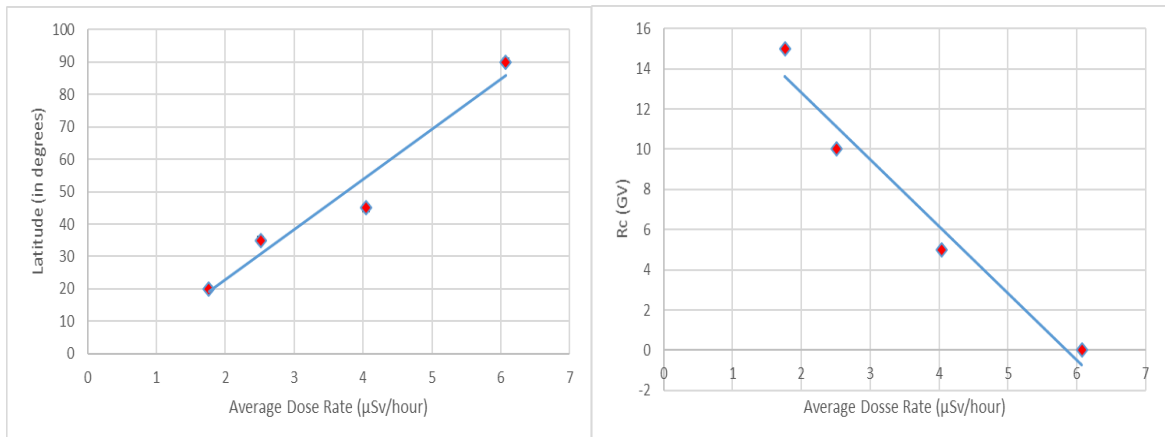
Διάγραμμα 4.7: Γραφική παράσταση του μέσου ετήσιου ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Cari-7A, για τον 24^ο Ηλιακό κύκλο, για περιοχές με συγκεκριμένη τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας R_c και σε υψόμετρο 35000ft.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τα εξής:

- Υπάρχει σαφής εξάρτηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ που λαμβάνουμε με την τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας R_c , της περιοχής μέτρησης.
- Για την περιοχή με μαγνητική δυσκαμψία $R_c \approx 0GV$, υπάρχει πιο εμφανής η αντισυσχέτιση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα. Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ από την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο Cari-7A, εμφανίζει την ελάχιστη τιμή της στο μέγιστο της δραστηριότητας του ηλιακού κύκλου (2013-2014).

Στο διάγραμμα 4.7 έχουμε συμπεριλάβει και τα αντίστοιχα σφάλματα στον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, όπως

υπολογίστηκαν από το μοντέλο Cari-7A, για μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο στον υπολογισμό όσο και στην γραφική τους απεικόνιση.



Διάγραμμα 4.8: Γραφική παράσταση της μέσης τιμής του μέσου ετήσιου ρυθμού ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ σε συνάρτηση:

(Αριστερά) με το γεωγραφικό πλάτος,

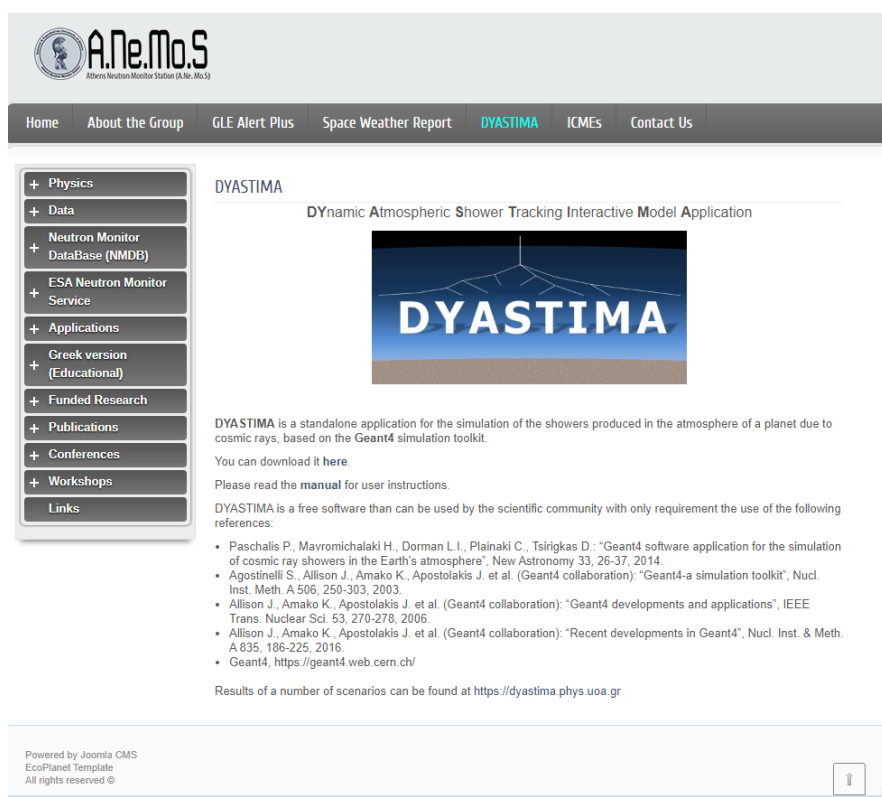
(Δεξιά) με το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, της εκάστοτε τοποθεσίας.

Στο παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται η άμεση εξάρτηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης με το γεωγραφικό πλάτος αλλά και με το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, της εκάστοτε περιοχής. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει η τιμή (μοίρες) του γεωγραφικού πλάτους τόσο μεγαλώνει και η τιμή του μέσου ρυθμού δόσης. Το αντίθετο συμβαίνει στον συσχετισμό της μαγνητικής δυσκαμψίας R_c με τον μέσο ρυθμό δόσης. Για $R_c=0\text{GV}$, ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης $H^*(10)$ εμφανίζει την μεγαλύτερη του τιμή ενώ για $R_c=15\text{GV}$, την μικρότερη.

4.5. DYASTIMA

Ένα μοντέλο προσομοίωσης DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA), έχει αναπτυχθεί με βάση το γνωστό εργαλείο Geant4 (<https://geant4.web.cern.ch>) από την ομάδα A.Ne.Mo.S (Athens Neutron Monitor Station) του Ε.Κ.Π.Α./ Τμήμα φυσικής. Αυτό το μοντέλο μας επιτρέπει να μελετήσουμε τους καταιγισμούς των κοσμικών ακτίνων, που δημιουργούνται καθώς εισέρχονται τα σωματίδια των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα. Η απόκριση του μετρητή νετρονίων στα διάφορα σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνουν στη

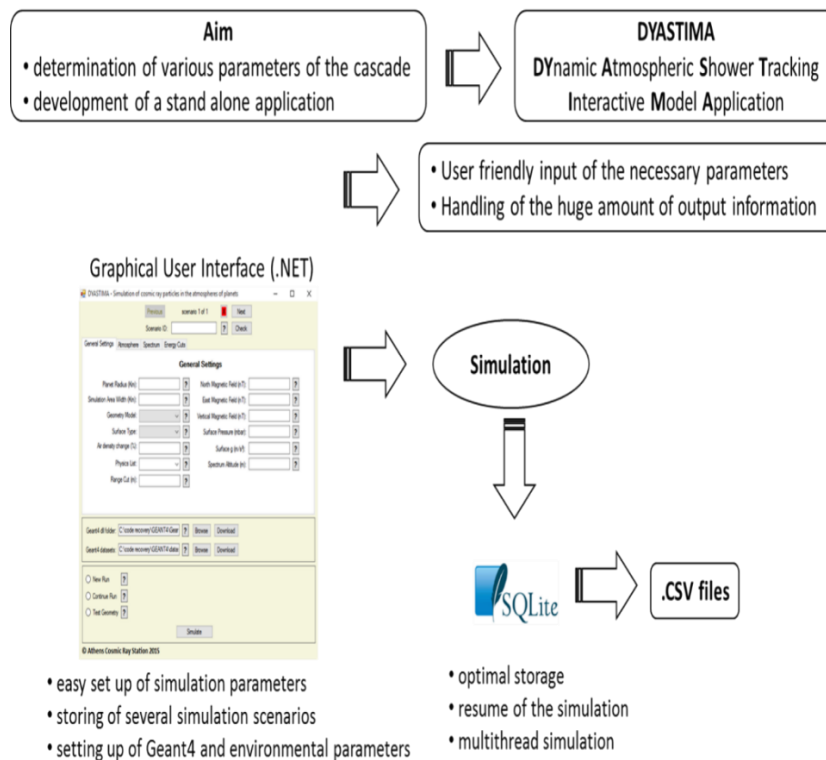
γήινη επιφάνεια, μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τη εφαρμογή προσομοίωσης Geant4 του μετρητή νετρονίων τύπου 6NM-64.



Εικόνα 4.20: Στιγμιότυπο από τον ιστότοπο της ομάδας κοσμικής ακτινοβολίας του πανεπιστημίου Αθηνών (A.NE.MO.S), όπου φαίνεται το πρόγραμμα DYASTIMA.

(Πηγή: <http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>)

Το μοντέλο DYASTIMA μπορεί να καθορίσει την δομή της δέσμης σωματιδίων τα οποία ποικίλουν ως προς τον τύπο, ενέργεια και κατεύθυνση που εισέρχονται στην γήινη ατμόσφαιρα. Τα δεδομένα εξόδου, εξάγονται σε λεπτομερή ή σε συνοπτική μορφή και είναι έτοιμα για χρήση σε γραφική απεικόνιση.



Εικόνα 4.21: Γραφική απεικόνιση του αλγορίθμου λειτουργίας του μοντέλου DYASTIMA-R.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/311925821>)

Το μοντέλο DYASTIMA-R, αποτελεί αναβάθμιση της προηγούμενης έκδοσης του προγράμματος και χρησιμοποιεί τα δεδομένα που εξάγονται από το DYASTIMA για να υπολογίσει την ενέργεια που εναποτίθεται σε ομοίωμα αλλά και την ισοδύναμη δόση $H^*(10)$, μέσω την επιλογής ICRU sphere. Έτσι, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo για να περιγράψουμε τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων και τη μεταφορά της πρωτογενούς και δευτερογενούς ακτινοβολίας μέσω της ύλης, με ειδικά εργαλεία προσομοίωσης, στο ανθρώπινο σώμα (ομοίωμα) και στην θωράκιση του αεροσκάφους (προαιρετικά).

Η εφαρμογή DYASTIMA, είναι ένα προϊόν της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος-ESA (ESA SSA R-ESC). Προκειμένου κάποιος να έχει πρόσβαση στο DYASTIMA-R, θα πρέπει να κάνει download στη σελίδας της ομάδας A.NE.MO.S (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>) και για περισσότερες δυνατότητες, όπως πρόσβαση στη βάση δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να επισκεφθεί την σελίδα της ESA SSA (<http://swe.ssa.esa.int/>) και να συνδεθεί.

The screenshot shows the ESA Space Situational Awareness website. The header includes the ESA logo and 'space situational awareness' text. The main navigation bar lists 'ESA', 'SSA', 'SWE', 'NEO', and 'SST'. The left sidebar contains a 'Non-Space Systems Operations - Service to airlines' section with a 'Service' tab. The main content area provides information about space weather impacts on aviation, a list of tools (AVIDOS, ANeMoS, RadSEP, DYASTIMA, IMPC, RTIM, EIS, IONMON, SWE Data), and two maps: 'Effective dose rate map due to current cosmic radiation' and 'Real-time foF2 index activity map over Europe'.

Εικόνα 4.22: Στιγμιότυπο από τον ιστιότοπο της ESA, στην υπηρεσία της «Λειτουργίες μη διαστημικών συστημάτων - Υπηρεσίες σε αεροπορικές εταιρείες», όπου φαίνεται το πρόγραμμα DYASTIMA.

(Πηγή: http://swe.ssa.esa.int/nsa_air)

Μόλις συνδεθεί, μπορεί να έχει πρόσβαση στην καρτέλα "Βάση δεδομένων", ο χρήστης μπορεί να βρει έναν πίνακα αποτελεσμάτων για διαφορετικούς πλανήτες. Σε αυτή την αρχική φάση, υπάρχουν δύο διαθέσιμα σενάρια για τη Γη, το ένα για το ηλιακό ελάχιστο και το ένα για συνθήκες ηλιακού μέγιστου. Η βάση δεδομένων θα εμπλουτιστεί με περισσότερα σενάρια για τη Γη, καθώς και για άλλους πλανήτες, όπως η Αφροδίτη, ο Άρης και ο Κρόνος.

Στην καρτέλα Request, ο χρήστης μπορεί να ζητήσει μια συγκεκριμένη εκτέλεση σεναρίου, μέσω της διαθέσιμης φόρμας. Μόλις υποβληθεί επιτυχώς το αίτημα, θα σταλεί ένα email επιβεβαίωσης στο χρήστη.

Database

In this section, results of previous runs are provided. Each run corresponds to a specific simulation scenario, hence, specific conditions for the planet, the atmosphere, the cosmic ray spectra and the simulation parameters. A description of each simulation scenario is given along with the corresponding results.

	SOLAR MINIMUM SOLAR MAXIMUM	Description: EARTH - SOLAR MAXIMUM The typical CR spectrum from CREME model for solar maximum conditions is used. The Earth's atmosphere description is based on the International Standard Atmosphere model. The simulation is performed for 100,000 events. The dosimetry calculations are based on ICRP standards. The dosimetry simulation is performed for 10,000 events. The results are validated according to the ICRU (Rep.84) standards. Files • Info file • Radiation dose (1/1) • Energy deposit at each altitude (1/1) • Energy at each altitude (1/2) • Energy at each altitude (2/2) • Direction at each altitude (1/35) • Direction at each altitude (2/35) • Direction at each altitude (3/35) • Direction at each altitude (4/35) • Direction at each altitude (5/35) • Direction at each altitude (6/35) • Direction at each altitude (7/35) • Direction at each altitude (8/35) • Direction at each altitude (9/35) • Direction at each altitude (10/35) • Direction at each altitude (11/35) • Direction at each altitude (12/35) • Direction at each altitude (13/35) • Direction at each altitude (14/35) • Direction at each altitude (15/35) • Direction at each altitude (16/35) • Direction at each altitude (17/35) • Direction at each altitude (18/35) • Direction at each altitude (19/35) • Direction at each altitude (20/35) • Direction at each altitude (21/35) • Direction at each altitude (22/35) • Direction at each altitude (23/35) • Direction at each altitude (24/35) • Direction at each altitude (25/35) • Direction at each altitude (26/35) • Direction at each altitude (27/35) • Direction at each altitude (28/35) • Direction at each altitude (29/35) • Direction at each altitude (30/35) • Direction at each altitude (31/35) • Direction at each altitude (32/35) • Direction at each altitude (33/35) • Direction at each altitude (34/35) • Direction at each altitude (35/35) • Arrival time at each altitude (1/1) References • Tylka J. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 44, 2150-2160, 1997. • Weller R. A. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 57, 1726-1746, 2010. • Mendenhall M. H. and Weller R. A., Nucl. Inst. Meth. A 667, 38-43, 2012. • International Civil Aviation Organization, Doc 7488-CD third ed., 1993. • ICRP, ICRP Publication 123, Ann. ICRP 42, 2013. • ICRU, J. ICRU 10, Report 84, Oxford University Press, 2010.
	coming soon...	
	coming soon...	
	coming soon...	

Εικόνα 4.23: Στιγμιότυπο από τον ιστιότοπο όπου φαίνονται τα σενάρια που υπάρχουν στη βάση δεδομένων καθώς και η δυνατότητα που μας παρέχει το πρόγραμμα να μελετήσουμε σενάρια σε άλλους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος.

(Πηγή: <https://dyastima.phys.uoa.gr>)

Το DYASTIMA είναι μια εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο Microsoft Visual Studio και παρέχει φιλικό γραφικό περιβάλλον στον χρήστη. Απαιτείται ο υπολογιστής να λειτουργεί σε περιβάλλον Microsoft Windows. Το DYASTIMA μπορεί αυτόματα να κατεβάσει όλα τα αρχεία του Geant4 που απαιτούνται και να ορίσει τις απαραίτητες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Η τρέχουσα έκδοση του DYASTIMA χρησιμοποιεί την έκδοση 10.4 του Geant4 και το αντίστοιχο σύνολο δεδομένων του.

Για την εκτέλεση του DYASTIMA, είναι ιδανικό να χρησιμοποιείτε έναν υπολογιστή με μέτριες δυνατότητες, καθώς δεν είναι απαιτητικό. Συνήθως, τα αποτελέσματα της εκτέλεσης μιας προσομοίωσης απαιτούνται περίπου 100 MB χώρου στο δίσκο. Ο απαιτούμενος χώρος στο δίσκο μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη.

DYASTIMA - Simulation of cosmic ray showers in the atmospheres of planets - V2.3

Previous scenario 1 of 1 Next

Scenario ID: ? Check

Planet Spectrum Simulation Energy Cuts Results

Planet Settings ? **Atmospheric Composition** ? **Atmospheric Temperature** ?

Planet Radius (Km): ?

Surface Pressure (mbar): ?

Surface g (m/s²): ?

North Magnetic Field (nT): ?

East Magnetic Field (nT): ?

Vertical Magnetic Field (nT): ?

Surface Type: ?

Previous section 1 of 1 Next

Starting altitude (m): ?

Ending altitude (m): ?

Molecule	Abundance (% Vol)

Altitude (m)	Temperature (°C)

Geant4 dll folder: ? Browse Download

Geant4 datasets: ? Browse Download

Simulation Export Results Dosimetry Extension

Run ID: NEW RUN: Current Scenario ? Events:

☐ Test Geometry

Simulate

© Athens Cosmic Ray Station 2014-2019

Εικόνα 4.24: Το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος DYASTIMA / DYASTIMA-R.
(Πηγή: <https://dyastima.phys.uoa.gr>)

4.5.1. Εκτέλεση προσομοίωσης

4.5.1.1. Είσοδος παραμέτρων

Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση απαιτείται η εισαγωγή διαφόρων παραμέτρων που ανήκουν στις εξής κατηγορίες:

1. Γενικά χαρακτηριστικά του πλανήτη (κατά προσέγγιση), όπως η ακτίνα του, ο τύπος της επιφάνειας καθώς και το μαγνητικό της πεδίο, η πίεση και η επιτάχυνση της βαρύτητας. Επίσης, πρέπει να εισάγουμε και χαρακτηριστικά της δομής της ατμόσφαιρας, όπως σύνθεση και θερμοκρασιακό προφίλ.

Πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά ενός πλανήτη μπορείτε να βρείτε εύκολα στο διαδίκτυο ή στο βιβλία αναφοράς. Μερικά ενδεικτικά παραδείγματα είναι τα ακόλουθα:

- Γη (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>)
- Αφροδίτη (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>)
- Άρης (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>)

Οι τιμές της βόρειας, ανατολικής και κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης είναι διαθέσιμες στο NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>).

2. Χαρακτηριστικά της δομής της ατμόσφαιρας, όπως σύνθεση και θερμοκρασιακό προφίλ.

Ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει διαδοχικές ενότητες από το κάτω έως το πάνω μέρος της ατμόσφαιρας. Για κάθε ενότητα ο χρήστης πρέπει να ορίσει:

- το αρχικό και το τελικό ύψος του τμήματος σε μέτρα.
- τη σύνθεση του τμήματος σε μοριακό τύπο – σύνθεση σε ζεύγη (% Vol).

Το άθροισμα πρέπει να ανέρχεται στο 100%.

Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει ζεύγη υψόμετρου (m) - θερμοκρασίας (° C) από κάτω προς την κορυφή της ατμόσφαιρας.

Μια καλή προσέγγιση της ατμόσφαιρας της Γης παρέχεται από:

- την US Standard Atmosphere

- την International Standard Atmosphere

Και τα δύο μοντέλα είναι ίδια έως και 32 χλμ. Από την επιφάνεια της Γης. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε μέση τιμή συνθηκών, σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη.

3. Φάσματα των σωματιδίων της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας όπως τύποι σωματιδίων, η ροή και το εύρος των συντεταγμένων (ζενίθ και αζιμούθιο).

Για κάθε φάσμα ο χρήστης πρέπει να ορίσει:

- το όνομα σωματιδίων σύμφωνα με τον συμβολισμό που έχει στο Geant4
- τις ελάχιστες και μέγιστες γωνίες ζενίθ των εισερχόμενων σωματιδίων σε μοίρες
- τις ελάχιστες και μέγιστες γωνίες αζιμουθίου των εισερχόμενων σωματιδίων σε μοίρες
- το διαφορικό φάσμα σε ζεύγη ενέργειας / νουκλεόνιο - ροής. Οι μονάδες είναι MeV / n -Σωματίδια / $(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV} / n)$ αντίστοιχα.

Λόγω του μεγάλου αριθμού των διαφορετικών σωματιδίων στο πρωτογενές φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας ($Z = 1$ έως $Z = 26$), το φάσμα υπολογίζεται από τον χρήστη με μοντέλα όπως:

- SPENVIS, (<https://www.spenvis.oma.be/>) από BIRA-IASB και ESA, όπου ο χρήστης μπορεί να βρει τα μοντέλα ISO-15390, CRÈME96 και το μοντέλο των Nymmik et al. 1996
- CRÈME (<https://creme.isde.vanderbilt.edu/>) από το Πανεπιστήμιο Vanderbilt, όπου μπορεί κανείς να βρει το CRÈME96 και το Nymmik et al. 1996, μοντέλο
- OMERE, (<http://www.trad.fr/en/space/omere-software/>) από την εταιρεία TRAD, όπου ο χρήστης μπορεί να βρει το μοντέλο ISO-15390 και το CRÈME96.

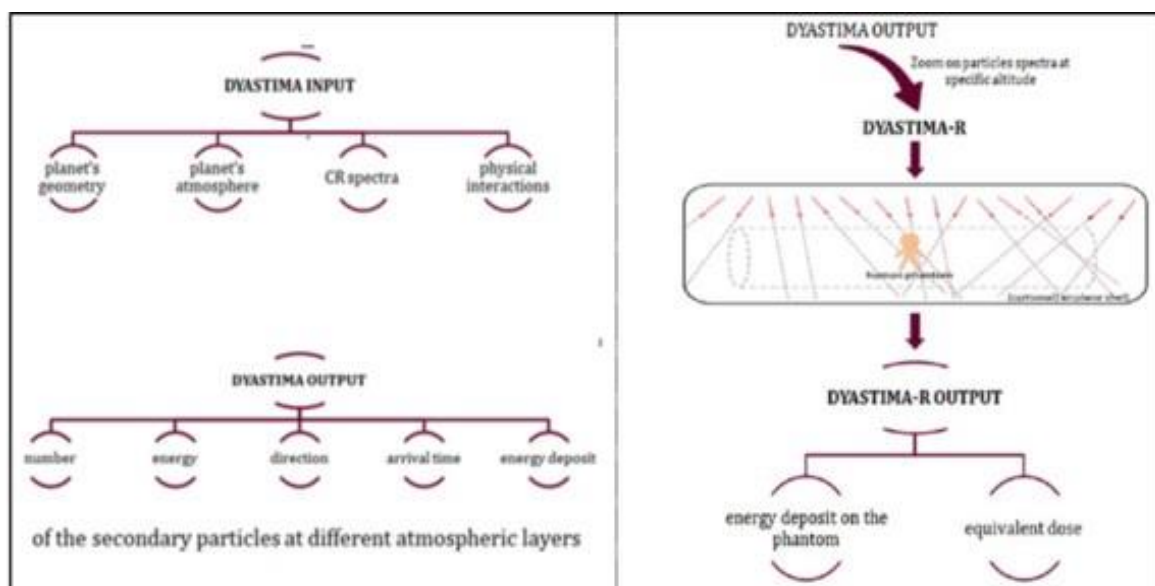
Στο πείραμά μας θα χρησιμοποιήσουμε το OMERE για τον υπολογισμό του διαφορικού φάσματος της πρωτογενούς ακτινοβολίας.

4. Ρυθμίσεις σχετικά με το Geant4 και τη γεωμετρία προσομοίωσης.

Η τρέχουσα έκδοση του DYASTIMA version 2.3 χρησιμοποιεί την έκδοση 10.4 του Geant4 και τα αντίστοιχα δεδομένα. Το DYASTIMA μπορεί να

κατεβάσει αυτόματα όλα τα απαιτούμενα αρχεία του Geant4 και ορίστε τις απαραίτητες μεταβλητές. Ο χρήστης πρέπει να δηλώσει τους φακέλους στους οποίους βρίσκονται τα σύνολα δεδομένων του Geant4 καθώς και την θέση των Geant4 dll (bin folder).

5. τα υψόμετρα όπου πραγματοποιείται η ανίχνευση των σωματιδίων
6. Προαιρετική επιλογή ορισμού της ενέργειας αποκοπή για την παραγωγή, προσομοίωση ή παρακολούθηση των σωματιδίων. Εξαιρούνται σωματίδια με ενέργεια μικρότερη από την καθορισμένη από την παραγωγή, την προσομοίωση ή / και την παρακολούθηση αντίστοιχα. Ο χρήστης πρέπει να ορίσει ζεύγη ονόματος σωματιδίων (συμβολισμός Geant4) - Ενέργεια (MeV). Μια αρνητική ενεργειακή τιμή αποκλείει εντελώς τα σωματίδια.



Εικόνα 4.25: Μπλοκ διάγραμμα των εφαρμογών DYASTIMA / DYASTIMA-R.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/338996452>)

4.5.1.2. Έξοδος αποτελεσμάτων

Το DYASTIMA εκτελεί την προσομοίωση ενός συγκεκριμένου σεναρίου για έναν αριθμό πρωτογενών σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας, όπως έχουν οριστεί από τον χρήστη, παρέχοντας όλα τα απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τον καταγισμό σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Ο χρήστης επιλέγει από το μενού στο κάτω μέρος της εφαρμογής στο "Run ID" το σενάριο που θα γίνει η προσομοίωση. Η επιλογή "NEW RUN: Current Scenario" καθώς

και προηγούμενες προσομοιώσεις που μπορεί να υπάρχουν εμφανίζονται στο μενού, παρέχοντας τη δυνατότητα συνέχισης μιας προηγούμενης προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει μια νέα εκτέλεση του τρέχοντος σεναρίου ή να συνεχίσει ένα προηγούμενο. Επίσης ορίζεται και ο αριθμός των συμβάντων που επιθυμούμε για την προσομοίωση. Τέλος, μπορούν να δοκιμαστεί η γεωμετρία του σεναρίου για ένα συγκεκριμένο σωματίδιο, με συγκεκριμένη ενέργεια και κατεύθυνση. Η δοκιμή αυτή δημιουργεί ένα αρχείο με την επέκταση .heprep που μπορεί να προβληθεί στον ιστιότοπο του HepRApp (<http://www.slac.stanford.edu/~perl/HepRApp/>).

Εάν επιλεγεί μια νέα εκτέλεση, το σενάριο ελέγχεται όταν επιλεγεί το κουμπί προσομοίωσης. Εάν υπάρχουν τυχόν σφάλματα ή μη έγκυρες παράμετροι στο πρόγραμμα τότε αυτό έχει την δυνατότητα να το υποδείξει στον χρήστη. Εάν το σενάριο είναι έγκυρο, το σενάριο με αυτό το ID σχετίζεται με την ημερομηνία και ώρα εκτέλεσης του προγράμματος και δημιουργείται ένας νέος φάκελος με αυτό το όνομα, στο φάκελο αποτελεσμάτων του DYASTIMA. Αυτός ο φάκελος περιέχει τρία αρχεία:

- το αρχείο δεδομένων
- ένα αρχείο .txt που περιέχει τις παραμέτρους του σεναρίου
- ένα αρχείο .txt που περιέχει την έξοδο του Geant4

Εάν ο χρήστης προχωρήσει με το DYASTIMA-R, θα προστεθούν δύο ακόμη αρχεία στο φάκελο:

- το αρχείο βάσης δεδομένων για υπολογισμούς δοσιμετρίας
- ένα αρχείο .txt που περιέχει την έξοδο του Geant4 για υπολογισμούς δοσιμετρίας

Name	Date modified	Type	Size
 EARTH_SOLAR_MINIMUM_OGV_12-11-2018_12-18-23	12/11/2018 12:21	Data Base File	8,408 KB
 EARTH_SOLAR_MINIMUM_OGV_12-11-2018_12-18-23_DOSIMETRY	12/11/2018 12:40	Data Base File	16,328 KB
 EARTH_SOLAR_MINIMUM_OGV_12-11-2018_12-18-23_DOSIMETRY_output	12/11/2018 12:40	Text Document	37 KB
 EARTH_SOLAR_MINIMUM_OGV_12-11-2018_12-18-23_output	12/11/2018 12:18	Text Document	38 KB
 INFO_EARTH_SOLAR_MINIMUM_OGV_12-11-2018_12-18-23	12/11/2018 12:18	Text Document	148 KB

Εικόνα 4.26: Τα αρχεία που δημιουργούνται από την προσομοίωση του προγράμματος DYASTIMA και DYASTIMA-R.

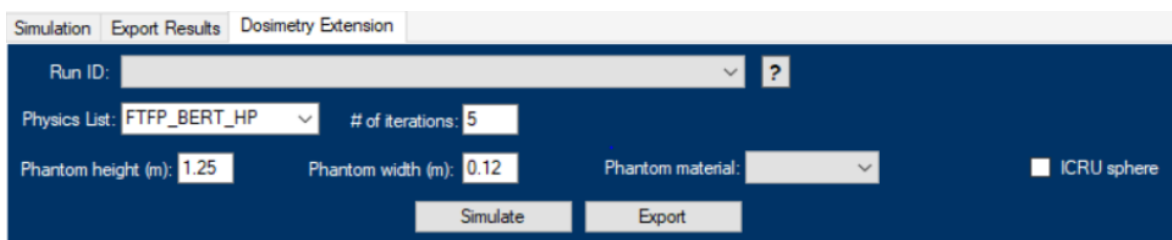
(Πηγή: <https://dyastima.phys.uoa.gr>)

Ωστόσο, το DYASTIMA μπορεί να εξάγει τα αποτελέσματα σε μορφή .csv (επέκταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο Microsoft Office Excel ή σε αντίστοιχο

προγραμμα). Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει το όνομα της προσομοίωσης, την κατηγορία των αποτελεσμάτων, το υψόμετρο και τον τύπο των σωματιδίων.

Για να εκτελέσουμε υπολογισμό δοσιμετρίας ακτινοβολίας, θα πρέπει να εκτελεστεί μια δεύτερη προσομοίωση στην επέκταση DYASTIMA-R. Υπολογίζονται οι ποσότητες του ρυθμού δόσης (Gy / sec) και της ισοδύναμου ρυθμού δόσης (Sv / sec) σε κάθε ατμοσφαιρικό στρώμα, με βάση το ICRP και τα πρότυπα ICRU.

Το DYASTIMA-R χρησιμοποιεί τα δεδομένα που προέρχονται από την έξοδο της εφαρμογής DYASTIMA, προκειμένου να υπολογίσει την ενέργεια που εναποτίθεται σε κυλινδρικό ομοίωμα (περιέχει κυρίως νερό, ύψους 1,75 m και ακτίνας 0,25 m) ή σε σφαίρα ICRU (υπολογισμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$).



Εικόνα 4.27: Παράδειγμα εισαγωγής παραμέτρων στην καρτέλα δοσιμετρίας.

(Πηγή: <https://dyastima.phys.uoa.gr>)

4.5.2. Συμπεράσματα από την χρήση του μοντέλου DYASTIMA / DYASTIMA-R

- Σε υψηλά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη (0 GV έως 10 GV), οι υπολογισμένες τιμές της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ με το DYASTIMA-R, είναι σε καλή συμφωνία με τα δεδομένα αναφοράς (από την βάση δεδομένων των μετρητών νετρονίων), χωρίς να υπερβαίνει το 30% της αβεβαιότητας που προτείνεται από την ICRU Report 84.
- Πάνω από 10 GV (περιοχή ισημερινού), φαίνεται να παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση, με μέγιστη αβεβαιότητα περίπου 41%, πιθανώς λόγω της περιπλοκότητας που εμφανίζει το γεωμαγνητικό πεδίο στις περιοχές πλησίον του ισημερινού.
- Το DYASTIMA-R τείνει να δίνει μικρότερα αποτελέσματα στον υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$.
- Τα αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία με άλλα μοντέλα.

- Η απόκλιση που παρατηρείται σε όλα τα σενάρια πτήσης μπορεί επίσης να αποδοθεί στις παραμέτρους εισόδου, όπως το ατμοσφαιρικό προφίλ και το πρωταρχικό φάσμα κοσμικών ακτίνων, που μπορεί να προκύπτει από διαφορετικά μοντέλα. Γι' αυτό το λόγο, το DYASTIMA βελτιώνεται συνεχώς για να παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, το DYASTIMA / DYASTIMA-R ικανοποιεί τα κριτήρια της ICRU / ICRP και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους αξιόπιστους προσδιορισμούς της έκθεσης των πληρωμάτων και των επιβατών στην ιοντίζουσα κοσμική ακτινοβολία.

4.5.3. Δυνατότητες του προγράμματος DYASTIMA / DYASTIMA-R

Το πρόγραμμα DYASTIMA, μέσω της επέκτασης DYASTIMA-R, υπολογίζει τον ρυθμό δόσης ή της ισοδύναμης δόσης για κάθε ατμοσφαιρικό στρώμα, για πλήθος σωματιδίων (με διαφορετικό ατομικό αριθμό, από $Z=1$ μέχρι $Z=26$) και σε διαφορετικά υψόμετρα, όπως τα έχουμε ορίσει. Ακόμα, στους υπολογισμούς του λαμβάνει υπόψη την ηλιακή δραστηριότητα, με το μέγιστο και το ελάχιστο κάθε ηλιακού κύκλου, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη για θωράκιση από τη κοσμική ακτινοβολία.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι το DYASTIMA μας παρέχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε και να μελετήσουμε πολλαπλά σενάρια πτήσης και να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας στους επιβάτες και στο πλήρωμα των αεροσκαφών. Άρα, μπορεί να φανεί χρήσιμο για τα πληρώματα αεροσκαφών, για τους επιβάτες και τους επιβάτες, για τις αεροπορικές εταιρείες, για κατασκευαστές αεροσκαφών καθώς και από τους νομοθέτες για ψήφιση και αναθεώρηση κανονισμών που εξασφαλίζουν την ασφάλεια των άμεσα εκτιθέμενων στην επίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας.

Το DYASTIMA-R θα συνδυαστεί με το σύστημα GLE Alert που λειτουργεί στο A.Ne.Mo.S (Athens Neutron Monitor Station) και την ESA-Space Radiation CenterSpace και σύντομα θα παρασχεθεί ως εργαλείο για μια εκτενή μελέτη για την έκθεση σε ακτινοβολία κατά τη διάρκεια αεροπορικών πτήσεων και επανδρωμένων διαστημικών αποστολών (Paschalis P. et al., ECRS2016).

4.6 Πειραματική διαδικασία

Το πρωταρχικό φάσμα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας έχει υπολογιστεί με το πρόγραμμα OMERE (<http://www.trad.fr/en/space/omere-software/>) και με επιλογή των μοντέλων πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας ISO (ISO 15390:2004) και CRÈME96, για τα έτη 2008, 2014 και 2019, δηλαδή για συνθήκες ηλιακού μέγιστου (2014) και ελάχιστου (2008, 2019), με απουσία έντονων γεγονότων από ηλιακά ενεργητικά σωματίδια-SEP (A.J. Tylka et al., 1997; R.A. Weller et al., 2010; Marcus H. Mendenhall and Robert A. Weller, 2012).

Έχουμε επιλέξει το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας $R_c=0$ GV (πολικές περιοχές) και ορίσαμε το μοντέλο να υπολογίσει τους ρυθμούς δόσης και ισοδύναμης δόσης για 150000 γεγονότα (events), θέλοντας να πετύχουμε μεγαλύτερη στατιστική βεβαιότητα στους υπολογισμούς μας.

Επίσης, επιλέξαμε υψόμετρο υπολογισμών έως και 85000 μέτρα (από μηδέν, δηλαδή από το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας), με διαβάθμιση ανά 1000 μέτρα. Το υψόμετρο αυτό βρίσκεται κοντά στην επονομαζόμενη γραμμή Κάρμαν, που ορίζεται (από την Διεθνή Αεροναυτική Ομοσπονδία-FAA) ως το σύνολο των σημείων με υψόμετρο 100 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ως συμβατικό όριο λήξης της γήινης ατμόσφαιρας, πάνω από το οποίο αρχίζει το διάστημα στα όρια της μεσόπαυσης, όπως ονομάζεται το ανώτατο σημείο της μεσόσφαιρας. Θυμίζουμε ότι, ο αέρας στη μεσόσφαιρα χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα με το 99,9% της μάζας της ατμόσφαιρας να είναι κάτω από τη μεσόσφαιρα. Η μεσόπαυση παρουσιάζει διακυμάνσεις στο ύψος, αναλόγως με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους. Το ύψος είναι μεγαλύτερο τους χειμερινούς μήνες και στις περιοχές κοντά στον ισημερινό απ' ό,τι ο καλοκαίρι και στους πόλους ($R_c \approx 0$ GV). Εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης μορίων της ατμόσφαιρας (αδυναμία απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας), η μεσόσφαιρα είναι το πιο ψυχρό στρώμα της ατμόσφαιρας και ειδικά η μεσόπαυση είναι η ψυχρότερη περιοχή, με θερμοκρασίες από -90°C το καλοκαίρι έως -140°C τον χειμώνα. Η μοναδικά πηγή θερμότητας για την μεσόσφαιρα είναι το στρατοσφαιρικό στρώμα που βρίσκεται από κάτω. Ακόμα, εντός της περιοχής που έχουμε ορίσει για τους υπολογισμούς μας, υπάρχει η περιοχή D της Ιονόσφαιρας (60-90 χιλιόμετρα από την στάθμη της θάλασσας) που χαρακτηρίζεται από μεγάλη παρουσία ιόντων τα οποία προκαλούνται απ' τον ιονισμό των μορίων του αέρα λόγω της ηλιακής και κοσμικής ακτινοβολίας.

Τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας της Γης είναι το άζωτο N_2 , σε συγκέντρωση 78,084%, το οξυγόνο O_2 , σε συγκέντρωση 20,946% και το αργό Ar , σε συγκέντρωση

0,934%. Σε υψηλότερα υψόμετρα ($> 75 \text{ km}$), όπως στην μεσόσφαιρα, μπορούμε επίσης να βρούμε άτομα ηλίου (He), αζώτου (N), οξυγόνου (O) και υδρογόνου (H). Τα σωματίδια της (πρωτογενούς) κοσμικής ακτινοβολίας, εισερχόμενα στην γήινη ατμόσφαιρα και σε ύψος περίπου 50 χιλιομέτρων (στρατόσφαιρα), αλληλεπιδρούν με ουδέτερα στοιχεία και κυρίως το μόριο του αζώτου N_2 και του οξυγόνου O_2 .

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από:

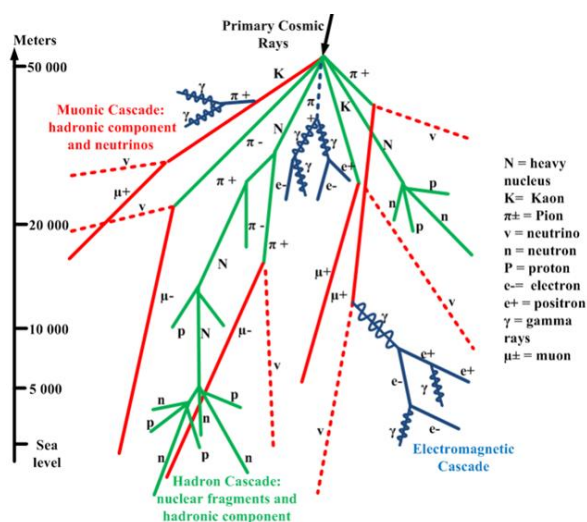
- 85% πρωτόνια ή αλλιώς πυρήνες H
- 5% σωματίδια α (πυρήνες He)
- 1-2% από ηλεκτρόνια, ακτίνες γ , νετρόνια, νετρίνα
- 0.42% από τα στοιχεία C, N, O, F
- 0.1% από τα στοιχεία Li, Be, B,
- 0.04% από υπερβαρέα, υπερουράνια στοιχεία και Fe

Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η σχετική περιεκτικότητα των βαρύτερων πυρήνων στη σύσταση της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας είναι συγκρίσιμη με αυτή στον Ήλιο.

Η (πρωτογενής) κοσμική ακτινοβολία, εκτός από τους γυμνούς πυρήνες που δημιουργούνται στο εσωτερικό των αστερών (μέσω του κύκλου πρωτονίου-πρωτονίου), όπως οι πολύ ελαφρείς πυρήνες των H, He, Li, Be, B, αποτελείται σε μικρό ποσοστό και από πολλά άλλα σταθερά και μη σωματίδια που η παραγωγή τους οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πυρήνων μεγάλης ενέργειας με τη μεσοαστρική ύλη, κατά τη διαδρομή τους από την πηγή προέλευσης τους μέχρι την Γη. Αυτά τα σωματίδια είναι τα ηλεκτρόνια, τα αντιπρωτόνια, τα ποζιτρόνια αλλά και οι ελαφρείς πυρήνες Li, Be, B. Τα νετρόνια απουσιάζουν από την σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας διότι όταν βρίσκονται έξω από τον πυρήνα του ατόμου, είναι ασταθή και έχουν μέσο χρόνο ζωής $T_{1/2} = 885.8 \pm 3.4 \text{ s} \approx 15 \text{ λεπτά}$ και στη συνέχεια διασπώνται σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντineutrino του ηλεκτρονίου. Γι' αυτό το λόγο δεν προλαβαίνουν να φτάσουν στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας για να μπορέσουν να ανιχνευτούν. Ακόμα υπάρχει και ένα πλήθος αφόρτιστων σωματιδίων, όπως τα νετρίνα και τα φωτόνια γ με πολύ υψηλές ενέργειες.

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, κάτω από την γραμμή Κάρμαν (karman line), υπάρχει το 99,9% της περιεκτικότητας των στοιχείων της ατμόσφαιρας, με κυριότερα τα μόρια του αζώτου N_2 και του οξυγόνου O_2 . Επειδή η ατμόσφαιρα είναι πολύ αραιή στην μεσόσφαιρα, η ατμόσφαιρα αποκτά πυκνότητα από το ύψος των 50km (που ξεκινάει η

στρατόπαυση) και κάτω. Σε αυτό το ύψος, τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας αλληλεπιδρούν με τα μόρια του αζώτου και του οξυγόνου. Οι συγκρούσεις σωματιδίων με αυτά τα μόρια έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καταιγισμών σωματιδίων και φωτονίων, με χαμηλότερες ενέργειες, που στο σύνολό τους ονομάζονται δευτερογενής. (Εικόνα 4.28). Η δευτερογενής ατμοσφαιρικός καταιγισμός περιλαμβάνει νετρόνια (n^0), πρωτόνια (p^+), ηλεκτρόνια (e^-), ποζιτρόνια (e^+), σωματίδια α (και άλλα θραύσματα πυρήνων), πόνια ($\pi^\pm$), μόνια ($\mu^\pm$), ακτίνες γ , ακτίνες X και σε πολύ μικρότερο βαθμό άλλα σωματίδια με πολύ μικρό χρόνο ζωής.



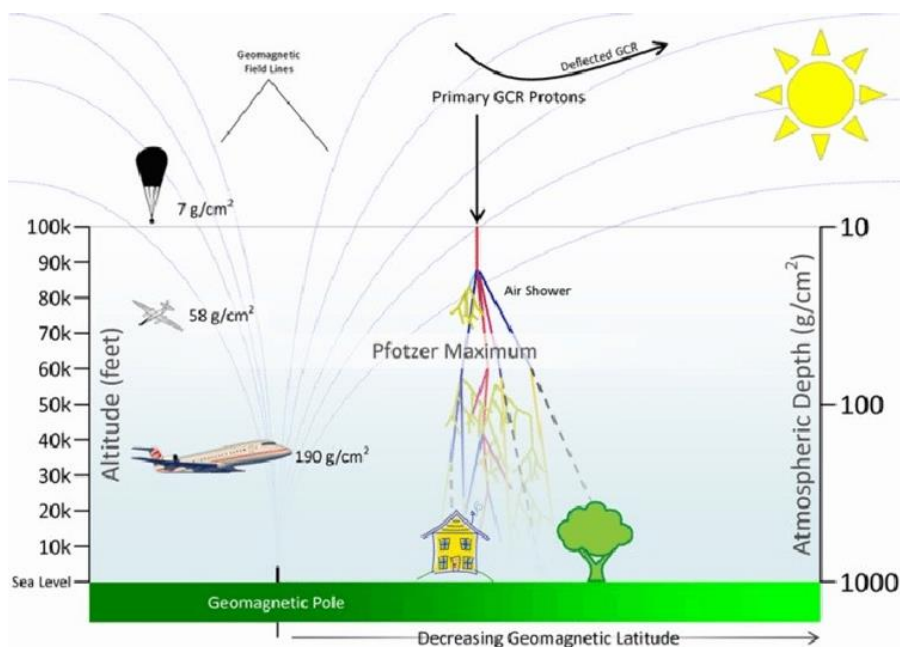
Εικόνα 4.28: Ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί από την επίδραση των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/272826408>)

Στην εκτέλεση του προγράμματός μας, έχουμε υποθέσει ότι οι συνθήκες υπολογισμού της κοσμικής ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται από απουσία έντονων ηλιακών γεγονότων (όπως ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (SEP)).

Ο δευτερογενής ατμοσφαιρικός καταιγισμός της κοσμικής ακτινοβολίας ξεκινά σταδιακά στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (στρατόσφαιρα) και εντείνεται σε χαμηλότερα υψόμετρα και εμφανίζει μια μέγιστη τιμή ακτινοβολίας (ρυθμού ιονισμού) σε ύψος περίπου 15-20 χλμ. (49.000–65.000 ft), ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την ηλιακή δραστηριότητα (Bazilevskaya et al., 2000), όπου εξισορροπείται η ενεργειακή απώλεια των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας με την παραγωγή της δευτερογενούς. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι σε περίοδο έντονης ηλιακής δραστηριότητας (γεωμαγνητική καταιγίδα), το μέγιστο Regener-Pfotzer μετακινείται σε

μεγαλύτερα υψόμετρα. Επίσης, πειράματα έχουν δείξει ότι το μέγιστο αλλάζει σημαντικά με το γεωμαγνητικό γεωγραφικό πλάτος (Bazilevskaya et al. 2008). Μάλιστα, στην πολική περιοχή (όπου και μελετάμε), από όπου εκτοξεύτηκε ο πύραυλος REXUS-17, η τιμή του μεγίστου κυμαίνεται μεταξύ 20 και 26 χιλιομέτρων. Το γεγονός της ύπαρξης του μεγίστου παρατηρήθηκε με άμεση μέτρηση ιονισμού σε διάφορα ύψη την ατμόσφαιρα από τους Erich Regener και George Pfozter (Pfozter, 1936, Regener, 1933, Regener and Pfozter, 1935). Αυτό το σημείο μέγιστης ακτινοβολίας ονομάζεται μέγιστο Regener-Pfozter (RP-max) και κάτω από αυτό το σημείο η ένταση της δευτερογενούς ακτινοβολίας μειώνεται σταδιακά λόγω διεργασιών απορρόφησης και διάσπασης (Gaisser, 1990; Grieder, 2001).

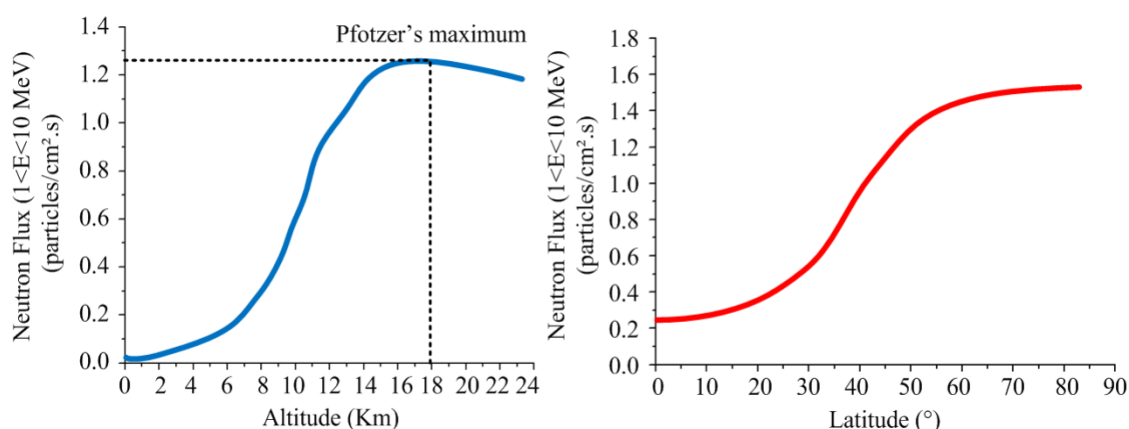


Εικόνα 4.29: Η τοποθεσία του μεγίστου ακτινοβολίας Pfozter.

(Πηγή: www.Spaceweather.com)

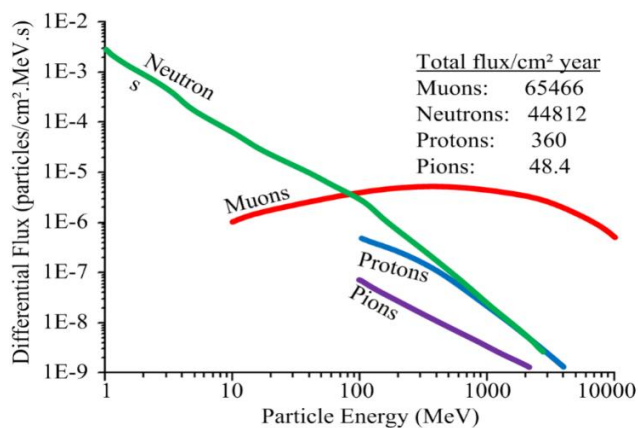
Οι αντιδράσεις εξαιτίας του ατμοσφαιρικού καταιγισμού ξεκινούν σε υψόμετρο περίπου 50 χιλιομέτρων, με την είσοδο των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στην στρατόσφαιρα, με ενέργεια από 1 GeV και πάνω με η μέγιστη πυκνότητα αντιδράσεων να παρατηρείται στο μέγιστο Reneger-Pfozter. Μετά από όλους αυτούς τους αλληπάλληλους καταιγισμούς, οι κοσμικές ακτίνες που φτάνουν τελικά στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας αποτελείται από: 94% από νετρόνια, 4% από πιόνια και 2% από πρωτόνια. Στην πραγματικότητα τα μίονια είναι τα πιο άφθονα σωματίδια, αλλά είναι ασταθή και έχουν διάρκεια ζωής μόνο $T_{1/2}=2\mu\text{sec}\approx 2\times 10^{-6}$ sec. Τα ατμοσφαιρικά νετρόνια

δημιουργούνται από δύο μηχανισμούς (W. N. Hess, 1961). Ο πρώτος είναι η άμεση σύγκρουση μεταξύ κοσμικών ακτίνων και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. παράγουν νετρόνια με ενέργεια μεταξύ 1 MeV και 1 GeV. Ο δεύτερος είναι η εκπομπή ενός νετρονίου από αποδιέγερση ενός διεγερμένου ατόμου. Στο εικόνα 4.29, μας δείχνει ότι το φάσμα των νετρονίων είναι το μεγαλύτερο και ότι είναι τα σωματίδια με την μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών. Στην εικόνα 4.30, βλέπουμε ότι στην περιοχή υψηλότερων ενεργειών, η ροή του μιονίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από εκείνη των νετρονίων. Τα πρωτόνια και τα πιόνια εμφανίζονται στο φάσμα για ενέργειες υψηλότερες των 100 MeV και η ροή τους είναι μικρότερη από αυτή των νετρονίων. Για ενέργεια σωματιδίων περίπου 1000 MeV, τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν παρόμοια συγκέντρωση (Ziegler J.F., 1996).



Εικόνα 4.29: Διακύμανση του ροής νετρονίων, με ενέργεια μεταξύ 1 και 10 MeV, σε συνάρτηση: (αριστερά) με το υψόμετρο, βασισμένο σε μετρήσεις αεροσκαφών και μπαλονιών και (δεξιά) με το γεωγραφικό πλάτος (βασισμένο σε μετρήσεις αεροσκαφών και στις κατακόρυφες δυσκαμψίες των Smart και Shea, Normand και Baker).

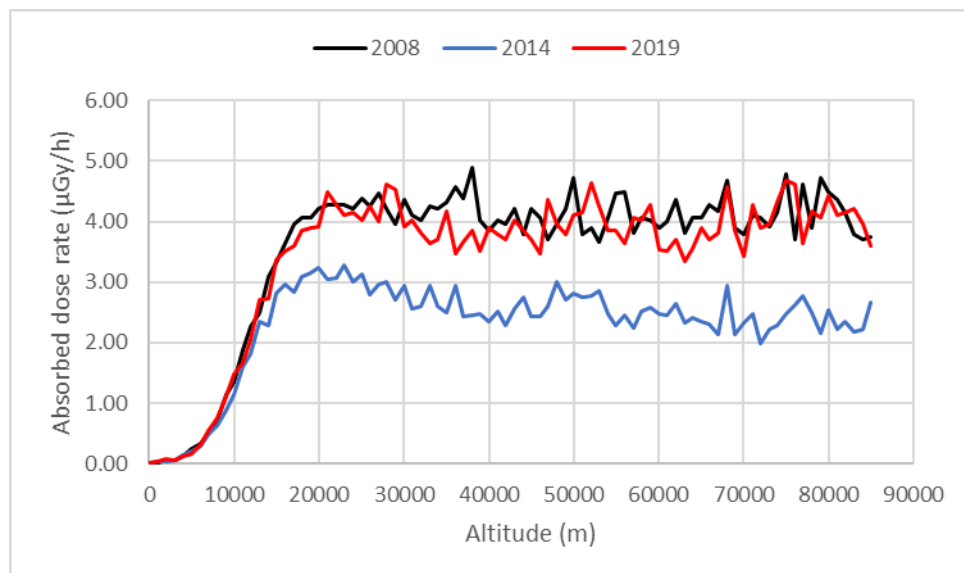
(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/272826408>)



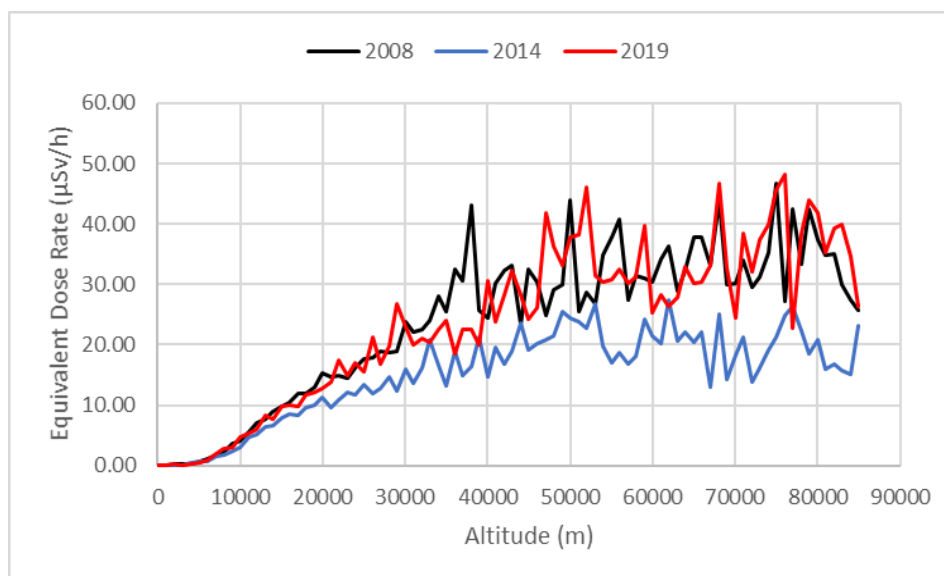
Εικόνα 4.30: Το φάσμα των επίγειων κοσμικών ακτίνων στο επίπεδο της θάλασσας στην πόλη της Νέας Υόρκης.

(Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/272826408>)

Στην αρχή της επεξεργασίας των υπολογισμών που πήραμε από την εφαρμογή διάστημα, παραθέτουμε δύο διαγράμματα, απορροφούμενου και ισοδύναμου ρυθμού δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ ακτινοβολίας, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για τα έτη 2008, 2014, 2019. Στη συνέχεια για συντομία, τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ θα τον αναφέρουμε απλά ως ρυθμό ισοδύναμης δόσης, δίχως πιθανότητα σύγχυσης, αφού υπάρχει σαφής διαχωρισμός με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης.



Διάγραμμα 4.9: Γραφική παράσταση του απορροφούμενου ρυθμού δόσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για τα τρία έτη (2008, 2014, 2019), σε περιοχή με μαγνητική δυσκαμψία $R_c=0GV$.



Διάγραμμα 4.10: Γραφική παράσταση του ισοδύναμου ρυθμού δόσης σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για τα τρία έτη (2008, 2014, 2019), σε περιοχή με μαγνητική δυσκαμψία $R_c=0GV$.

Στο διάγραμμα 4.9 φαίνεται το μέγιστο Reneger-Pfotzer λίγο πριν τα 20000 μέτρα ($\approx 65000ft$). Από το σημείο αυτό και μετά η απορροφούμενη δόση ακτινοβολίας αποκτά μια ανώτατη τιμή, με ελάχιστες διακυμάνσεις.

Και στα δυο παραπάνω διαγράμματα (4.9, 4.10) παρατηρούμε μια αύξηση τόσο του ρυθμού απορροφούμενης δόσης όσο και του ρυθμού ισοδύναμης ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια που παρατηρείται μειωμένη ηλιακή δραστηριότητα (ηλιακό ελάχιστο), δηλαδή για τα έτη 2008 και 2019. Έτσι, αποδεικνύεται και με αυτόν τον τρόπο, η αρνητική συσχέτιση της έντασης της γαλαξιακής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα.

Μάλιστα, το έτος 2008 ανήκει στην περίοδο διέλευσης από τον 23° στον 24° ηλιακό κύκλο, που παρατηρήθηκε μια ιδιαίτερα ήπια ηλιακή δραστηριότητα. Κατά τη διάρκεια διέλευσης, υπήρξαν συνολικά 817 ημέρες χωρίς ηλιακές κηλίδες και για το έτος 2008 συγκεκριμένα, 266 από τις 366 ημέρες ήταν δίχως την εμφάνιση ηλιακών κηλίδων, ποσοστό 73% (Hady, 2013). Σε σύγκριση με τους τελευταίους ηλιακούς κύκλους, η τιμή αυτή είναι αρκετά πιο κάτω από τον μέσο όρο της ηλιακής δραστηριότητας, κάτι δεν φαίνεται καθαρά στα διαγράμματα 4.9 και 4.10, καθώς η τιμή του ρυθμού δόσης (απορροφούμενης και ισοδύναμης) της κοσμικής ακτινοβολίας δείχνει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε κάποια σημεία (υψόμετρα) αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα. Στο έτος 2019, μπορεί να έχει παρατηρηθεί ο

διπλάσιος αριθμός ηλιακών κηλίδων (12884 σε αντίθεση με τις 6644 για το 2008) αλλά η μέση ετήσια τιμή του συνολικού αριθμού ηλιακών κηλίδων είναι 3.4 ± 0.5 ενώ για το 2008 είναι 4.2 ± 2.5 (www.sidc.be/silso/datafiles).

Στο διάγραμμα 4.10, βλέπουμε ότι ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης έχει σχεδόν δεκαπλάσια τιμή σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης. Ο λόγος είναι ότι η ισοδύναμη δόση προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της απορροφούμενης δόσης με τον συντελεστή στάθμισης ακτινοβολίας W_R , που εξαρτάται από τον τύπο και την ενέργεια της ακτινοβολίας R (σχετίζεται με την γραμμική μεταφορά ενέργειας-LET). Στον πίνακα 4.4 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή W_R , σύμφωνα με την δημοσίευση 103 της ICRP, το 2007. Στα επόμενα διαγράμματα θα φανεί ξεκάθαρα ο σημαντικός ρόλος των συντελεστών στο βιολογικό αποτέλεσμα της ακτινοβολίας.

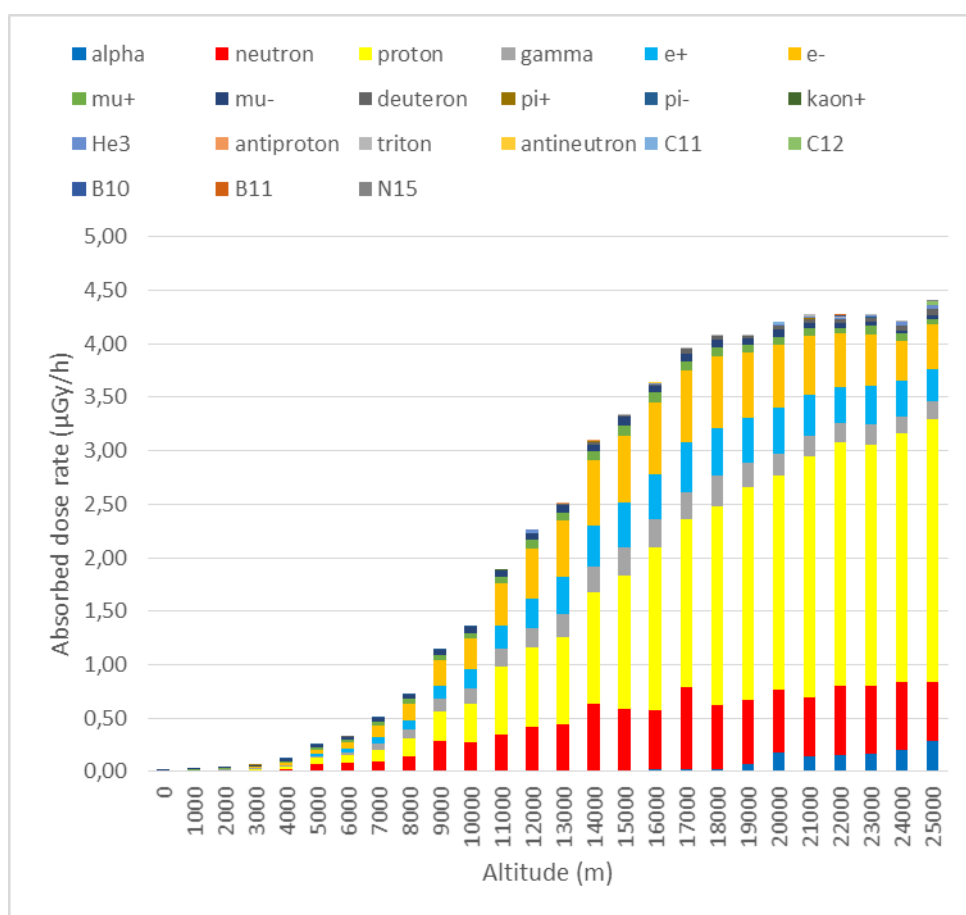
Radiation	Energy W_R (formerly Q)
x-rays, gamma rays, beta particles, muons	1
neutrons (< 1 MeV)	$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E)]^2/6}$
neutrons (1 - 50 MeV)	$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E)]^2/6}$
neutrons (> 50 MeV)	$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E)]^2/6}$
protons, charged pions	2
alpha particles, nuclear fission products, heavy nuclei	20

Πίνακας 4.4: Οι τιμές σχετικής βιολογικής αποτελεσματικότητας (Relative biological effectiveness), σύμφωνα με το ICRP 2007. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο συντελεστής στάθμισης για έναν τύπο ακτινοβολίας, τόσο πιο επιβλαβής είναι. Με την χρήση των συντελεστών, η δόση μετατρέπεται από απορροφούμενη (Gray) σε ισοδύναμη (Sievert).

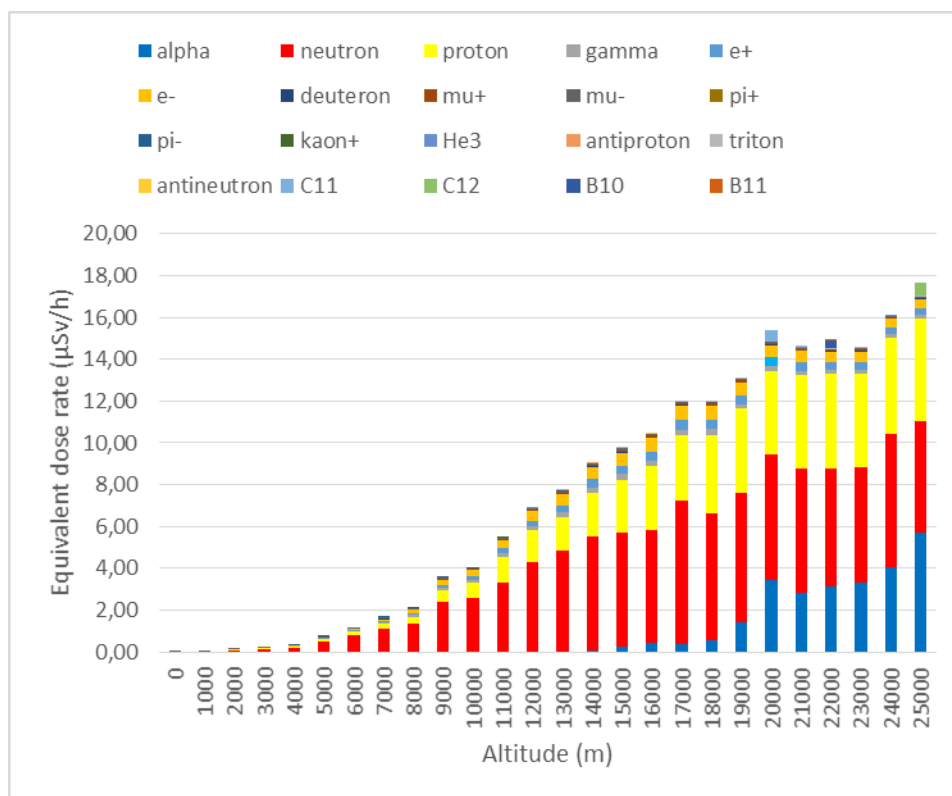
Στη συνέχεια θα πάρουμε το κάθε έτος ξεχωριστά και θα προσπαθήσουμε να δούμε την συνεισφορά των σωματιδίων στην διαμόρφωση του ρυθμού δόσης, τόσο της απορροφούμενης όσο και της ισοδύναμης, καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κάθε ακτινοβολίας, καθορίζοντας έτσι και το βιολογικό αποτέλεσμα.

Έχουμε επιλέξει να κάνουμε επεξεργασία των δεδομένων για τα πρώτα 25000 μέτρα για τον λόγο ότι το μέγιστο Reneger-Pfotzer είναι εντός αυτής της περιοχής για την περιοχή με μαγνητική δυσκαμψία $R_c=0\text{GV}$.

Έτος 2008

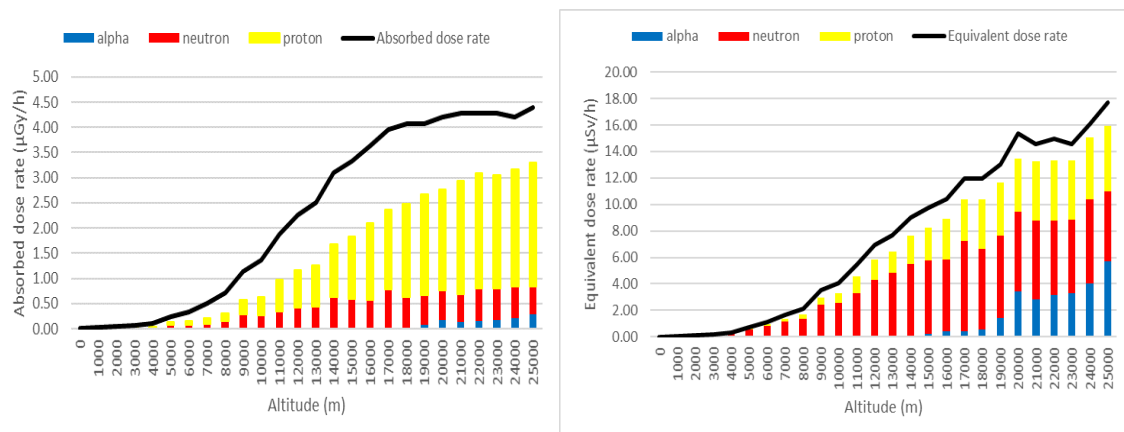


Διάγραμμα 4.11: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2008.



Διάγραμμα 4.12: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2008.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.11 και 4.12, βλέπουμε ότι ο ισοδύναμος ρυθμός δόσης είναι εμφανώς μεγαλύτερος, σε απόλυτη τιμή, από τον αντίστοιχο απορροφούμενο. Η αύξηση κυμαίνεται από 200% (στα χαμηλά υψόμετρα) μέχρι 300% (κοντά στο μέγιστο Reneger-Pfotzer), για τα πρώτα 25000 μέτρα, έχοντας μια συνεχώς αυξανόμενη τάση όσο πλησιάζουμε στην γραμμή Κάρμαν, με την αύξηση να φτάνει και να ξεπερνάει, πολλές φορές, το 800%. Αυτή η μεγάλη διαφορά οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των συντελεστών στάθμισης της ακτινοβολίας που τελικά καθορίζει και το βιολογικό αποτέλεσμα αλλά και στην ιδιαίτερα ήπια και παρατεταμένη ηλιακή δραστηριότητα (Hady, 2013). Επίσης, παρατηρούμε ότι σημαντική μπορεί να θεωρηθεί η συνεισφορά των ισότοπων του άνθρακα (^{11}C , ^{12}C) και βορίου (^{10}B , ^{11}B) στην διαμόρφωση του ισοδύναμου ρυθμού δόσης, όπου κάνουν την εμφάνισή τους σε υψόμετρο 20000 μέτρων και πάνω.



Διάγραμμα 4.13: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των κυριότερων σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας (πρωτόνια, νετρόνια, σωματία α):

(αριστερά) στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2008.

(δεξιά) στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2008.

Από το διάγραμμα 4.13, γίνεται αντιληπτός ο σημαντικός ρόλος των πρωτονίων αλλά κυρίως των νετρονίων και των σωματιών α στον καθορισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, με το άθροισμα των εκάστοτε δόσεων να είναι από 80% (στα 2000 μέτρα) μέχρι 90% (στα 25000 μέτρα), του συνολικού ρυθμού ισοδύναμης δόσης.

Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 30% (στα 2000 μέτρα) μέχρι 75% (στα 25000 μέτρα), με σημαντική την συνεισφορά των ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων γ, στην διαμόρφωσή της (ίδια τάξη μεγέθους με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης των νετρονίων).

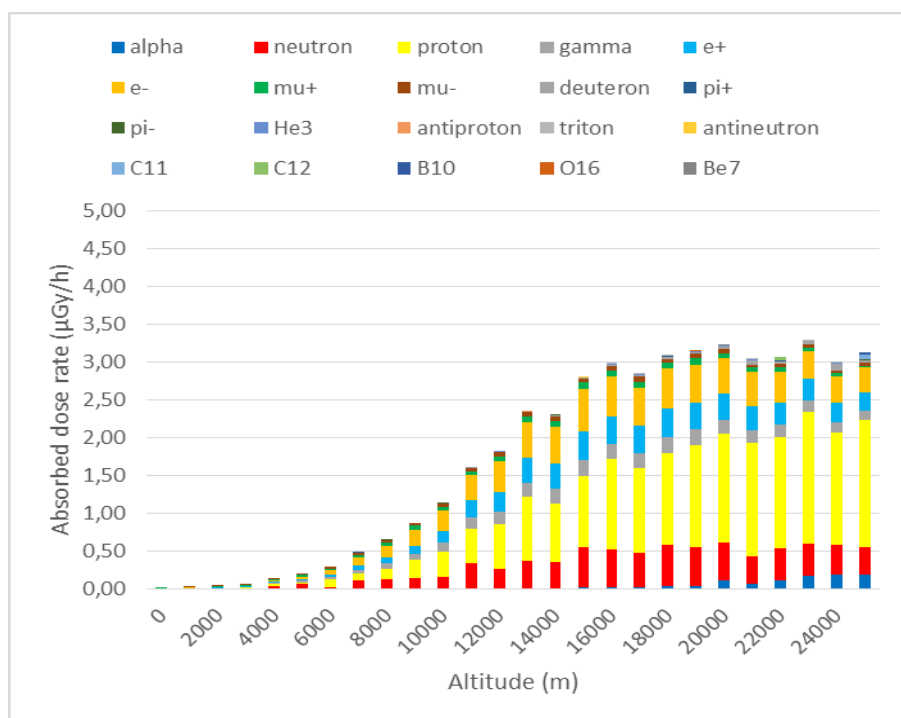
Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

- Τα σωματία α, εμφανίζονται από τα 14000 μέτρα και άνω, ενώ παρατηρείται αύξηση, κατά μέσο όρο, 1897.90% της συνεισφορά τους στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης.
- Τα νετρόνια, εμφανίζονται από την επιφάνεια της θάλασσας (0 μέτρα) αλλά συνεισφέρουν σημαντικά από τα 1000 μέτρα και έπειτα στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης και από τα 2000 μέτρα στον ρυθμό απορροφούμενης, ενώ παρατηρείται μέση ποσοστιαία αύξηση 887.71% στην συνεισφορά

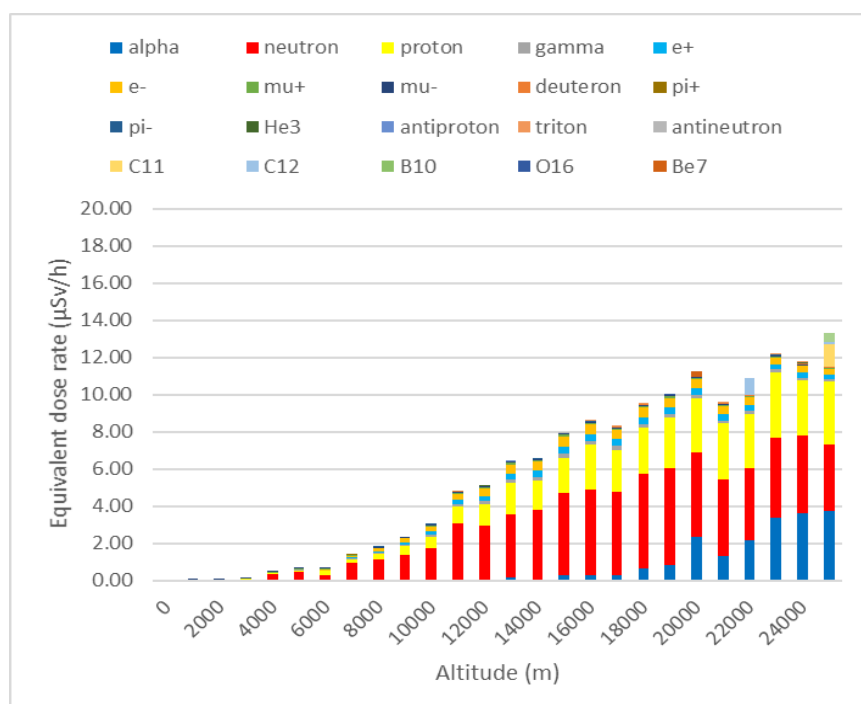
τους στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης.

- Για τα πρωτόνια, δεν παρατηρείται να συνεισφέρουν σε υψόμετρο μηδέν μέτρων (επιφάνειας της θάλασσας), για την ακρίβεια δεν ανιχνεύονται, αλλά συνεισφέρουν σημαντικά από τα 1000 μέτρα και άνω, με μέση ποσοστιαία αύξηση 100.04% στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης. Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, η συνεισφορά τους είναι μία τάξη μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των νετρονίων και μία με τρεις τάξεις μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των σωματίων α.
- Τα πρωτόνια παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση του ρυθμού της απορροφούμενης δόσης, ενώ τα νετρόνια κυρίως είναι αυτά που συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης και καθορίζουν το βιολογικό αποτέλεσμα, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 4.13.
- Σε πολύ χαμηλά υψόμετρα, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, τόσο ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης όσο και ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης, διαμορφώνεται κυρίως από την ύπαρξη των μιονίων και των φωτονίων γ.

Έτος 2014



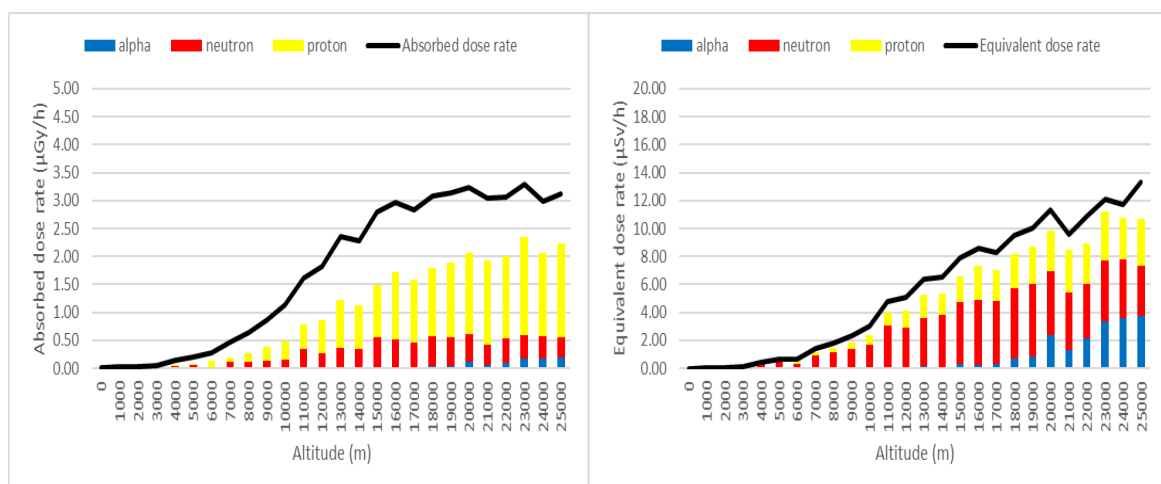
Διάγραμμα 4.14: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2014.



Διάγραμμα 4.15: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2014.

Το 2014 ήταν έτος με έντονη ηλιακή δραστηριότητα που συνεπάγεται με σημαντική μείωση στον ρυθμό απορροφούμενης αλλά και στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης. Από τα διαγράμματα 4.14 και 4.15, βλέπουμε ότι ο ισοδύναμος ρυθμός δόσης είναι εμφανώς μεγαλύτερος, σε απόλυτη τιμή, από τον αντίστοιχο απορροφούμενο. Η αύξηση κυμαίνεται από 35% με 75% (για χαμηλά υψόμετρα, μέχρι τα πρώτα 2000 μέτρα), έως ελαφρώς μεγαλύτερη από 300%, κοντά στο μέγιστο Reneger-Pfotzer (πλησίον των 25000 μέτρων). Παρατηρούμε ότι, υπάρχει μια συνεχώς αύξηση της διαφοράς ανάμεσα στους δύο ρυθμούς δόσης όσο πλησιάζουμε στην γραμμή Κάρμαν, με το μέγιστο να εμφανίζεται στα 62000 μέτρα, με την αύξηση να φτάνει και να ξεπερνάει το 900%. Αυτή η μεγάλη διαφορά οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των συντελεστών στάθμισης της ακτινοβολίας που τελικά καθορίζει και το βιολογικό αποτέλεσμα. Επίσης, παρατηρούμε ότι σημαντική μπορεί να θεωρηθεί η συνεισφορά των ισότοπων του άνθρακα (^{11}C , ^{12}C), του βορίου (^{10}B , ^{11}B), του οξυγόνου (^{16}O) και του βηρυλλίου (^7Be) στην διαμόρφωση του ισοδύναμου ρυθμού δόσης, όπου κάνουν την εμφάνισή τους σε υψόμετρο 19000 μέτρων και άνω.

Εξαιτίας της έντονης ηλιακής δραστηριότητας που παρατηρήθηκε το 2014 (ο ετήσιος μέσος όρος εμφάνισης ηλιακών κηλίδων για το 2014 είναι στα 78,9 (www.sidc.be/silso/news004)) ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης μειώθηκε 22.91% και ο αντίστοιχος ρυθμός ισοδύναμης δόσης 24.19%.



Διάγραμμα 4.16: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των κυριότερων σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας (πρωτόνια, νετρόνια, σωματίδια α):

(αριστερά) στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2014.

(δεξιά) στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2014.

Στο παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται ο σημαντικός ρόλος των πρωτονίων, των νετρονίων και των σωματίων α στον καθορισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, με τα δύο τελευταία να συμμετέχουν σε μεγαλύτερο βαθμό στην διαμόρφωση του. Το δε άθροισμα των εκάστοτε δόσεων (και των τριών) να είναι από 40% (στα 1000 μέτρα) μέχρι 90% (στα 24000 μέτρα), του συνολικού ρυθμού ισοδύναμης δόσης. Εδώ διακρίνουμε μια διαφοροποίηση στα ποσοστά σε σχέση με το 2008, ιδίως σε χαμηλά υψόμετρα, έως 3000 μέτρα.

Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 20% (στα 2000 μέτρα) μέχρι 70% (στα 23000 μέτρα και άνω), με σημαντική την συνεισφορά των ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων γ, στην διαμόρφωσή της (ίδια τάξη μεγέθους με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης των νετρονίων), σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί παρατηρώντας τον πίνακα 4.4, αφού τα σωματίδια αυτά, έχουν τον χαμηλότερο συντελεστή στάθμισης W_R , που καθορίζει το σχετικό βιολογικό αποτέλεσμα κάθε ακτινοβολίας (ICRP 2007).

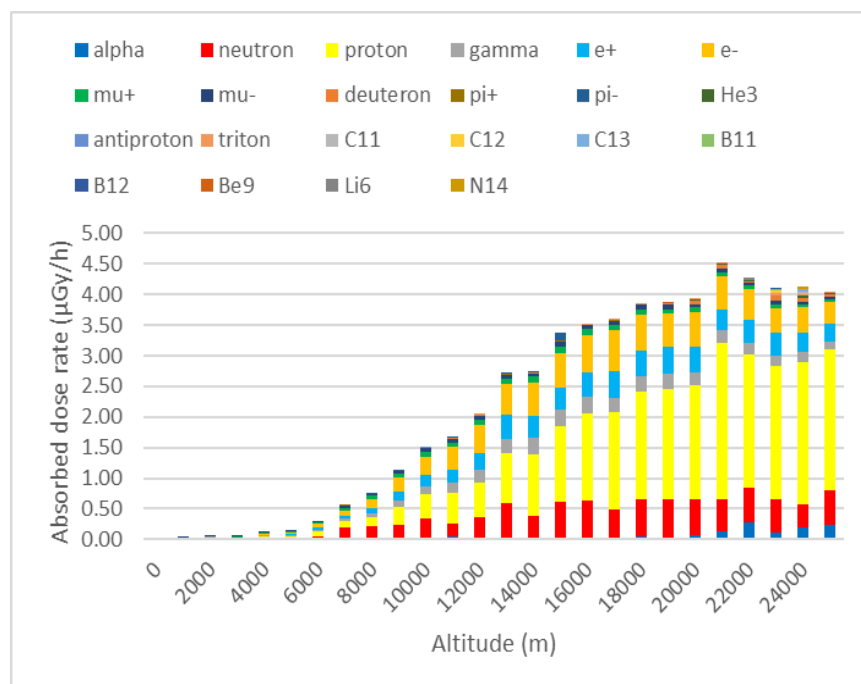
Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

- Τα σωματίδια α, εμφανίζονται από τα 13000 μέτρα και άνω (με ένα κενό σε υψόμετρο 14000 μέτρων), ενώ παρατηρείται αύξηση, κατά μέσο όρο, 1901.15% της συνεισφορά τους στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης.
- Τα νετρόνια, εμφανίζονται από την επιφάνεια της θάλασσας (0 μέτρα) αλλά συνεισφέρουν σημαντικά από τα 2000 μέτρα και άνω στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης και από τα 7000 μέτρα στον ρυθμό απορροφούμενης, ενώ παρατηρείται μέση ποσοστιαία αύξηση 896.40% στην συνεισφορά τους στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης.
- Για τα πρωτόνια, δεν παρατηρείται να συνεισφέρουν σε υψόμετρο μηδέν μέτρων (επιφάνειας της θάλασσας), για την ακρίβεια δεν ανιχνεύονται, αλλά

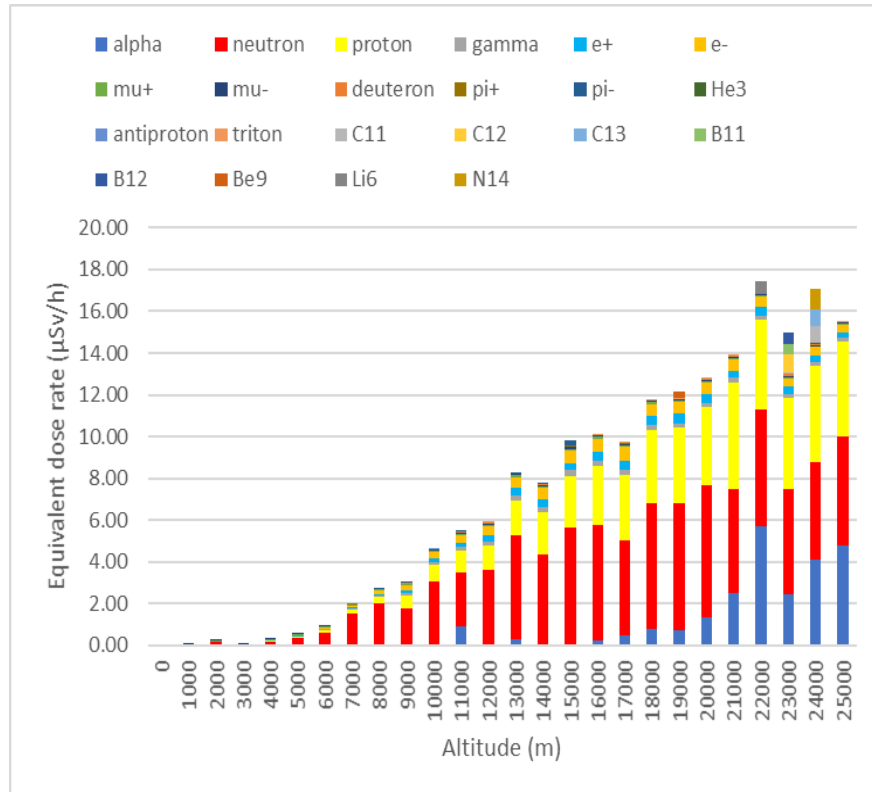
συνεισφέρουν σημαντικά από τα 1000 μέτρα και άνω, με μέση ποσοστιαία αύξηση 99.97% στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης. Το ποσοστό αύξησης αυτού του μεγέθους μπορεί να χαρακτηριστεί αναμενόμενο αν παρατηρήσουμε στον πίνακα 4.4 την τιμή του συντελεστή, για τα πρωτόνια, $W_R=2$. Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, η συνεισφορά τους είναι μία τάξη μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των νετρονίων και μία με δύο τάξεις μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των σωματίων α.

- Τα πρωτόνια παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση του ρυθμού της απορροφούμενης δόσης, ενώ τα νετρόνια κυρίως είναι αυτά που συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης και καθορίζουν το βιολογικό αποτέλεσμα, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 4.16.
- Πλησίον της επιφάνειας της θάλασσας, σε υψόμετρο μικρότερο των 1000 μέτρων, τόσο ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης όσο και ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης, διαμορφώνεται κυρίως από την ύπαρξη των μιονίων.

Έτος 2019



Διάγραμμα 4.17: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2019.

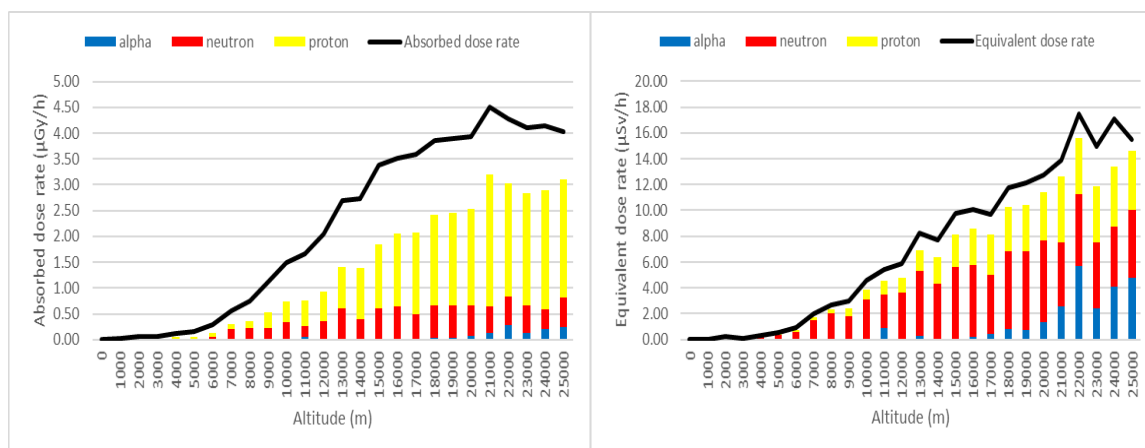


Διάγραμμα 4.18: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2019.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.17 και 4.18, βλέπουμε ότι, κατά απόλυτη τιμή, ο ισοδύναμος ρυθμός δόσης είναι σαφώς μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο απορροφούμενο, όπως ήταν αναμενόμενο και παρατηρήθηκε επίσης στα προηγούμενα αποτελέσματα, για το 2008 και 2014. Η διαφοροποίηση και σε αυτό το έτος εξαρτάται από το υψόμετρο και κυμαίνεται από ~75% σε υψόμετρο 1000 μέτρων, παρατηρείται μια σημαντική αύξηση 215% στα 2000 μέτρα, αλλά έπειτα εμφανίζεται μια αξιοσημείωτη μείωση του ποσοστού αύξησης με την τιμή του να είναι ~55%, σε υψόμετρο 3000 μέτρων. Το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης παρατηρείται κοντά στα 25000 μέτρα το οποίο ξεπερνά το 300%. Στη συνέχεια, πλησιάζοντας τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, το ποσοστό αύξησης της ισοδύναμης δόσης φτάνει σχεδόν το 1000 % σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης. Όπως είναι φυσικό, η μεγάλη διαφορά οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των

συντελεστών στάθμισης της ακτινοβολίας που τελικά καθορίζει και το βιολογικό αποτέλεσμα αλλά και στην ιδιαίτερα ήπια ηλιακή δραστηριότητα (www.sidc.be/silso/datafiles).

Επίσης, όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματά μας, σημαντική μπορεί να θεωρηθεί η συνεισφορά των ισότοπων του άνθρακα (^{11}C , ^{12}C , ^{13}C), βορίου (^{11}B , ^{12}B), βηρυλλίου (^9Be), λιθίου (^6Li) και αζώτου (^{14}N) στην διαμόρφωση του ισοδύναμου ρυθμού δόσης, όπου κάνουν την εμφάνισή τους σε υψόμετρο 19000 μέτρων και άνω. Θυμίζουμε ότι ο συντελεστής στάθμισης των βαρέων πυρήνων είναι όμοιος με αυτόν των σωμάτων α και συγκρίσιμος με αυτόν των νετρονίων, για συγκεκριμένο φάσμα ενεργειών (ICRP 2007).



Διάγραμμα 4.19: Γραφική παράσταση της συνεισφοράς των κυριότερων σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας (πρωτόνια, νετρόνια, σωμάτια α):

(αριστερά) στη διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2019.

(δεξιά) στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, σε συνάρτηση με το υψόμετρο, για το έτος 2019.

Στο διάγραμμα 4.19 παρατηρούμε ότι, ενώ τα πρωτόνια φαίνεται να συνεισφέρουν περισσότερο στην διαμόρφωση του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, τα νετρόνια και τα σωμάτια α είναι αυτά που καθορίζουν τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, με το άθροισμα των εκάστοτε δόσεων να είναι 52,56% στα πρώτα 1000 μέτρα, 83,55% στα 2000 μέτρα, στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση στο ποσοστό στο υψόμετρο των 3000 μέτρων (43,10%). Καθώς ανεβαίνουμε προς τα 25000 μέτρα, το άθροισμα των ρυθμών δόσεων

των τριών αυτών σωματιδίων φτάνει μέχρι 93,97%, του συνολικού ρυθμού ισοδύναμης δόσης.

Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 16,12% στα 1000 μέτρα και φτάνει μέχρι 76,93% στα 25000 μέτρα. Και σε αυτόν τον ρυθμό παρατηρείται αυτή η αυξομείωση, στο ίδιο ακριβώς υψόμετρο με την ρυθμό της ισοδύναμης δόσης (48,77% και 11,79% για υψόμετρα 2000 και 3000 μέτρων, αντίστοιχα). Ακόμα παρατηρούμε ότι σημαντική είναι η συνεισφορά των ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων γ , στην διαμόρφωσή του ρυθμού απορροφούμενης δόσης, καθώς ο ρυθμός δόσης τους έχει, σχεδόν σε όλα τα υψόμετρα, την ίδια τάξη μεγέθους με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης των νετρονίων. Το σωματίδιο που έχει καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση της απορροφούμενης δόσης είναι τα πρωτόνια, τα οποία, από το υψόμετρο των 14000 μέτρων έχουν ρυθμό απορροφούμενης δόσης με ίδια τάξη μεγέθους με τον συνολικό ρυθμό.

Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

- Τα σωματίδια α , εμφανίζονται από τα 11000 μέτρα και συνεισφέρουν σημαντικά στον συνολικό ρυθμό ισοδύναμης δόσης, με τον ρυθμό δόσης τους να σημειώνει μέση ποσοστιαία αύξηση 1899.61%, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης τους.
- Τα νετρόνια, εμφανίζονται σε κάθε υψόμετρο, από την επιφάνεια της θάλασσας (0 μέτρα) μέχρι τα 25000 μέτρα. Η συνεισφορά τους είναι σημαντική από τα 1000 μέτρα, στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης και από τα 2000 μέτρα στον ρυθμό της απορροφούμενης. Η μέση ποσοστιαία αύξηση που παρατηρείται στην συνεισφορά τους στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, ανέρχεται στο 864.17%.
- Τα πρωτόνια, παρατηρούνται σε υψόμετρο 1000 μέτρων και άνω, ενώ η συνεισφορά τους εμφανίζει μέση ποσοστιαία αύξηση 99.98% στον συνολικό ρυθμό ισοδύναμης δόσης, σε σχέση με τον ρυθμό απορροφούμενης. Στον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, η συνεισφορά τους είναι μία τάξη μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των νετρονίων (για υψόμετρο 14000 μέτρων και άνω) και μία με δύο τάξεις μεγέθους πάνω από την αντίστοιχη των σωματίων α (από τα 11000 μέτρα όπου παρατηρούνται τα πρώτα σωματίδια α και για κάθε υψόμετρο μέχρι τα 25000 μέτρα).

- Τα πρωτόνια, κυρίως, καθορίζουν την διαμόρφωση του ρυθμού της απορροφούμενης δόσης, ενώ τα νετρόνια είναι αυτά που συνεισφέρουν κυρίως στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης και καθορίζουν το βιολογικό αποτέλεσμα, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 4.19.
- Σε υψόμετρα κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, τόσο ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης όσο και ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης, διαμορφώνεται κυρίως από την συνεισφορά των μιονίων και των ποζιτρονίων, καθώς τα υπόλοιπα σωματίδια ή δεν εμφανίζονται (πρωτόνια) ή η συνεισφορά τους είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη (νετρόνια). Σημαντική μπορεί να θεωρηθεί η συνεισφορά των ηλεκτρονίων και των φωτονίων γ στην διαμόρφωση των δύο ρυθμών δόσεων σε αυτό το υψόμετρο (0 μέτρα), με τον ρυθμό δόσης τους όμως να είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με τα μόνια και τα ποζιτρόνια.

4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων Dyastima και Cari-7

Τα αποτελέσματα που μας έδωσε το DYASTIMA, για τα έτη 2008, 2014, 2019 και για μαγνητική δυσκαμψία $R_c \approx 0GV$, μπορούν να συγκριθούν με τους αντίστοιχους υπολογισμούς που κάναμε, για τα αντίστοιχα έτη και για την αντίστοιχη τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας με το πρόγραμμα Cari-7.

Year	DYASTIMA Equivalent dose rate $H^*(10)$ ($\mu Sv/h$)	CARI-7 Equivalent dose rate $H^*(10)$ ($\mu Sv/h$)
2008	4.99E+00	6.23E+00 $\pm$ 2.19E-01
2014	4.20E+00	5.90E+00 $\pm$ 2.06E-01
2019	5.16E+00	6.33E+00 $\pm$ 2.22E-01

Πίνακας 4.5: Η μέση τιμή του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, όπως υπολογίστηκε από το πρόγραμμα Cari-7 και DYASTIMA, για τα έτη 2008, 2014, 2019.

Επειδή στο Dyastima έχουμε πάρει υπολογισμούς για κάθε 1000 μέτρα και στο Cari-7 για μόνο για το υψόμετρο πτήσης 35000ft $\approx$ 10668 μέτρα, για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στο υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης με το Dyastima, βρήκαμε τον ρυθμό μεταβολής της δόσης ανά μέτρο για την μετάβαση από υψόμετρο 10000 σε 11000

μέτρα και στη συνέχεια το πολλαπλασιάσαμε με τα 668 μέτρα. Το ποσό που βρέθηκε, προστέθηκε στον ρυθμό ισοδύναμης δόσης που βρήκαμε με το Dyastima, σε υψόμετρο 10000 μέτρων.

Από τον παραπάνω πίνακα 4.5 παρατηρούμε ότι οι τιμές στα δύο προγράμματα είναι πολύ κοντά, γεγονός που επιβεβαιώνει την πιστότητα που μας παρέχει το υπολογιστικό μοντέλο Dyastima στον υπολογισμό δόσεων κοσμικής ακτινοβολίας.

Αναλυτικότερα, για το έτος 2008, η διαφοροποίηση στην τιμή του μέσου ρυθμού ισοδύναμης δόσης κυμαίνεται από 20.39% μέχρι 29.21%, για το έτος 2014 από 35.51% μέχρι 45.51% και για το 2019 από 18.34% μέχρι 26.86%.

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόκλιση των δύο μέσων τιμών ρυθμού ισοδύναμης δόσης, έτσι όπως υπολογίστηκε από τα δύο προγράμματα είναι μεγαλύτερη το 2014, δηλαδή σε συνθήκες έντονης ηλιακής δραστηριότητας. Αντίθετα, για τα έτη 2008 και 2019, όπου παρατηρήθηκε ήπια ηλιακή δραστηριότητα, παρατηρείται σαφώς μικρότερη απόκλιση που μάλιστα είναι στα όρια του σφάλματος υπολογισμού δόσεων, σύμφωνα με το ICRU Report 84 (Copeland, 2017; Paschalis et al., 2019). Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι το Dyastima-R) τείνει να υπολογίζει χαμηλότερη τιμή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ (Paschalis et al., 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Ο όρος Διαστημικός καιρός (Space Weather) χρησιμοποιείται για να περιγράψει διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν κυρίως στον Ήλιο μας και έχουν επιπτώσεις στην ροή και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, στην μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και την θερμόσφαιρα της γης.

Τα φαινόμενα αυτά επιδρούν στην απόδοση και την αντοχή μιας μεγάλης ποικιλίας τεχνολογικών συστημάτων που κατασκευάζονται από τον άνθρωπο τόσο στο διαστημικό όσο και στο γήινο περιβάλλον και μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια.

Στις μέρες μας, η μελέτη και η πρόγνωση του διαστημικού καιρού πραγματοποιείται με διάφορα μέσα, όπως δορυφόρους, ανιχνευτές Cherenkov, ανιχνευτές μιονίων και επίγειους μετρητές νετρονίων. Οι τελευταίοι, λόγω των χαρακτηριστικών τους, φαίνονται να είναι ο πιο αξιόπιστος και ο λιγότερο δαπανηρός τρόπος για τη μελέτη της διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Με τον καιρό, έγινε επιτακτική η ανάγκη της δημιουργίας του Παγκόσμιου Δικτύου Μετρητών νετρονίων όπου με χρήση της τεχνολογίας «real-time» μας παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής του συνόλου του ενεργειακού φάσματος καθώς και την καταγραφή, διόρθωση και διάθεση των δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών, το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών νετρονίων αποτελεί άριστο εργαλείο για την πρόβλεψη του διαστημικού καιρού, συνδυάζοντας τα δεδομένα του με αυτά των δορυφόρων. Ακόμα, η Βάση Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων (<http://www.nmdb.eu/>) παρέχει τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή και γραφήματα.

Ο Μετρητής Νετρονίων λειτουργεί στην Αθήνα, από την ομάδα A.NE.MO.S. (Athens Neutron Monitor Station), του πανεπιστημίου Αθηνών. Βρίσκεται σε συντεταγμένες 37058' N - 23047' E και σε υψόμετρο 260 μέτρων, με κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας 8.53 GV. Από τα τέλη του 2000, λειτουργεί σε τεχνολογία «πραγματικού χρόνου», με ανάλυση που φτάνει το 1sec, και τα δεδομένα μας παρέχονται διαδικτυακά στην διεύθυνση <http://cosray.phys.uoa.gr/>. Η ύπαρξη και η λειτουργία αυτού του σταθμού είναι ιδιαίτερα σημαντική αν σκεφτούμε ότι είναι ο μοναδικός σταθμός στην περιοχή των Βαλκανίων και στο ανατολικό τμήμα της Μεσογείου.

Η ομάδα A.NE.MO.S. του Πανεπιστημίου Αθηνών παρέχει καθημερινή έκδοση δελτίου πρόβλεψης διαστημικού καιρού, καθώς εφαρμογές και εργαλεία για την μελέτη των διαφόρων φαινομένων της κοσμικής ακτινοβολίας και του διαστημικού καιρού. Ακόμα, συμμετέχει στο πρόγραμμα «Space Situational Awareness – SSA» της ESA και έχει χαρακτηριστεί ως “expert group”, παρέχοντας τις υπηρεσίες Multi-Station Data, GLE Alert και την εφαρμογή DYASTIMA, οι οποίες είναι διαθέσιμες μέσω της ESA-Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC).

Η έκθεση σε ακτινοβολία ενός ανθρώπου, ανάλογα με το ποσό της λαμβανόμενης δόσης, μπορεί να προκαλέσει καθορισμένα ή στοχαστικά αποτελέσματα.

Όταν η δόση ξεπεράσει μία δόση κατωφλίου, τότε εμφανίζονται σχεδόν άμεσα τα καθορισμένα αποτελέσματα. Όσο πιο υψηλή είναι η δόση, τόσο πιο έντονα είναι τα αποτελέσματα της επίδρασης της ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία. Αυτά περιλαμβάνουν την καταστροφή των αιμοφόρων αγγείων, τον καταρράκτη του οφθαλμού και την ελάττωση της γονιμότητας. Στα στοχαστικά αποτελέσματα δεν υπάρχει δόση κατωφλίου. Η εκδήλωσή τους είναι πιθανή ακόμα και από μηδαμινή δόση. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας έκθεσης δεν φαίνονται αμέσως και η πιθανότητα εμφάνισης είναι ανάλογη του μεγέθους της λαμβανόμενης δόσης (πιθανή εμφάνισης καρκινογένεσης, μετάλλαξης, κ.ά.).

Για την μελέτη των επιπτώσεων στην έκθεση στην ακτινοβολία περιγράφεται, έχουμε εισάγει κάποια μεγέθη (δοσιμετρικά), με τα πιο σημαντικά και ευρέως χρησιμοποιημένα να είναι: η δόση, η ισοδύναμη και η ενεργός δόση.

Η δόση ή αλλιώς απορροφούμενη δόση (D) ονομάζεται η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας της ακτινοβολούμενης ύλης. Ο ορισμός αυτός ισχύει για όλα τα είδη των ακτινοβολιών και όλα τα υλικά. Από τον ορισμό καταλαβαίνουμε ότι, το μέγεθος αυτό δεν μας δίνει πληροφορεί για τη βιολογική επίδραση της ακτινοβολίας στην ύλη, οπότε και στον άνθρωπο. Έτσι, εισαγάγαμε το μέγεθος της ισοδύναμης δόσης όπου καθορίζει τη βιολογική επίπτωση των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας, με χρήση του παράγοντα βαρύτητας της ακτινοβολίας W_R . Τα νετρόνια, οι πυρήνες He καθώς και οι πυρήνες βαρύτερων στοιχείων, έχουν σοβαρές επιδράσεις στη ύλη και τους ζωντανούς οργανισμούς. Στη συνέχεια, με το μέγεθος της ενεργούς δόσης, καταφέραμε να λάβουμε υπόψη και την ακτινοευαισθησία του κάθε οργάνου, εισάγοντας τον συντελεστή στάθμισης του εκτιθέμενου ιστού W_T .

Καμία έκθεση σε ακτινοβολία, όσο μικρή κι αν είναι, δεν πρέπει να θεωρείται ακίνδυνη. Με τις βασικές αρχές ακτινοπροστασίας, έχουμε σαν σκοπό την

ελαχιστοποίηση της έκθεσης του ανθρώπου σε ακτινοβολίες και άρα την πρόληψη και τον περιορισμό των στοχαστικών και των καθορισμένων.

Οι βασικές αρχές ακτινοπροστασίας, σύμφωνα με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, είναι:

1. Η αρχή της Αιτιολόγησης (Justification), όπου τα διάφορα είδη πρακτικών με ιοντίζουσες ακτινοβολίες πρέπει να είναι αιτιολογημένα βάσει των κοινωνικοοικονομικών ή άλλων πλεονεκτημάτων που παρέχουν σε σχέση με την βλάβη στην υγεία την οποία μπορεί να προκαλέσουν. Οι μη αιτιολογημένες εκθέσεις απαγορεύονται.
2. Η αρχή της Βελτιστοποίησης, όπου κάθε έκθεση πρέπει να προγραμματίζεται ώστε το μέγεθος των συνεπαγομένων δόσεων, ο αριθμός των εκτιθέμενων ατόμων και η πιθανότητα ατυχήματος να διατηρηθούν τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό λαμβάνοντας υπόψη κάθε σχετικό κοινωνικό και οικονομικό παράγοντα (As Low As Reasonably Achievable).
3. Αρχή των Ορίων Δόσεων (Dose Limits), όπου δεν επιτρέπεται υπέρβαση των ορίων δόσεων που καθορίζονται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. καταστάσεις έκτακτης ανάγκης) και αφού ληφθεί υπόψη η Αρχή της Αιτιολόγησης. Η αρχή αυτή δεν ισχύει για τις ιατρικές εκθέσεις. Για το γενικό πληθυσμό, το ετήσιο όριο έκθεσης έχει καθοριστεί στο 1 mSv.

Ο άνθρωπος καθημερινά εκτίθεται σε ακτινοβολία λόγω της ύπαρξης του στην Γη. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται φυσική ακτινοβολία υποβάθρου. Αποτελείται από σχεδόν αποκλειστικά ακτινοβολία του περιβάλλοντος (σπίτια, άνθρωποι, αντικείμενα, ατμόσφαιρα, έδαφος κτλ.) και αναλογικά πολύ λιγότερο από την κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου, που αποτελεί περίπου το 15 % της συνολικής ακτινοβολίας που δέχεται ο πληθυσμός στην επιφάνεια της Γης. Από μετρήσεις που έχουν γίνει, έχει παρατηρηθεί ότι η δόση που δέχονται τόσο τα πληρώματα αεροσκαφών όσο και αυτά των διαστημικών σκαφών είναι σαφώς μεγαλύτερη. Για τον παραπάνω λόγο, τα πληρώματα των αεροσκαφών και των διαστημικών σκαφών πρέπει να εντάσσονται στα επαγγέλματα με επαγγελματική έκθεση στην ακτινοβολία και να ακολουθούν τους κανόνες ακτινοπροστασίας όπως ορίζονται ρητά από τους αρμόδιους φορείς. Την διασφάλιση της τήρησης των κανόνων εξασφαλίζει η διοίκηση και το διοικητικό προσωπικό της εκάστοτε

αεροπορικής εταιρείας. Επίσης, ειδική μεταχείριση οφείλουν και οι επιβάτες που εγκυμονούν καθώς και τα παιδιά.

Όπως ισχύει γενικά με την έκθεση ενός ατόμου σε δόση ακτινοβολίας, έτσι και στην περίπτωση των πληρωμάτων αεροσκαφών, οι επιπτώσεις από την έκθεση μπορεί να είναι άμεσες με εμφάνιση του λεγόμενου «συνδρόμου ακτινοβολίας», που περιλαμβάνει γαστρεντερικές επιδράσεις, όπως ναυτία και έμετος και συμπτώματα που σχετίζονται με πτώση αίματος (σχετικά μικρότερες δόσεις), όπως η μόλυνση και η αιμορραγία. Τις περισσότερες φορές όμως οι επιπτώσεις από την χρόνια έκθεση σε χαμηλές δόσης ακτινοβολίας είναι μακροπρόθεσμες, περιλαμβάνοντας τα στοχαστικά αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις τα καθορισμένα αποτελέσματα. Η επίγεια επαύξησης κοσμικής ακτινοβολίας (GLE) και τα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα (SEP), είναι ηλιακά γεγονότα που χαρακτηρίζονται από υψηλή ένταση και μπορεί να προκαλέσουν άμεση εμφάνιση του ακτινικού συνδρόμου, ενώ η μακροχρόνια έκθεση στην γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία ευθύνεται για τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία των πληρωμάτων.

Γενικά, η δόση που λαμβάνουν τα πληρώματα αεροσκαφών αλλά και οι επιβάτες (κυρίως αυτοί που ταξιδεύουν συχνά) εξαρτάται από: την φάση και την ένταση του ηλιακού κύκλου, το υψόμετρο που πραγματοποιείται η πτήση (οι αστροναύτες εκτίθενται σε μεγαλύτερη δόση ακτινοβολίας), το γεωγραφικό πλάτος αφού τα πληρώματα των πτήσεων που πραγματοποιούνται κοντά στους πόλους λαμβάνουν μεγαλύτερη δόση ακτινοβολίας σε σχέση με τα πληρώματα μιας ίσης διάρκειας πτήσης αλλά σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη και τέλος, όπως ήταν φυσικό, από την χρονική διάρκεια της πτήσης.

Για να μελετηθούν εκτενέστερα οι επιδράσεις (βιολογικές, τεχνολογικές) της έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία (ηλιακή και γαλαξιακή), έχει δημιουργηθεί πλήθος μοντέλων, που βασίζονται στη συλλογή πραγματικών δεδομένων (παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων) αλλά και σε προσομοιώσεις.

Τα πιο αξιόπιστα και ευρέως διαδεδομένα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουμε την δόση που λαμβάνουν οι επιβάτες και τα πληρώματα των αεροσκαφών είναι:

- AVIDOS
- SIEVERT
- CARI-7A
- DYASTIMA / DYASTIMA-R (A. NE.MO.S)
- PLANETOCOSMICS / MAGNETOCOSMICS

- EPCARD
- PCAIRE

Η πλειοψηφία των μοντέλων αυτών είναι πιστοποιημένα από διεθνείς φορείς και οργανισμούς. Ο κώδικας αυτών των προγραμμάτων βασίζεται στην προσομοίωση του δευτερογενούς καταιγισμού της κοσμικής ακτινοβολίας με προσομοιώσεις Monte Carlo ή στη χρήση αναλυτικών λύσεων του προβλήματος με αριθμητικούς υπολογισμούς ή βασίζεται στην προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα των μοντέλων έρχονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους. Όμως, συνιστάται ότι κάθε τέτοιο υπολογιστικό θα πρέπει να επικυρώνεται και από πειραματικά δεδομένα.

Μερικά μοντέλα μας παρέχουν διαδικτυακά ειδικές πλατφόρμες, όπου μπορεί ο χρήστης με ευκολία να ρυθμίσει τις παραμέτρους των πτήσεων ώστε το πρόγραμμα να υπολογίσει την ζητούμενη λαμβανόμενη δόση (π.χ. Sievert, Avidos), ενώ άλλα έχουν δικούς τους περιβάλλον και δεν απαιτούν σύνδεση στο διαδίκτυο αλλά μόνο ένα μέρος της υπολογιστικής ισχύς του συστήματος (π.χ. Cari-7A, Dyastima).

Σε αυτή την εργασία, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με τέσσερα από τα παραπάνω μοντέλα (αυτά στα οποία είχαμε ελεύθερη πρόσβαση και δεν απαιτούνταν χορήγηση ειδικής άδειας από τον αρμόδιο φορέα). Με το Sievert, υπολογίσαμε την ισοδύναμη δόση, που λαμβάνει το πλήρωμα και οι επιβάτες, για απευθείας πτήση από το αεροδρόμιο της Αθήνας προς διάφορους προορισμούς, με διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος και χρονική διάρκεια πτήσης. Οι μετρήσεις έγιναν για τις εξής πόλεις-προορισμοί:

- 1) Ρώμη-Ιταλία(1h50m)
- 2) Φρανκφούρτη-Γερμανία(2h44m)
- 3) Μόσχα-Ρωσία (3h16m)
- 4) Λονδίνο-Ηνωμένο Βασίλειο (3h30m)
- 5) Ελσίνκι-Φινλανδία (3h34m)
- 6) Όσλο-Νορβηγία (3h44m)
- 7) Λισαβόνα-Πορτογαλία (4h03m)
- 8) Δουβλίνο-Ιρλανδία (4h03m)
- 9) Μαρρακές-Μαρόκο (4h12m)
- 10) Αντίς Αμπέμπα-Αιθιοπία (4h54m)
- 11) Νέα Υόρκη-ΗΠΑ (10h30m)
- 12) Σανγκάη-Κίνα (11h09m)

13) Σικάγο-ΗΠΑ (11h24m)

14) Τζοχόρ Μπάχρου-Σιγκαπούρη (11h45m)

Παρατηρώντας τις πόλεις προορισμού, παρατηρούμε ότι, έχουν επιλεγεί οι πιο μακρινοί δυνατοί προορισμοί, σε μικρά, μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη καθώς και πτήσεις με παρόμοια χρονική διάρκεια αλλά διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος, με σκοπό να δείξουμε την εξάρτηση που έχει η υπολογιζόμενη λαμβανόμενη ισοδύναμη δόση, με το γεωγραφικό πλάτος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για το χρονικό διάστημα 12/2008 – 12/2019, δηλαδή για ολόκληρο τον 24^ο Ηλιακό κύκλο. Από την επεξεργασία τους προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Υπάρχει σαφής εξάρτηση της ισοδύναμης δόσης που λαμβάνουμε με το γεωγραφικό πλάτος του προορισμού, καθώς και με την χρονική διάρκεια της πτήσης.
- Υπάρχει εμφανής η αντισυσχέτιση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα. Η ισοδύναμη δόση από την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία, όπως υπολογίζεται από το μοντέλο Sievert, εμφανίζει την ελάχιστη τιμή της στο μέγιστο της δραστηριότητας του ηλιακού κύκλου (2013-2014).
- Η ισοδύναμη δόση αυξάνεται κατά τη διάρκεια έντονων γεγονότων του Ηλίου, όπως τα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα (SEP) και οι επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE), ενώ μειώνεται κατά την διάρκεια μιας μείωσης Forbush. Οι πτήσεις που επηρεάζονται περισσότερο είναι αυτές που έχουν ως προορισμό περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Με το μοντέλο Avidos 2.0, μπορέσαμε να παρατηρήσουμε την επίδραση των επίγειων επαυξήσεων κοσμικής ακτινοβολίας (GLE) σε πτήσεις σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και συγκεκριμένα για πτήση από το αεροδρόμιο της Στοκχόλμης στη Σουηδία, με προορισμό το Ρέικιαβικ στην Ισλανδία, στη επίδραση της ενεργούς δόσης που λαμβάνει το πλήρωμα και οι επιβάτες μιας τέτοιας πτήσης.

Μάλιστα, στην περίπτωση του GLE 42, η αντιστοιχία που κάνει το μοντέλο σε μέρες λαμβανόμενης δόσης από την φυσική ακτινοβολία υποβάθρου, ανέρχεται σε δεκαοχτώ (18), από δύο (2) ημέρες έκθεσης, σε συνθήκες ήρεμης ηλιακής δραστηριότητας, εκείνη την χρονική περίοδο.

Εκτελώντας το υπολογιστικό μοντέλο Car1-7A, υπολογίσαμε την ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)$, σε περιοχές με διαφορετικό κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας (R_c)

και σε καθορισμένο υψόμετρο των 35,000 ft, που είναι το πιο συνηθισμένο υψόμετρο εμπορικών πτήσεων. Διαπιστώσαμε ότι υπάρχει σαφής εξάρτηση της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ που λαμβάνουμε με το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας R_c της περιοχής μέτρησης. Ακόμα, παρατηρείται και εδώ η αντισυσχέτιση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα (κυρίως σε μικρή τιμή της R_c), με την ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ να εμφανίζεται στο μέγιστο της δραστηριότητας του ηλιακού κύκλου (2013-2014).

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και η εφαρμογή DYASTIMA καθώς και η προέκτασή της DYASTIMA-R, η οποία δημιουργήθηκε από τον Δρ. Παύλο Πασχάλη, της ομάδας κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (A.NE.MO.S).

Το DYASTIMA είναι μια αυτόνομη εφαρμογή που βασίζεται στις προσομοιώσεις Geant4, για να προσομοιώσει τους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη, όταν εισέρχονται τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας. Στην έξοδο το πρόγραμμα μας υπολογίζει το σύνολο των χαρακτηριστικών των δευτερογενών σωματιδίων, σε διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα που έχουμε επιλέξει (αριθμός, ενέργεια, διεύθυνση και χρόνο άφιξης).

Το DYASTIMA-R, είναι μια προέκταση του προγράμματος DYASTIMA. Είναι μια προσομοίωση Monte Carlo και μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε τη μεταφορά ενέργειας της ακτινοβολίας (πρωτογενής και δευτερογενής) στη βιολογική ύλη. Η εφαρμογή αυτή, μας υπολογίζει την ισοδύναμη δόση για διάφορα είδη σωματιδίων και σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά υψόμετρα, όπως τα έχουμε ορίσει. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του προγράμματος είναι ότι λαμβάνει υπόψη το μέγιστο και το ελάχιστο του εκάστοτε ηλιακού κύκλου που μελετάμε, όπως επίσης τη γεωμετρία και τα υλικά θωράκισης των αεροσκαφών (P. Paschalis, 2017).

Έχουμε πλέον κατανοήσει τον σημαντικό ρόλο που έχουν τα υπολογιστικά μοντέλα στην μελέτη των επιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας, στον άνθρωπο και τα ηλεκτρονικά συστήματα, τόσο κατά τη διάρκεια αεροπορικών πτήσεων όσο και στο διαστημικό περιβάλλον της Γης. Γι' αυτό το λόγο, η διεθνής επιστημονική κοινότητα, προσπαθεί να αναπτύξει νέα και αξιόπιστα συστήματα μέτρησης ώστε να μας παρέχουν βαθμονομημένα δεδομένα δόσης σε τεχνολογία πραγματικού χρόνου, καθώς και την διευρυμένη χρήση της χρήσης των επίγειων μετρητών, ώστε να βελτιωθεί η μοντελοποίηση του περιβάλλοντος πτήσης και κατ' επέκταση να υπάρχει πληρέστερη ενημέρωση των εργαζομένων και του κοινού.

Προτείνονται ως λύσεις για προστασία από την έκθεση κατά την διάρκεια των αεροπορικών πτήσεων, όσον ήταν δυνατόν, ιδίως κατά τη διάρκεια ενός έκτακτου, έντονου ηλιακού γεγονότος, η αλλαγή του υψόμετρου πτήσης σε χαμηλότερο από το σύνηθες και η πραγματοποίηση της πτήσης σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, με σκοπό να αποφύγουμε τις πολικές περιοχές, όπου η λαμβανόμενη δόση είναι πιο μεγάλη. Για να υπάρχει η δυνατότητα να υλοποιηθούν αυτές οι προτάσεις θα πρέπει να υπάρξει έγκαιρη πρόβλεψη τέτοιων γεγονότων, ώστε να μπορούν να δοθούν οι κατάλληλες οδηγίες από το κέντρο ελέγχου.

Υπολογίστηκε, με το DYASTIMA-R, τόσο ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης όσο και ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, που εναποτέθηκε σε σφαίρα ICRU (σε βάθος 10 mm), αθροιστικά αλλά και για το κάθε είδος σωματιδίου ξεχωριστά, για υψόμετρα έως τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, ανά 1000 μέτρα. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίσαμε ποιοτικά και ποσοτικά την συνεισφορά των διαφόρων σωματιδίων στη διαμόρφωση των δόσεων.

Κατασκευάστηκαν διαγράμματα τόσο του ρυθμού απορροφούμενης δόσης όσο και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, σε συνάρτηση με το υψόμετρο της ατμόσφαιρας, για τα έτη 2014 (συνθήκες ηλιακού μεγίστου) και 2008, 2019 (συνθήκες ηλιακού ελαχίστου). Από τα διαγράμματα έγινε προφανές ότι και οι δύο ρυθμοί δόσης (απορροφούμενης και ισοδύναμης) της κοσμικής ακτινοβολίας, επηρεάζονται σημαντικά από την ηλιακή δραστηριότητα και συγκεκριμένα αυξάνονται όταν παρατηρείται ηλιακό ελάχιστο. Ακόμα, διαπιστώθηκε η συνεισφορά, και στους δύο ρυθμούς δόσης, των σωματιδίων του ατμοσφαιρικού καταιγισμού και κυρίως των πρωτονίων, των νετρονίων και των σωματίων α . Παρατηρήσαμε ότι, τα πρωτόνια είναι αυτά που καθορίζουν τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης, ενώ τα νετρόνια συνεισφέρουν κυρίως κατά στη διαμόρφωση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το βιολογικό αποτέλεσμα (πίνακας 4.4, συντελεστές στάθμισης, ICRP 2007).

Στην τελευταία παράγραφο, κάνουμε σύγκριση των μέσων ετήσιων ρυθμών ισοδύναμων δόσεων περιβάλλοντος $H^*(10)$, έτσι όπως υπολογίστηκαν από τα προγράμματα Dyastima και Cari-7 και βλέπουμε την πιστότητα του προγράμματος Dyastima στον υπολογισμό δόσεων κοσμικής ακτινοβολίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπολογιστικό μοντέλο Sievert

Η ισοδύναμη δόση σε mSv, για απευθείας πτήσεις με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας, όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Sievert (<https://www.sievert-system.org/>), για το χρονικό διάστημα από 12/2008 μέχρι 12/2019, δίνεται στους παρακάτω πίνακες 1 και 2:

Date mm/dd/yyyy	Rome	Frankfurt	Moscow	London	Helsinki	Oslo	Lisbon	Dublin
12/1/2008	0.0031	0.0088	0.0139	0.0143	0.0173	0.0184	0.0126	0.0183
1/1/2009	0.0031	0.0088	0.014	0.0144	0.0174	0.0186	0.0127	0.0184
2/1/2009	0.0031	0.0088	0.014	0.0144	0.0175	0.0187	0.0127	0.0185
3/1/2009	0.0031	0.0089	0.0141	0.0145	0.0176	0.0188	0.0127	0.0186
4/1/2009	0.0031	0.0089	0.0141	0.0145	0.0176	0.0188	0.0128	0.0187
5/1/2009	0.0031	0.0089	0.0142	0.0146	0.0178	0.0189	0.0128	0.0187
6/1/2009	0.0031	0.0089	0.0142	0.0146	0.0178	0.019	0.0128	0.0188
7/1/2009	0.0032	0.009	0.0144	0.0148	0.018	0.0193	0.0129	0.019
8/1/2009	0.0032	0.0091	0.0145	0.0149	0.0182	0.0194	0.013	0.0191
9/1/2009	0.0032	0.0091	0.0145	0.0149	0.0182	0.0194	0.013	0.0191
10/1/2009	0.0032	0.0091	0.0145	0.0148	0.0182	0.0193	0.0131	0.0191
11/1/2009	0.0032	0.0091	0.0145	0.0148	0.0181	0.0193	0.013	0.019
12/1/2009	0.0032	0.0091	0.0145	0.0148	0.0181	0.0193	0.013	0.0191
1/1/2010	0.0032	0.0091	0.0145	0.0149	0.0182	0.0194	0.013	0.0192
2/1/2010	0.0032	0.0091	0.0146	0.0149	0.0183	0.0195	0.0131	0.0192
3/1/2010	0.0032	0.0091	0.0146	0.0149	0.0183	0.0195	0.0131	0.0192
4/1/2010	0.0032	0.0091	0.0146	0.0149	0.0183	0.0195	0.0131	0.0192
5/1/2010	0.0032	0.0091	0.0144	0.0147	0.018	0.0192	0.0131	0.0189
6/1/2010	0.0031	0.0089	0.0141	0.0145	0.0176	0.0187	0.013	0.0185
7/1/2010	0.0031	0.0088	0.0139	0.0143	0.0173	0.0184	0.0128	0.0183
8/1/2010	0.0031	0.0087	0.0138	0.0142	0.0171	0.0183	0.0126	0.0182
9/1/2010	0.0031	0.0087	0.0139	0.0142	0.0172	0.0183	0.0125	0.0182
10/1/2010	0.0031	0.0087	0.0138	0.0142	0.0171	0.0182	0.0126	0.0182
11/1/2010	0.0031	0.0087	0.0138	0.0141	0.0171	0.0182	0.0125	0.0181
12/1/2010	0.0031	0.0087	0.0137	0.0141	0.017	0.0181	0.0125	0.018
1/1/2011	0.0031	0.0087	0.0137	0.0141	0.017	0.0181	0.0125	0.0181
2/1/2011	0.0031	0.0087	0.0138	0.0142	0.0171	0.0182	0.0125	0.0181
3/1/2011	0.003	0.0087	0.0137	0.0141	0.0169	0.018	0.0125	0.018
4/1/2011	0.003	0.0086	0.0136	0.014	0.0168	0.0179	0.0124	0.0179
5/1/2011	0.003	0.0086	0.0136	0.014	0.0169	0.018	0.0124	0.0179
6/1/2011	0.003	0.0086	0.0135	0.0139	0.0167	0.0178	0.0124	0.0178

7/1/2011	0.003	0.0085	0.0134	0.0138	0.0165	0.0175	0.0123	0.0175
8/1/2011	0.0029	0.0083	0.0131	0.0136	0.0162	0.0173	0.0122	0.0174
9/1/2011	0.003	0.0085	0.0133	0.0136	0.0163	0.0172	0.0121	0.0173
10/1/2011	0.0029	0.0082	0.0128	0.0133	0.0157	0.0168	0.0121	0.0169
11/1/2011	0.0029	0.0083	0.013	0.0134	0.0159	0.017	0.012	0.0171
12/1/2011	0.0029	0.0083	0.013	0.0135	0.016	0.017	0.012	0.0171
1/1/2012	0.0029	0.0083	0.013	0.0134	0.0159	0.0169	0.012	0.017
2/1/2012	0.0029	0.0082	0.0129	0.0134	0.0159	0.017	0.012	0.0171
3/1/2012	0.003	0.0084	0.0131	0.0136	0.0163	0.0174	0.012	0.0174
4/1/2012	0.003	0.0085	0.0134	0.0138	0.0165	0.0175	0.0121	0.0175
5/1/2012	0.003	0.0084	0.0131	0.0135	0.0161	0.0171	0.0122	0.0171
6/1/2012	0.003	0.0084	0.0132	0.0135	0.0159	0.0168	0.0121	0.017
7/1/2012	0.003	0.0082	0.0128	0.0134	0.0156	0.0166	0.0124	0.0169
8/1/2012	0.003	0.0085	0.0134	0.0138	0.0163	0.0173	0.0124	0.0174
9/1/2012	0.003	0.0085	0.0134	0.0138	0.0162	0.0172	0.0124	0.0174
10/1/2012	0.003	0.0084	0.0131	0.0134	0.0158	0.0167	0.0124	0.0169
11/1/2012	0.003	0.0082	0.0126	0.0131	0.0152	0.0162	0.0124	0.0165
12/1/2012	0.003	0.0082	0.0127	0.0133	0.0154	0.0164	0.0123	0.0167
1/1/2013	0.003	0.0083	0.013	0.0134	0.0157	0.0167	0.0124	0.0169
2/1/2013	0.003	0.0083	0.013	0.0135	0.0157	0.0167	0.0124	0.0169
3/1/2013	0.003	0.0083	0.013	0.0135	0.0158	0.0168	0.0124	0.017
4/1/2013	0.003	0.0084	0.0132	0.0136	0.016	0.017	0.0124	0.0172
5/1/2013	0.003	0.0084	0.0132	0.0137	0.016	0.017	0.0124	0.0172
6/1/2013	0.003	0.0084	0.0132	0.0136	0.016	0.017	0.0124	0.0171
7/1/2013	0.003	0.0084	0.013	0.0135	0.0158	0.0168	0.0124	0.017
8/1/2013	0.003	0.0084	0.013	0.0134	0.0157	0.0166	0.0124	0.0168
9/1/2013	0.003	0.0081	0.0125	0.0129	0.0149	0.0157	0.0124	0.016
10/1/2013	0.0029	0.0077	0.0117	0.0122	0.014	0.0148	0.0122	0.0153
11/1/2013	0.0029	0.0077	0.0118	0.0123	0.0141	0.0149	0.0118	0.0154
12/1/2013	0.0029	0.0078	0.0119	0.0124	0.0142	0.0151	0.0119	0.0156
1/1/2014	0.003	0.0079	0.012	0.0126	0.0145	0.0154	0.0121	0.0158
2/1/2014	0.003	0.008	0.0122	0.0128	0.0147	0.0156	0.0122	0.0159
3/1/2014	0.003	0.008	0.0121	0.0126	0.0145	0.0154	0.0123	0.0158
4/1/2014	0.0029	0.0078	0.012	0.0125	0.0143	0.0152	0.0122	0.0157
5/1/2014	0.003	0.0079	0.012	0.0125	0.0143	0.0152	0.0121	0.0156
6/1/2014	0.0029	0.0076	0.0117	0.0122	0.014	0.0148	0.0121	0.0153
7/1/2014	0.0029	0.0077	0.0118	0.0124	0.0141	0.015	0.0118	0.0155
8/1/2014	0.0029	0.0078	0.0119	0.0125	0.0143	0.0152	0.012	0.0156
9/1/2014	0.003	0.0079	0.0121	0.0126	0.0144	0.0153	0.0121	0.0157
10/1/2014	0.0029	0.0077	0.0118	0.0123	0.0141	0.015	0.0122	0.0154
11/1/2014	0.0029	0.0078	0.012	0.0125	0.0143	0.0153	0.012	0.0157
12/1/2014	0.003	0.008	0.0121	0.0126	0.0145	0.0154	0.0121	0.0158
1/1/2015	0.0029	0.0078	0.012	0.0127	0.0146	0.0157	0.0122	0.0161
2/1/2015	0.003	0.0083	0.013	0.0135	0.0158	0.0167	0.0121	0.0169

3/1/2015	0.003	0.0083	0.0129	0.0133	0.0156	0.0165	0.0124	0.0167
4/1/2015	0.003	0.0082	0.0126	0.0132	0.0153	0.0162	0.0124	0.0165
5/1/2015	0.003	0.0082	0.0128	0.0133	0.0154	0.0164	0.0123	0.0167
6/1/2015	0.003	0.0083	0.0128	0.0132	0.0154	0.0163	0.0124	0.0166
7/1/2015	0.003	0.0082	0.0126	0.0131	0.0152	0.0162	0.0124	0.0165
8/1/2015	0.003	0.0082	0.0128	0.0133	0.0154	0.0164	0.0123	0.0167
9/1/2015	0.003	0.0083	0.013	0.0135	0.0157	0.0168	0.0124	0.017
10/1/2015	0.003	0.0084	0.0131	0.0136	0.0159	0.0169	0.0124	0.0171
11/1/2015	0.003	0.0084	0.0131	0.0135	0.0159	0.0169	0.0124	0.017
12/1/2015	0.003	0.0084	0.0132	0.0135	0.016	0.017	0.0124	0.017
1/1/2016	0.003	0.0084	0.0132	0.0135	0.016	0.017	0.0123	0.017
2/1/2016	0.003	0.0084	0.0132	0.0136	0.0161	0.0171	0.0123	0.0171
3/1/2016	0.003	0.0084	0.0134	0.0138	0.0164	0.0175	0.0123	0.0175
4/1/2016	0.0031	0.0087	0.0139	0.0141	0.017	0.018	0.0124	0.0179
5/1/2016	0.0031	0.0087	0.0138	0.0141	0.0169	0.018	0.0126	0.0178
6/1/2016	0.0031	0.0088	0.0139	0.0142	0.017	0.0181	0.0126	0.0179
7/1/2016	0.0031	0.0087	0.0139	0.0142	0.017	0.0181	0.0126	0.0179
8/1/2016	0.0031	0.0088	0.014	0.0142	0.0171	0.0182	0.0126	0.018
9/1/2016	0.0031	0.0088	0.014	0.0142	0.0171	0.0182	0.0127	0.018
10/1/2016	0.0031	0.0088	0.0141	0.0143	0.0172	0.0183	0.0127	0.0181
11/1/2016	0.0031	0.0088	0.014	0.0143	0.0171	0.0183	0.0127	0.0181
12/1/2016	0.0031	0.0088	0.0141	0.0144	0.0173	0.0184	0.0127	0.0182
1/1/2017	0.0031	0.0089	0.0142	0.0144	0.0174	0.0185	0.0128	0.0183
2/1/2017	0.0032	0.0089	0.0143	0.0146	0.0176	0.0188	0.0128	0.0185
3/1/2017	0.0032	0.009	0.0145	0.0146	0.0178	0.0189	0.0129	0.0186
4/1/2017	0.0032	0.009	0.0145	0.0147	0.0178	0.019	0.013	0.0187
5/1/2017	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0191	0.013	0.0188
6/1/2017	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.0181	0.0192	0.0131	0.0189
7/1/2017	0.0032	0.0091	0.0147	0.0148	0.0181	0.0192	0.0131	0.0188
8/1/2017	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0191	0.0132	0.0188
9/1/2017	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0192	0.0131	0.0188
10/1/2017	0.0032	0.0091	0.0147	0.0148	0.018	0.0191	0.0131	0.0188
11/1/2017	0.0032	0.009	0.0145	0.0146	0.0177	0.0188	0.0131	0.0185
12/1/2017	0.0031	0.0089	0.0142	0.0144	0.0174	0.0185	0.013	0.0183
1/1/2018	0.0031	0.0089	0.0142	0.0144	0.0174	0.0185	0.0128	0.0183
2/1/2018	0.0032	0.0089	0.0144	0.0146	0.0177	0.0188	0.0128	0.0186
3/1/2018	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0191	0.013	0.0188
4/1/2018	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0192	0.0131	0.0188
5/1/2018	0.0032	0.0091	0.0146	0.0148	0.018	0.0192	0.0131	0.0189
6/1/2018	0.0032	0.0091	0.0147	0.0149	0.0181	0.0193	0.0131	0.0189
7/1/2018	0.0032	0.0091	0.0147	0.0149	0.0182	0.0194	0.0132	0.019
8/1/2018	0.0032	0.0092	0.0148	0.0149	0.0182	0.0194	0.0132	0.019
9/1/2018	0.0032	0.0092	0.0148	0.0149	0.0182	0.0194	0.0132	0.019
10/1/2018	0.0033	0.0092	0.0149	0.015	0.0184	0.0196	0.0132	0.0191

11/1/2018	0.0032	0.0092	0.0149	0.015	0.0184	0.0195	0.0133	0.0191
12/1/2018	0.0032	0.0092	0.0149	0.015	0.0184	0.0196	0.0133	0.0191
1/1/2019	0.0033	0.0092	0.0149	0.0151	0.0184	0.0196	0.0133	0.0192
2/1/2019	0.0033	0.0093	0.0149	0.0151	0.0184	0.0196	0.0133	0.0192
3/1/2019	0.0032	0.0092	0.0149	0.015	0.0184	0.0195	0.0133	0.0191
4/1/2019	0.0032	0.0092	0.0149	0.015	0.0184	0.0195	0.0133	0.0191
5/1/2019	0.0032	0.0092	0.0149	0.015	0.0183	0.0195	0.0133	0.0191
6/1/2019	0.0032	0.0092	0.0148	0.015	0.0184	0.0196	0.0133	0.0191
7/1/2019	0.0033	0.0093	0.015	0.0151	0.0185	0.0197	0.0133	0.0193
8/1/2019	0.0033	0.0093	0.015	0.0151	0.0185	0.0196	0.0134	0.0191
9/1/2019	0.0032	0.0092	0.0148	0.015	0.0183	0.0195	0.0133	0.0191
10/1/2019	0.0033	0.0092	0.0149	0.0151	0.0185	0.0196	0.0132	0.0192
11/1/2019	0.0033	0.0092	0.0149	0.0151	0.0184	0.0196	0.0133	0.0192

Πίνακας 1: Η ισοδύναμη δόση (mSv), για απευθείας πτήσεις με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας και για τους πρώτους εννέα τόπους προορισμού, όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Sievert, για το χρονικό διάστημα από 12/2008 μέχρι 12/2019.

Date mm/dd/yyyy	Marrakesh	Addis Ababa	New York	Shanghai	Chicago	Singapore
12/1/2008	0.0108	0.0094	0.0736	0.0447	0.0904	0.0248
1/1/2009	0.0108	0.0095	0.0741	0.0448	0.0912	0.0248
2/1/2009	0.0109	0.0095	0.0748	0.045	0.0923	0.0249
3/1/2009	0.0109	0.0095	0.0748	0.045	0.0923	0.0249
4/1/2009	0.0109	0.0095	0.0757	0.0453	0.0938	0.025
5/1/2009	0.011	0.0095	0.0758	0.0453	0.0938	0.025
6/1/2009	0.011	0.0095	0.0769	0.0456	0.0957	0.0251
7/1/2009	0.011	0.0096	0.078	0.0459	0.0975	0.0252
8/1/2009	0.0111	0.0096	0.0783	0.046	0.0979	0.0252
9/1/2009	0.0111	0.0096	0.078	0.046	0.0974	0.0252
10/1/2009	0.0111	0.0096	0.0778	0.0459	0.0969	0.0252
11/1/2009	0.0111	0.0096	0.0777	0.0459	0.0969	0.0252
12/1/2009	0.0111	0.0096	0.0781	0.046	0.0975	0.0252
1/1/2010	0.0111	0.0096	0.0786	0.0461	0.0984	0.0252
2/1/2010	0.0111	0.0096	0.0788	0.0461	0.0986	0.0253
3/1/2010	0.0111	0.0096	0.079	0.0462	0.099	0.0253
4/1/2010	0.0111	0.0096	0.078	0.046	0.0972	0.0252
5/1/2010	0.011	0.0096	0.0755	0.0453	0.0931	0.025
6/1/2010	0.0109	0.0095	0.0737	0.0448	0.0903	0.0248
7/1/2010	0.0108	0.0094	0.0722	0.0443	0.088	0.0247

8/1/2010	0.0108	0.0094	0.0728	0.0444	0.0891	0.0247
9/1/2010	0.0108	0.0094	0.0723	0.0443	0.0883	0.0247
10/1/2010	0.0108	0.0094	0.072	0.0442	0.0878	0.0246
11/1/2010	0.0107	0.0094	0.0715	0.0441	0.087	0.0246
12/1/2010	0.0107	0.0094	0.0715	0.0441	0.087	0.0246
1/1/2011	0.0107	0.0094	0.0721	0.0442	0.088	0.0246
2/1/2011	0.0108	0.0094	0.0715	0.0441	0.0869	0.0246
3/1/2011	0.0107	0.0093	0.0704	0.0438	0.0853	0.0245
4/1/2011	0.0107	0.0093	0.0709	0.0439	0.0862	0.0245
5/1/2011	0.0107	0.0093	0.0703	0.0437	0.0851	0.0244
6/1/2011	0.0106	0.0093	0.0697	0.0436	0.0842	0.0244
7/1/2011	0.0106	0.0093	0.0669	0.0428	0.0797	0.0241
8/1/2011	0.0105	0.0092	0.0683	0.0431	0.0822	0.0242
9/1/2011	0.0105	0.0092	0.0648	0.0421	0.0769	0.0239
10/1/2011	0.0104	0.0091	0.0656	0.0423	0.0782	0.0239
11/1/2011	0.0104	0.0091	0.0661	0.0424	0.0788	0.024
12/1/2011	0.0104	0.0091	0.0659	0.0424	0.0786	0.024
1/1/2012	0.0104	0.0091	0.0652	0.0422	0.0776	0.0239
2/1/2012	0.0104	0.0091	0.0667	0.0426	0.0798	0.024
3/1/2012	0.0105	0.0092	0.0689	0.0432	0.0832	0.0242
4/1/2012	0.0106	0.0092	0.067	0.0428	0.08	0.0241
5/1/2012	0.0106	0.0094	0.0637	0.0438	0.0764	0.0251
6/1/2012	0.0108	0.0096	0.0608	0.043	0.0723	0.025
7/1/2012	0.0108	0.0095	0.0643	0.0442	0.0774	0.0252
8/1/2012	0.0109	0.0097	0.0651	0.0445	0.0783	0.0254
9/1/2012	0.0109	0.0097	0.0634	0.0439	0.0758	0.0253
10/1/2012	0.0108	0.0096	0.0599	0.0427	0.0711	0.0249
11/1/2012	0.0106	0.0094	0.0601	0.0427	0.0717	0.0248
12/1/2012	0.0107	0.0095	0.0619	0.0434	0.0742	0.025
1/1/2013	0.0108	0.0095	0.062	0.0434	0.0742	0.0251
2/1/2013	0.0108	0.0095	0.0623	0.0435	0.0745	0.0251
3/1/2013	0.0108	0.0096	0.0632	0.0438	0.0757	0.0252
4/1/2013	0.0108	0.0096	0.0636	0.044	0.0763	0.0252
5/1/2013	0.0109	0.0096	0.0638	0.044	0.0765	0.0253
6/1/2013	0.0108	0.0096	0.0627	0.0436	0.0749	0.0252
7/1/2013	0.0108	0.0096	0.0627	0.0436	0.0751	0.0251
8/1/2013	0.0107	0.0095	0.0596	0.0426	0.0707	0.0249
9/1/2013	0.0105	0.0093	0.0546	0.0405	0.064	0.0242
10/1/2013	0.0102	0.0092	0.0543	0.0402	0.0639	0.0241
11/1/2013	0.0102	0.0092	0.055	0.0406	0.0649	0.0242
12/1/2013	0.0103	0.0092	0.0558	0.041	0.0658	0.0243
1/1/2014	0.0104	0.0093	0.0572	0.0416	0.0677	0.0245
2/1/2014	0.0105	0.0093	0.0567	0.0414	0.067	0.0244
3/1/2014	0.0104	0.0093	0.0557	0.041	0.0656	0.0243

4/1/2014	0.0103	0.0093	0.056	0.0411	0.0661	0.0243
5/1/2014	0.0104	0.0092	0.0542	0.0403	0.0637	0.0241
6/1/2014	0.0102	0.0092	0.0546	0.0404	0.0644	0.0241
7/1/2014	0.0103	0.0092	0.0552	0.0407	0.0651	0.0242
8/1/2014	0.0103	0.0093	0.0562	0.0412	0.0664	0.0243
9/1/2014	0.0104	0.0093	0.0549	0.0406	0.0645	0.0242
10/1/2014	0.0103	0.0092	0.0553	0.0407	0.0653	0.0242
11/1/2014	0.0104	0.0093	0.0565	0.0413	0.0668	0.0244
12/1/2014	0.0104	0.0093	0.0555	0.0409	0.0653	0.0243
1/1/2015	0.0105	0.0093	0.0617	0.0431	0.0741	0.0249
2/1/2015	0.0108	0.0096	0.0621	0.0434	0.0742	0.0251
3/1/2015	0.0107	0.0095	0.06	0.0427	0.0713	0.0249
4/1/2015	0.0107	0.0095	0.0607	0.0429	0.0724	0.0249
5/1/2015	0.0107	0.0095	0.061	0.0431	0.0728	0.0249
6/1/2015	0.0107	0.0095	0.0596	0.0426	0.0708	0.0248
7/1/2015	0.0106	0.0094	0.0604	0.0428	0.072	0.0249
8/1/2015	0.0107	0.0095	0.0618	0.0433	0.074	0.025
9/1/2015	0.0108	0.0096	0.063	0.0437	0.0755	0.0252
10/1/2015	0.0108	0.0096	0.0629	0.0437	0.0752	0.0252
11/1/2015	0.0108	0.0096	0.0621	0.0447	0.0752	0.0253
12/1/2015	0.0108	0.0096	0.0621	0.0448	0.0752	0.0254
1/1/2016	0.0108	0.0096	0.0623	0.0449	0.0756	0.0254
2/1/2016	0.0108	0.0096	0.0628	0.0451	0.0762	0.0254
3/1/2016	0.0109	0.0097	0.0663	0.0464	0.082	0.0258
4/1/2016	0.0111	0.0098	0.0658	0.0463	0.0808	0.0258
5/1/2016	0.011	0.0098	0.0668	0.0466	0.0826	0.0259
6/1/2016	0.0111	0.0098	0.0667	0.0466	0.0823	0.0259
7/1/2016	0.0111	0.0098	0.0669	0.0467	0.0827	0.0259
8/1/2016	0.0111	0.0098	0.067	0.0468	0.0829	0.026
9/1/2016	0.0111	0.0098	0.0676	0.047	0.084	0.026
10/1/2016	0.0111	0.0098	0.0671	0.0468	0.083	0.026
11/1/2016	0.0111	0.0098	0.0679	0.0471	0.0846	0.0261
12/1/2016	0.0112	0.0099	0.0681	0.0472	0.0848	0.0261
1/1/2017	0.0112	0.0099	0.0691	0.0476	0.0867	0.0262
2/1/2017	0.0113	0.0099	0.0701	0.0479	0.0883	0.0263
3/1/2017	0.0113	0.01	0.0701	0.048	0.0882	0.0264
4/1/2017	0.0113	0.01	0.0709	0.0482	0.0896	0.0264
5/1/2017	0.0114	0.01	0.0713	0.0484	0.0903	0.0265
6/1/2017	0.0114	0.01	0.0717	0.0486	0.0911	0.0266
7/1/2017	0.0114	0.01	0.071	0.0483	0.0897	0.0265
8/1/2017	0.0114	0.01	0.0712	0.0484	0.0902	0.0265
9/1/2017	0.0114	0.01	0.0716	0.0485	0.0909	0.0265
10/1/2017	0.0114	0.01	0.0704	0.0481	0.0885	0.0264
11/1/2017	0.0113	0.01	0.0688	0.0475	0.0859	0.0262

12/1/2017	0.0112	0.0099	0.0682	0.0472	0.0848	0.0261
1/1/2018	0.0112	0.0099	0.0692	0.0476	0.0868	0.0262
2/1/2018	0.0113	0.01	0.0708	0.0482	0.0895	0.0264
3/1/2018	0.0114	0.01	0.0712	0.0484	0.0901	0.0265
4/1/2018	0.0114	0.01	0.0713	0.0484	0.0903	0.0265
5/1/2018	0.0114	0.01	0.0717	0.0485	0.091	0.0265
6/1/2018	0.0114	0.0101	0.0719	0.0486	0.0914	0.0266
7/1/2018	0.0114	0.0101	0.0723	0.0488	0.092	0.0266
8/1/2018	0.0114	0.0101	0.0721	0.0487	0.0916	0.0266
9/1/2018	0.0114	0.0101	0.0729	0.049	0.0932	0.0267
10/1/2018	0.0115	0.0101	0.0729	0.049	0.0931	0.0267
11/1/2018	0.0115	0.0101	0.0729	0.049	0.0931	0.0267
12/1/2018	0.0115	0.0101	0.0731	0.0491	0.0934	0.0267
1/1/2019	0.0115	0.0101	0.0733	0.0492	0.0939	0.0267
2/1/2019	0.0115	0.0101	0.0729	0.049	0.093	0.0267
3/1/2019	0.0115	0.0101	0.0728	0.049	0.0929	0.0267
4/1/2019	0.0115	0.0101	0.0728	0.049	0.0929	0.0267
5/1/2019	0.0115	0.0101	0.0726	0.0489	0.0926	0.0267
6/1/2019	0.0115	0.0101	0.0735	0.0492	0.0943	0.0268
7/1/2019	0.0115	0.0101	0.0736	0.0493	0.0943	0.0268
8/1/2019	0.0115	0.0101	0.0724	0.0488	0.092	0.0267
9/1/2019	0.0115	0.0101	0.0732	0.0491	0.0937	0.0267
10/1/2019	0.0115	0.0101	0.0733	0.0491	0.0937	0.0267
11/1/2019	0.0115	0.0101	0.0732	0.0491	0.0935	0.0267
12/1/2019		0.0101	0.0737	0.0493	0.0945	0.0268

Πίνακας 2: Η ισοδύναμη δόση (mSv), για απευθείας πτήσεις με αφετηρία το αεροδρόμιο της Αθήνας, για τους υπόλοιπους πέντε τόπους προορισμού (το σύνολο είναι 14), όπως υπολογίστηκε με το πρόγραμμα Sievert, για το χρονικό διάστημα από 12/2008 μέχρι 12/2019.

Παράρτημα Β

Υπολογιστικό μοντέλο Cari-7A

Η ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)$ μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο Cari-7A, για το χρονικό διάστημα από το 2008 μέχρι το 2019 (μέση ετήσια τιμή), δίνεται στον παρακάτω πίνακα 3:

YEAR (mean value)	FL350- R0GV	ERROR	FL350- R5GV	ERROR	FL350- R10GV	ERRO R	FL350- R15GV	ERRO R
2008	6.23E+00	2.19E-01	4.11E+00	1.70E-01	2.53E+00	1.21E-01	1.77E+00	9.90E-02
2009	6.27E+00	2.20E-01	4.12E+00	1.71E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.77E+00	9.90E-02
2010	6.32E+00	2.22E-01	4.13E+00	1.71E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.78E+00	9.91E-02
2011	6.26E+00	2.20E-01	4.11E+00	1.70E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.77E+00	9.90E-02
2012	6.26E+00	2.20E-01	4.11E+00	1.70E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.77E+00	9.90E-02
2013	5.47E+00	1.92E-01	3.83E+00	1.58E-01	2.44E+00	1.17E-01	1.73E+00	9.77E-02
2014	5.90E+00	2.06E-01	3.97E+00	1.64E-01	2.49E+00	1.19E-01	1.75E+00	9.84E-02
2015	5.66E+00	1.99E-01	3.90E+00	1.61E-01	2.47E+00	1.18E-01	1.74E+00	9.80E-02
2016	5.85E+00	2.05E-01	3.96E+00	1.64E-01	2.49E+00	1.19E-01	1.75E+00	9.83E-02
2017	6.04E+00	2.12E-01	4.03E+00	1.67E-01	2.51E+00	1.20E-01	1.76E+00	9.86E-02
2018	6.28E+00	2.20E-01	4.11E+00	1.70E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.77E+00	9.90E-02
2019	6.33E+00	2.22E-01	4.13E+00	1.71E-01	2.54E+00	1.21E-01	1.78E+00	9.91E-02

Πίνακας 3: Η ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)$ μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο Cari-7A, για το χρονικό διάστημα από το 2008 μέχρι το 2019 (μέση ετήσια τιμή).

Παράρτημα Γ

Υπολογιστικό μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R

Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης και ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για τα έτη 2008, 2014 και 2019, για υψόμετρο 85000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 4,5:

ALTITUDE (m)	DOSE RATE 2008 (Gy/sec)	DOSE RATE 2008 (μGy/h)	DOSE RATE 2014 (Gy/sec)	DOSE RATE 2014 (μGy/h)	DOSE RATE 2019 (Gy/sec)	DOSE RATE 2019 (μGy/h)
0	2.00E-12	7.20E-03	2.19E-12	7.88E-03	2.27E-12	8.17E-03
1000	5.92E-12	2.13E-02	7.97E-12	2.87E-02	7.24E-12	2.61E-02
2000	1.24E-11	4.46E-02	1.03E-11	3.71E-02	2.03E-11	7.31E-02
3000	1.77E-11	6.37E-02	1.52E-11	5.47E-02	1.56E-11	5.62E-02
4000	3.19E-11	1.15E-01	3.85E-11	1.39E-01	3.47E-11	1.25E-01
5000	6.81E-11	2.45E-01	5.59E-11	2.01E-01	4.50E-11	1.62E-01
6000	9.29E-11	3.34E-01	7.98E-11	2.87E-01	8.35E-11	3.01E-01
7000	1.40E-10	5.04E-01	1.32E-10	4.75E-01	1.53E-10	5.51E-01
8000	2.00E-10	7.20E-01	1.77E-10	6.37E-01	2.07E-10	7.45E-01
9000	3.15E-10	1.13E+00	2.43E-10	8.75E-01	3.09E-10	1.11E+00
10000	3.77E-10	1.36E+00	3.14E-10	1.13E+00	4.13E-10	1.49E+00
11000	5.22E-10	1.88E+00	4.47E-10	1.61E+00	4.62E-10	1.66E+00
12000	6.28E-10	2.26E+00	5.06E-10	1.82E+00	5.67E-10	2.04E+00
13000	6.94E-10	2.50E+00	6.53E-10	2.35E+00	7.51E-10	2.70E+00
14000	8.59E-10	3.09E+00	6.36E-10	2.29E+00	7.58E-10	2.73E+00
15000	9.24E-10	3.33E+00	7.79E-10	2.80E+00	9.37E-10	3.37E+00
16000	1.01E-09	3.64E+00	8.25E-10	2.97E+00	9.74E-10	3.51E+00
17000	1.10E-09	3.96E+00	7.89E-10	2.84E+00	9.99E-10	3.60E+00
18000	1.13E-09	4.07E+00	8.58E-10	3.09E+00	1.07E-09	3.85E+00
19000	1.13E-09	4.07E+00	8.73E-10	3.14E+00	1.08E-09	3.89E+00
20000	1.17E-09	4.21E+00	8.98E-10	3.23E+00	1.09E-09	3.92E+00
21000	1.19E-09	4.28E+00	8.46E-10	3.05E+00	1.25E-09	4.50E+00
22000	1.19E-09	4.28E+00	8.52E-10	3.07E+00	1.19E-09	4.28E+00
23000	1.19E-09	4.28E+00	9.14E-10	3.29E+00	1.14E-09	4.10E+00
24000	1.17E-09	4.21E+00	8.32E-10	3.00E+00	1.15E-09	4.14E+00
25000	1.22E-09	4.39E+00	8.69E-10	3.13E+00	1.12E-09	4.03E+00
26000	1.18E-09	4.25E+00	7.73E-10	2.78E+00	1.18E-09	4.25E+00
27000	1.24E-09	4.46E+00	8.21E-10	2.96E+00	1.11E-09	4.00E+00
28000	1.17E-09	4.21E+00	8.37E-10	3.01E+00	1.28E-09	4.61E+00
29000	1.10E-09	3.96E+00	7.50E-10	2.70E+00	1.26E-09	4.54E+00
30000	1.21E-09	4.36E+00	8.18E-10	2.94E+00	1.09E-09	3.92E+00

31000	1.14E-09	4.10E+00	7.08E-10	2.55E+00	1.12E-09	4.03E+00
32000	1.12E-09	4.03E+00	7.23E-10	2.60E+00	1.06E-09	3.82E+00
33000	1.18E-09	4.25E+00	8.15E-10	2.93E+00	1.01E-09	3.64E+00
34000	1.17E-09	4.21E+00	7.24E-10	2.61E+00	1.03E-09	3.71E+00
35000	1.20E-09	4.32E+00	6.94E-10	2.50E+00	1.16E-09	4.18E+00
36000	1.27E-09	4.57E+00	8.18E-10	2.94E+00	9.65E-10	3.47E+00
37000	1.22E-09	4.39E+00	6.73E-10	2.42E+00	1.02E-09	3.67E+00
38000	1.36E-09	4.90E+00	6.80E-10	2.45E+00	1.07E-09	3.85E+00
39000	1.12E-09	4.03E+00	6.90E-10	2.48E+00	9.75E-10	3.51E+00
40000	1.07E-09	3.85E+00	6.50E-10	2.34E+00	1.08E-09	3.89E+00
41000	1.12E-09	4.03E+00	6.99E-10	2.52E+00	1.05E-09	3.78E+00
42000	1.10E-09	3.96E+00	6.37E-10	2.29E+00	1.03E-09	3.71E+00
43000	1.17E-09	4.21E+00	7.12E-10	2.56E+00	1.12E-09	4.03E+00
44000	1.05E-09	3.78E+00	7.66E-10	2.76E+00	1.07E-09	3.85E+00
45000	1.17E-09	4.21E+00	6.78E-10	2.44E+00	1.03E-09	3.71E+00
46000	1.13E-09	4.07E+00	6.77E-10	2.44E+00	9.63E-10	3.47E+00
47000	1.03E-09	3.71E+00	7.20E-10	2.59E+00	1.21E-09	4.36E+00
48000	1.10E-09	3.96E+00	8.37E-10	3.01E+00	1.10E-09	3.96E+00
49000	1.17E-09	4.21E+00	7.54E-10	2.71E+00	1.05E-09	3.78E+00
50000	1.31E-09	4.72E+00	7.82E-10	2.82E+00	1.14E-09	4.10E+00
51000	1.05E-09	3.78E+00	7.65E-10	2.75E+00	1.15E-09	4.14E+00
52000	1.08E-09	3.89E+00	7.72E-10	2.78E+00	1.29E-09	4.64E+00
53000	1.02E-09	3.67E+00	7.96E-10	2.87E+00	1.18E-09	4.25E+00
54000	1.13E-09	4.07E+00	6.90E-10	2.48E+00	1.07E-09	3.85E+00
55000	1.24E-09	4.46E+00	6.37E-10	2.29E+00	1.07E-09	3.85E+00
56000	1.25E-09	4.50E+00	6.81E-10	2.45E+00	1.01E-09	3.64E+00
57000	1.06E-09	3.82E+00	6.20E-10	2.23E+00	1.13E-09	4.07E+00
58000	1.13E-09	4.07E+00	7.01E-10	2.52E+00	1.12E-09	4.03E+00
59000	1.12E-09	4.03E+00	7.16E-10	2.58E+00	1.19E-09	4.28E+00
60000	1.08E-09	3.89E+00	6.87E-10	2.47E+00	9.82E-10	3.54E+00
61000	1.11E-09	4.00E+00	6.80E-10	2.45E+00	9.74E-10	3.51E+00
62000	1.21E-09	4.36E+00	7.35E-10	2.65E+00	1.03E-09	3.71E+00
63000	1.06E-09	3.82E+00	6.46E-10	2.33E+00	9.30E-10	3.35E+00
64000	1.13E-09	4.07E+00	6.71E-10	2.42E+00	9.85E-10	3.55E+00
65000	1.13E-09	4.07E+00	6.52E-10	2.35E+00	1.08E-09	3.89E+00
66000	1.19E-09	4.28E+00	6.42E-10	2.31E+00	1.03E-09	3.71E+00
67000	1.16E-09	4.18E+00	5.95E-10	2.14E+00	1.06E-09	3.82E+00
68000	1.30E-09	4.68E+00	8.15E-10	2.93E+00	1.27E-09	4.57E+00
69000	1.08E-09	3.89E+00	5.90E-10	2.12E+00	1.07E-09	3.85E+00
70000	1.05E-09	3.78E+00	6.48E-10	2.33E+00	9.50E-10	3.42E+00
71000	1.14E-09	4.10E+00	6.87E-10	2.47E+00	1.19E-09	4.28E+00
72000	1.13E-09	4.07E+00	5.54E-10	1.99E+00	1.08E-09	3.89E+00
73000	1.09E-09	3.92E+00	6.19E-10	2.23E+00	1.10E-09	3.96E+00
74000	1.15E-09	4.14E+00	6.35E-10	2.29E+00	1.20E-09	4.32E+00

75000	1.33E-09	4.79E+00	6.87E-10	2.47E+00	1.30E-09	4.68E+00
76000	1.03E-09	3.71E+00	7.30E-10	2.63E+00	1.28E-09	4.61E+00
77000	1.28E-09	4.61E+00	7.72E-10	2.78E+00	1.01E-09	3.64E+00
78000	1.08E-09	3.89E+00	6.91E-10	2.49E+00	1.16E-09	4.18E+00
79000	1.31E-09	4.72E+00	5.98E-10	2.15E+00	1.13E-09	4.07E+00
80000	1.25E-09	4.50E+00	7.05E-10	2.54E+00	1.23E-09	4.43E+00
81000	1.21E-09	4.36E+00	6.16E-10	2.22E+00	1.14E-09	4.10E+00
82000	1.15E-09	4.14E+00	6.49E-10	2.34E+00	1.15E-09	4.14E+00
83000	1.05E-09	3.78E+00	6.05E-10	2.18E+00	1.17E-09	4.21E+00
84000	1.03E-09	3.71E+00	6.16E-10	2.22E+00	1.10E-09	3.96E+00
85000	1.04E-09	3.74E+00	7.40E-10	2.66E+00	1.00E-09	3.60E+00

Πίνακας 4: Ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης (σε Gr/s και σε $\mu\text{Gr/h}$), όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA/DYASTIMA-R, για τα έτη 2008, 2014 και 2019.

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT DOSE RATE 2008 (Sv/sec)	EQUIVALENT DOSE RATE 2008 ($\mu\text{Sv/h}$)	EQUIVALENT DOSE RATE 2014 (Sv/sec)	EQUIVALENT DOSE RATE 2014 ($\mu\text{Sv/h}$)	EQUIVALENT DOSE RATE 2019 (Sv/sec)	EQUIVALENT DOSE RATE 2019 ($\mu\text{Sv/h}$)
0	2.00E-12	7.20E-03	2.19E-12	7.88E-03	2.27E-12	8.17E-03
1000	9.92E-12	3.57E-02	1.06E-11	3.82E-02	1.28E-11	4.61E-02
2000	3.83E-11	1.38E-01	1.80E-11	6.48E-02	6.37E-11	2.29E-01
3000	5.78E-11	2.08E-01	3.42E-11	1.23E-01	2.42E-11	8.71E-02
4000	9.17E-11	3.30E-01	1.30E-10	4.68E-01	9.00E-11	3.24E-01
5000	2.08E-10	7.49E-01	1.85E-10	6.66E-01	1.50E-10	5.40E-01
6000	3.20E-10	1.15E+00	1.85E-10	6.66E-01	2.52E-10	9.07E-01
7000	4.58E-10	1.65E+00	3.92E-10	1.41E+00	5.47E-10	1.97E+00
8000	5.82E-10	2.10E+00	4.99E-10	1.80E+00	7.52E-10	2.71E+00
9000	9.85E-10	3.55E+00	6.55E-10	2.36E+00	8.27E-10	2.98E+00
10000	1.12E-09	4.03E+00	8.36E-10	3.01E+00	1.28E-09	4.61E+00
11000	1.52E-09	5.47E+00	1.33E-09	4.79E+00	1.51E-09	5.44E+00
12000	1.93E-09	6.95E+00	1.41E-09	5.08E+00	1.63E-09	5.87E+00
13000	2.14E-09	7.70E+00	1.78E-09	6.41E+00	2.28E-09	8.21E+00
14000	2.51E-09	9.04E+00	1.81E-09	6.52E+00	2.14E-09	7.70E+00
15000	2.70E-09	9.72E+00	2.20E-09	7.92E+00	2.72E-09	9.79E+00
16000	2.90E-09	1.04E+01	2.38E-09	8.57E+00	2.79E-09	1.00E+01
17000	3.33E-09	1.20E+01	2.30E-09	8.28E+00	2.70E-09	9.72E+00
18000	3.33E-09	1.20E+01	2.64E-09	9.50E+00	3.26E-09	1.17E+01
19000	3.62E-09	1.30E+01	2.78E-09	1.00E+01	3.37E-09	1.21E+01
20000	4.27E-09	1.54E+01	3.14E-09	1.13E+01	3.55E-09	1.28E+01

21000	4.05E-09	1.46E+01	2.66E-09	9.58E+00	3.86E-09	1.39E+01
22000	4.15E-09	1.49E+01	3.03E-09	1.09E+01	4.85E-09	1.75E+01
23000	4.04E-09	1.45E+01	3.37E-09	1.21E+01	4.16E-09	1.50E+01
24000	4.47E-09	1.61E+01	3.25E-09	1.17E+01	4.74E-09	1.71E+01
25000	4.92E-09	1.77E+01	3.70E-09	1.33E+01	4.31E-09	1.55E+01
26000	4.96E-09	1.79E+01	3.31E-09	1.19E+01	5.91E-09	2.13E+01
27000	5.26E-09	1.89E+01	3.54E-09	1.27E+01	4.68E-09	1.68E+01
28000	5.20E-09	1.87E+01	4.10E-09	1.48E+01	5.47E-09	1.97E+01
29000	5.23E-09	1.88E+01	3.41E-09	1.23E+01	7.43E-09	2.67E+01
30000	6.62E-09	2.38E+01	4.45E-09	1.60E+01	6.40E-09	2.30E+01
31000	6.12E-09	2.20E+01	3.79E-09	1.36E+01	5.55E-09	2.00E+01
32000	6.27E-09	2.26E+01	4.48E-09	1.61E+01	5.86E-09	2.11E+01
33000	6.65E-09	2.39E+01	5.76E-09	2.07E+01	5.66E-09	2.04E+01
34000	7.80E-09	2.81E+01	4.63E-09	1.67E+01	6.25E-09	2.25E+01
35000	7.10E-09	2.56E+01	3.68E-09	1.32E+01	6.65E-09	2.39E+01
36000	9.00E-09	3.24E+01	5.27E-09	1.90E+01	5.15E-09	1.85E+01
37000	8.52E-09	3.07E+01	4.15E-09	1.49E+01	6.23E-09	2.24E+01
38000	1.20E-08	4.32E+01	4.54E-09	1.63E+01	6.27E-09	2.26E+01
39000	7.15E-09	2.57E+01	5.90E-09	2.12E+01	5.53E-09	1.99E+01
40000	6.79E-09	2.44E+01	4.07E-09	1.47E+01	8.52E-09	3.07E+01
41000	8.40E-09	3.02E+01	5.42E-09	1.95E+01	6.61E-09	2.38E+01
42000	8.97E-09	3.23E+01	4.64E-09	1.67E+01	7.82E-09	2.82E+01
43000	9.22E-09	3.32E+01	5.23E-09	1.88E+01	8.95E-09	3.22E+01
44000	6.50E-09	2.34E+01	6.57E-09	2.37E+01	7.82E-09	2.82E+01
45000	9.05E-09	3.26E+01	5.29E-09	1.90E+01	6.75E-09	2.43E+01
46000	8.46E-09	3.05E+01	5.59E-09	2.01E+01	7.25E-09	2.61E+01
47000	6.90E-09	2.48E+01	5.78E-09	2.08E+01	1.16E-08	4.18E+01
48000	8.09E-09	2.91E+01	5.98E-09	2.15E+01	1.01E-08	3.64E+01
49000	8.31E-09	2.99E+01	7.10E-09	2.56E+01	9.21E-09	3.32E+01
50000	1.22E-08	4.39E+01	6.80E-09	2.45E+01	1.05E-08	3.78E+01
51000	7.09E-09	2.55E+01	6.61E-09	2.38E+01	1.06E-08	3.82E+01
52000	7.95E-09	2.86E+01	6.34E-09	2.28E+01	1.28E-08	4.61E+01
53000	7.41E-09	2.67E+01	7.46E-09	2.69E+01	8.75E-09	3.15E+01
54000	9.68E-09	3.48E+01	5.47E-09	1.97E+01	8.46E-09	3.05E+01
55000	1.05E-08	3.78E+01	4.70E-09	1.69E+01	8.53E-09	3.07E+01
56000	1.13E-08	4.07E+01	5.19E-09	1.87E+01	9.03E-09	3.25E+01
57000	7.61E-09	2.74E+01	4.68E-09	1.68E+01	8.38E-09	3.02E+01
58000	8.73E-09	3.14E+01	5.03E-09	1.81E+01	8.67E-09	3.12E+01
59000	8.61E-09	3.10E+01	6.73E-09	2.42E+01	1.10E-08	3.96E+01
60000	8.45E-09	3.04E+01	5.97E-09	2.15E+01	7.00E-09	2.52E+01
61000	9.51E-09	3.42E+01	5.58E-09	2.01E+01	7.82E-09	2.82E+01
62000	1.01E-08	3.64E+01	7.60E-09	2.74E+01	7.32E-09	2.64E+01
63000	8.03E-09	2.89E+01	5.72E-09	2.06E+01	7.72E-09	2.78E+01
64000	8.98E-09	3.23E+01	6.15E-09	2.21E+01	9.16E-09	3.30E+01

65000	1.05E-08	3.78E+01	5.64E-09	2.03E+01	8.37E-09	3.01E+01
66000	1.05E-08	3.78E+01	6.16E-09	2.22E+01	8.42E-09	3.03E+01
67000	9.18E-09	3.30E+01	3.59E-09	1.29E+01	9.19E-09	3.31E+01
68000	1.22E-08	4.39E+01	6.97E-09	2.51E+01	1.30E-08	4.68E+01
69000	8.32E-09	3.00E+01	3.95E-09	1.42E+01	9.10E-09	3.28E+01
70000	8.36E-09	3.01E+01	5.10E-09	1.84E+01	6.79E-09	2.44E+01
71000	9.45E-09	3.40E+01	5.89E-09	2.12E+01	1.07E-08	3.85E+01
72000	8.21E-09	2.96E+01	3.81E-09	1.37E+01	8.91E-09	3.21E+01
73000	8.66E-09	3.12E+01	4.50E-09	1.62E+01	1.04E-08	3.74E+01
74000	9.78E-09	3.52E+01	5.32E-09	1.92E+01	1.11E-08	4.00E+01
75000	1.30E-08	4.68E+01	5.91E-09	2.13E+01	1.27E-08	4.57E+01
76000	7.56E-09	2.72E+01	6.89E-09	2.48E+01	1.34E-08	4.82E+01
77000	1.18E-08	4.25E+01	7.29E-09	2.62E+01	6.34E-09	2.28E+01
78000	9.29E-09	3.34E+01	6.21E-09	2.24E+01	1.07E-08	3.85E+01
79000	1.18E-08	4.25E+01	5.16E-09	1.86E+01	1.22E-08	4.39E+01
80000	1.04E-08	3.74E+01	5.81E-09	2.09E+01	1.16E-08	4.18E+01
81000	9.66E-09	3.48E+01	4.42E-09	1.59E+01	9.81E-09	3.53E+01
82000	9.72E-09	3.50E+01	4.65E-09	1.67E+01	1.09E-08	3.92E+01
83000	8.32E-09	3.00E+01	4.36E-09	1.57E+01	1.11E-08	4.00E+01
84000	7.63E-09	2.75E+01	4.20E-09	1.51E+01	9.63E-09	3.47E+01
85000	7.16E-09	2.58E+01	6.46E-09	2.33E+01	7.34E-09	2.64E+01

Πίνακας 5: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης (σε Sv/s και σε $\mu\text{Sv/h}$), όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA/DYASTIMA-R, για τα έτη 2008, 2014 και 2019.

Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας ($\mu\text{Gy/h}$) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 6,7 και 8:

ALTITUDE (m)	RADIATION DOSE ($\mu\text{Gy/h}$)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	7.20E-03	3.49E-04	5.76E-04	2.12E-03	3.67E-03	5.00E-04	1.81E-09	-
1000	2.13E-02	7.70E-04	5.29E-03	7.49E-04	7.99E-03	5.11E-03	8.46E-04	5.36E-04
2000	4.46E-02	3.33E-03	5.29E-03	2.19E-03	8.71E-03	1.02E-02	1.12E-02	3.59E-03
3000	6.37E-02	6.55E-03	8.21E-03	8.06E-03	7.34E-03	1.22E-02	9.79E-03	1.08E-02

4000	1.15E-01	6.41E-03	2.42E-02	1.16E-02	1.19E-02	1.64E-02	2.13E-02	2.27E-02
5000	2.45E-01	2.08E-02	3.74E-02	1.87E-02	1.95E-02	2.30E-02	7.02E-02	5.51E-02
6000	3.34E-01	2.99E-02	6.19E-02	2.84E-02	2.38E-02	2.19E-02	7.63E-02	7.78E-02
7000	5.04E-01	5.58E-02	1.04E-01	5.98E-02	4.39E-02	3.01E-02	9.94E-02	1.06E-01
8000	7.20E-01	9.50E-02	1.53E-01	7.34E-02	4.36E-02	3.96E-02	1.47E-01	1.67E-01
9000	1.13E+00	1.30E-01	2.37E-01	1.12E-01	4.32E-02	4.75E-02	2.90E-01	2.73E-01
10000	1.36E+00	1.77E-01	2.87E-01	1.44E-01	5.40E-02	5.22E-02	2.73E-01	3.60E-01
11000	1.88E+00	2.16E-01	4.00E-01	1.66E-01	6.30E-02	5.44E-02	3.46E-01	6.34E-01
12000	2.26E+00	2.74E-01	4.64E-01	1.80E-01	8.03E-02	6.34E-02	4.18E-01	7.49E-01
13000	2.50E+00	3.39E-01	5.33E-01	2.17E-01	7.49E-02	6.55E-02	4.43E-01	8.17E-01
14000	3.09E+00	3.89E-01	6.05E-01	2.36E-01	9.04E-02	5.87E-02	6.26E-01	1.05E+00
15000	3.33E+00	4.14E-01	6.23E-01	2.66E-01	9.36E-02	8.42E-02	5.72E-01	1.25E+00
16000	3.64E+00	4.21E-01	6.66E-01	2.65E-01	9.29E-02	6.05E-02	5.47E-01	1.53E+00
17000	3.96E+00	4.72E-01	6.70E-01	2.48E-01	8.42E-02	7.24E-02	7.67E-01	1.57E+00
18000	4.07E+00	4.39E-01	6.70E-01	2.85E-01	8.86E-02	6.62E-02	5.98E-01	1.86E+00
19000	4.07E+00	4.21E-01	6.08E-01	2.26E-01	7.88E-02	5.80E-02	5.98E-01	1.99E+00
20000	4.21E+00	4.28E-01	5.83E-01	2.13E-01	7.49E-02	6.73E-02	5.98E-01	1.99E+00
21000	4.28E+00	3.78E-01	5.47E-01	2.02E-01	7.49E-02	5.58E-02	5.51E-01	2.25E+00
22000	4.28E+00	3.40E-01	4.97E-01	1.77E-01	5.47E-02	4.39E-02	6.48E-01	2.28E+00
23000	4.28E+00	3.57E-01	4.86E-01	1.95E-01	7.70E-02	3.45E-02	6.34E-01	2.25E+00
24000	4.21E+00	3.34E-01	3.74E-01	1.61E-01	6.66E-02	3.22E-02	6.37E-01	2.32E+00
25000	4.39E+00	3.01E-01	4.21E-01	1.62E-01	5.26E-02	3.09E-02	5.51E-01	2.46E+00

Πίνακας 6: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e⁻, ποζιτρόνιο e⁺, πρωτόνιο, νετρόνιο, μόνιο, αντιμόνιο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE DE (m)	RADIATION DOSE (μGy/h)	alpha	deuteron	pi+	pi-	kaon+	He-3	anti_proton	triton	anti_neutron
0	7.20E-03									
1000	2.13E-02									
2000	4.46E-02									
3000	6.37E-02			7.74 E-04						
4000	1.15E-01				3.51 E-04					
5000	2.45E-01				3.67 E-04					
6000	3.34E-01		1.45E-02							
7000	5.04E-01		5.69E-03		5.58 E-04					
8000	7.20E-01			1.46 E-03	4.79 E-04					
9000	1.13E+00		2.13E-10	9.61 E-04	4.97 E-04					
10000	1.36E+00		8.82E-03	6.37 E-04	8.50 E-04					
11000	1.88E+00		1.94E-03	4.07 E-04	3.45 E-04	3.96 E-04				
12000	2.26E+00		3.89E-03	1.07 E-03	4.54 E-04		2.73 E-02			
13000	2.50E+00		7.81E-03		1.16 E-03			5.04E-04		
14000	3.09E+00	2.54 E-03	2.43E-02	3.12 E-03	6.37 E-04		1.93 E-03	5.54E-04		
15000	3.33E+00	1.16 E-02	1.16E-02	1.01 E-03	9.22 E-04				1.03 E-05	
16000	3.64E+00	2.06 E-02	1.72E-02	1.49 E-03	8.42 E-04		2.50 E-03	4.93E-04	7.13 E-04	3.92E-03
17000	3.96E+00	2.02 E-02	4.50E-02	4.07 E-03	9.00 E-04				1.24 E-02	
18000	4.07E+00	2.66 E-02	3.47E-02	1.93 E-03	4.32 E-04		1.96 E-03		8.46 E-03	
19000	4.07E+00	7.20 E-02	1.77E-02	4.93 E-03	1.01 E-03			5.26E-04	3.12 E-03	
20000	4.21E+00	1.72 E-01	4.18E-02	4.72 E-04	2.65 E-03		7.06 E-03		2.02 E-03	
21000	4.28E+00	1.41 E-01	3.50E-02	1.44 E-03	5.11 E-04		1.61 E-02		2.40 E-02	
22000	4.28E+00	1.57 E-01	3.67E-02	2.43 E-06			1.16 E-02	1.62E-03	7.45 E-03	
23000	4.28E+00	1.66 E-01	4.54E-02		1.46 E-03		1.79 E-02		4.32 E-03	
24000	4.21E+00	2.02 E-01	4.03E-02	1.09 E-03			3.71 E-02		1.65 E-03	
25000	4.39E+00	2.87 E-01	6.12E-02	3.31 E-03	4.82 E-04		2.80 E-02		3.37 E-03	

Πίνακας 7: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πόνιο, αντιπόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντνετρόνιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE (m)	RADIATION DOSE 2008 (μGy/h)	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	B ₁₀	B ₁₁	N ₁₅
0	7.20E-03						
1000	2.13E-02						
2000	4.46E-02						
3000	6.37E-02						
4000	1.15E-01						
5000	2.45E-01						
6000	3.34E-01						
7000	5.04E-01						
8000	7.20E-01						
9000	1.13E+00						
10000	1.36E+00						
11000	1.88E+00						
12000	2.26E+00						
13000	2.50E+00						
14000	3.09E+00						
15000	3.33E+00						
16000	3.64E+00						
17000	3.96E+00						
18000	4.07E+00						
19000	4.07E+00						
20000	4.21E+00	2.64E-02	8.50E-08				
21000	4.28E+00						
22000	4.28E+00				1.88E-02	1.91E-03	
23000	4.28E+00						
24000	4.21E+00						
25000	4.39E+00		3.36E-02				1.27E-03

Πίνακας 8: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα ισότοπα ¹¹C, ¹²C, ¹³C, ¹⁰B και ¹¹B, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο

DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)$ κοσμικής ακτινοβολίας ($\mu\text{Sv/h}$) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 9,10 και 11:

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT_D OSE ($\mu\text{Sv/h}$)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	7.20E-03	3.49E-04	5.76E-04	2.12E-03	3.67E-03	5.00E-04	5.15E-09	
1000	3.57E-02	7.70E-04	5.29E-03	7.49E-04	7.99E-03	5.11E-03	1.47E-02	1.07E-03
2000	1.38E-01	3.33E-03	5.29E-03	2.19E-03	8.71E-03	1.02E-02	1.01E-01	7.16E-03
3000	2.08E-01	6.55E-03	8.21E-03	8.06E-03	7.34E-03	1.22E-02	1.43E-01	2.16E-02
4000	3.30E-01	6.41E-03	2.42E-02	1.16E-02	1.19E-02	1.64E-02	2.13E-01	4.54E-02
5000	7.49E-01	2.08E-02	3.74E-02	1.87E-02	1.95E-02	2.30E-02	5.18E-01	1.10E-01
6000	1.15E+00	2.99E-02	6.19E-02	2.84E-02	2.38E-02	2.19E-02	8.14E-01	1.56E-01
7000	1.65E+00	5.58E-02	1.04E-01	5.98E-02	4.39E-02	3.01E-02	1.14E+00	2.12E-01
8000	2.10E+00	9.50E-02	1.53E-01	7.34E-02	4.36E-02	3.96E-02	1.35E+00	3.34E-01
9000	3.55E+00	1.30E-01	2.37E-01	1.12E-01	4.32E-02	4.75E-02	2.43E+00	5.47E-01
10000	4.03E+00	1.77E-01	2.87E-01	1.44E-01	5.40E-02	5.22E-02	2.57E+00	7.24E-01
11000	5.47E+00	2.16E-01	4.00E-01	1.66E-01	6.30E-02	5.44E-02	3.31E+00	1.26E+00
12000	6.95E+00	2.74E-01	4.64E-01	1.80E-01	8.03E-02	6.34E-02	4.32E+00	1.50E+00
13000	7.70E+00	3.39E-01	5.33E-01	2.17E-01	7.49E-02	6.55E-02	4.82E+00	1.64E+00
14000	9.04E+00	3.89E-01	6.05E-01	2.36E-01	9.04E-02	5.87E-02	5.47E+00	2.11E+00
15000	9.72E+00	4.14E-01	6.23E-01	2.66E-01	9.36E-02	8.42E-02	5.51E+00	2.49E+00
16000	1.04E+01	4.21E-01	6.66E-01	2.65E-01	9.29E-02	6.05E-02	5.44E+00	3.06E+00
17000	1.20E+01	4.72E-01	6.70E-01	2.48E-01	8.42E-02	7.24E-02	6.84E+00	3.15E+00
18000	1.20E+01	4.39E-01	6.70E-01	2.85E-01	8.86E-02	6.62E-02	6.12E+00	3.71E+00
19000	1.30E+01	4.21E-01	6.08E-01	2.26E-01	7.88E-02	5.80E-02	6.19E+00	4.00E+00

			E-01	-01	E-02	E-02	00	00
20000	1.54E+01	4.28E-01	5.83 E-01	2.13E -01	7.49 E-02	6.73 E-02	6.01E+ 00	4.00E+ 00
21000	1.46E+01	3.78E-01	5.47 E-01	2.02E -01	7.49 E-02	5.58 E-02	5.94E+ 00	4.50E+ 00
22000	1.49E+01	3.40E-01	4.97 E-01	1.77E -01	5.47 E-02	4.39 E-02	5.65E+ 00	4.54E+ 00
23000	1.45E+01	3.57E-01	4.86 E-01	1.95E -01	7.70 E-02	3.45 E-02	5.51E+ 00	4.50E+ 00
24000	1.61E+01	3.34E-01	3.74 E-01	1.61E -01	6.66 E-02	3.22 E-02	6.37E+ 00	4.64E+ 00
25000	1.77E+01	3.01E-01	4.21 E-01	1.62E -01	5.26 E-02	3.09 E-02	5.29E+ 00	4.93E+ 00

Πίνακας 9: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e⁻, ποζιτρόνιο e⁺, πρωτόνιο, νετρόνιο, μόνιο, αντιμόνιο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITU DE (m)	EQUIVEL ENT DOSE (μSv/h)	alpha	deuter on	pi+	pi-	kao n+	He3	anti_pro ton	trito n	anti_neut ron
0	7.20E-03									
1000	3.57E-02									
2000	1.38E-01									
3000	2.08E-01			1.54 E-03						
4000	3.30E-01				7.02 E-04					
5000	7.49E-01				7.34 E-04					
6000	1.15E+00		1.45E- 02							
7000	1.65E+00		5.69E- 03		1.12 E-03					
8000	2.10E+00			2.92 E-03	9.54 E-04					
9000	3.55E+00		2.13E- 10	1.92 E-03	9.94 E-04					
10000	4.03E+00		8.82E- 03	1.27 E-03	1.70 E-03					
11000	5.47E+00		1.94E- 03	8.10 E-04	6.91 E-04	3.96 E-04				
12000	6.95E+00		3.89E- 03	2.13 E-03	9.07 E-04		2.73 E-02			
13000	7.70E+00		7.81E- 03		2.31 E-03			1.00E-03		

14000	9.04E+00	5.08E-02	2.43E-02	6.26E-03	1.28E-03		1.93E-03	1.11E-03		
15000	9.72E+00	2.31E-01	1.16E-02	2.02E-03	1.84E-03				1.03E-05	
16000	1.04E+01	4.10E-01	1.72E-02	2.97E-03	1.68E-03		2.50E-03	9.83E-04	7.13E-04	1.09E-02
17000	1.20E+01	4.03E-01	4.50E-02	8.14E-03	1.80E-03				1.24E-02	
18000	1.20E+01	5.33E-01	3.47E-02	3.85E-03	8.68E-04		1.96E-03		8.46E-03	
19000	1.30E+01	1.44E+00	1.77E-02	9.86E-03	2.02E-03			1.05E-03	3.12E-03	
20000	1.54E+01	3.43E+00	4.18E-02	9.43E-04	5.29E-03		7.06E-03		2.02E-03	
21000	1.46E+01	2.82E+00	3.50E-02	2.88E-03	1.02E-03		1.61E-02		2.40E-02	
22000	1.49E+01	3.15E+00	3.67E-02	4.86E-06			1.16E-02	3.23E-03	7.45E-03	
23000	1.45E+01	3.32E+00	4.54E-02		2.93E-03		1.79E-02		4.32E-03	
24000	1.61E+01	4.03E+00	4.03E-02	2.18E-03			3.71E-02			
25000	1.77E+01	5.72E+00	6.12E-02	6.62E-03	9.65E-04		2.80E-02		3.37E-03	

Πίνακας 10: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πιόνιο, αντιπιόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντιστρώγιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE(m)	EQUIVALENT_DOS E (μSv/h)	¹¹ C	¹² C	¹⁰ B	¹¹ B
0	7.20E-03				
1000	3.57E-02				
2000	1.38E-01				
3000	2.08E-01				
4000	3.30E-01				
5000	7.49E-01				
6000	1.15E+00				
7000	1.65E+00				
8000	2.10E+00				
9000	3.55E+00				
10000	4.03E+00				
11000	5.47E+00				
12000	6.95E+00				

13000	7.70E+00				
14000	9.04E+00				
15000	9.72E+00				
16000	1.04E+01				
17000	1.20E+01				
18000	1.20E+01				
19000	1.30E+01				
20000	1.54E+01	5.26E-01	1.70E-06		
21000	1.46E+01				
22000	1.49E+01			3.74E-01	3.82E-02
23000	1.45E+01				
24000	1.61E+01				
25000	1.77E+01		6.73E-01		

Πίνακας 11: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα ισότοπα ^{11}C , ^{12}C , ^{10}B και ^{11}B , όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2008 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 12,13 και 14:

ALTITUDE (m)	RADIATION DOSE (μGr/h)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	7.88E-03	4.25E-04			7.45E-03		2.11E-06	
1000	2.87E-02	2.74E-03	4.21E-03	5.94E-04	7.49E-03	6.48E-03	2.25E-04	6.98E-03
2000	3.71E-02	9.65E-04	6.34E-03	4.21E-03	1.17E-02	6.52E-03	2.55E-03	4.72E-03
3000	5.47E-02	6.08E-03	1.00E-02	2.89E-03	8.78E-03	8.64E-03	9.65E-03	8.68E-03
4000	1.39E-01	1.56E-02	2.47E-02	1.57E-02	1.43E-02	1.10E-02	4.03E-02	1.74E-02
5000	2.01E-01	1.52E-02	4.07E-02	2.04E-02	2.17E-02	1.83E-02	6.08E-02	2.44E-02
6000	2.87E-01	2.78E-02	6.08E-02	2.09E-02	2.51E-02	1.97E-02	1.94E-02	1.14E-01
7000	4.75E-01	6.16E-02	1.03E-01	4.79E-02	3.32E-02	3.06E-02	1.09E-01	8.82E-02

8000	6.37E-01	8.10E-02	1.48E-01	7.56E-02	3.78E-02	3.06E-02	1.23E-01	1.40E-01
9000	8.75E-01	1.10E-01	2.12E-01	8.10E-02	4.82E-02	4.25E-02	1.44E-01	2.38E-01
10000	1.13E+00	1.58E-01	2.66E-01	1.26E-01	4.75E-02	4.28E-02	1.62E-01	3.21E-01
11000	1.61E+00	2.19E-01	3.34E-01	1.58E-01	5.51E-02	4.82E-02	3.43E-01	4.46E-01
12000	1.82E+00	2.59E-01	4.07E-01	1.59E-01	7.09E-02	5.36E-02	2.69E-01	5.90E-01
13000	2.35E+00	3.31E-01	4.72E-01	1.84E-01	7.56E-02	6.52E-02	3.59E-01	8.46E-01
14000	2.29E+00	3.32E-01	4.86E-01	2.00E-01	7.45E-02	6.88E-02	3.47E-01	7.78E-01
15000	2.80E+00	3.71E-01	5.58E-01	2.12E-01	9.14E-02	5.65E-02	5.33E-01	9.50E-01
16000	2.97E+00	3.67E-01	5.22E-01	2.04E-01	8.10E-02	5.47E-02	5.08E-01	1.19E+00
17000	2.84E+00	3.64E-01	5.04E-01	2.02E-01	7.81E-02	6.23E-02	4.54E-01	1.13E+00
18000	3.09E+00	3.92E-01	5.26E-01	1.98E-01	7.60E-02	4.82E-02	5.47E-01	1.22E+00
19000	3.14E+00	3.48E-01	5.08E-01	2.16E-01	8.68E-02	6.44E-02	5.15E-01	1.34E+00
20000	3.23E+00	3.45E-01	4.64E-01	1.84E-01	6.34E-02	6.01E-02	4.90E-01	1.45E+00
21000	3.05E+00	3.27E-01	4.54E-01	1.69E-01	5.29E-02	4.28E-02	3.56E-01	1.50E+00
22000	3.07E+00	2.91E-01	4.10E-01	1.67E-01	6.30E-02	4.36E-02	4.32E-01	1.47E+00
23000	3.29E+00	2.83E-01	3.60E-01	1.60E-01	5.00E-02	4.32E-02	4.28E-01	1.74E+00
24000	3.00E+00	2.60E-01	3.52E-01	1.30E-01	4.82E-02	2.25E-02	4.03E-01	1.49E+00
25000	3.13E+00	2.36E-01	3.34E-01	1.31E-01	2.67E-02	3.60E-02	3.71E-01	1.67E+00

Πίνακας 12: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e⁻, ποζιτρόνιο e⁺, πρωτόνιο, νετρόνιο, μόνιο, αντιμόνιο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE (m)	RADIATION_DOSE (μGy/h)	alpha	deuteron	pi+	pi-	kao n+	He3	anti_proton	triton	anti_neutron
0	7.88E-03									
1000	2.87E-02									
2000	3.71E-02									

3000	5.47E-02									
4000	1.39E-01									
5000	2.01E-01									
6000	2.87E-01									
7000	4.75E-01			6.05 E-04						
8000	6.37E-01				4.61 E-04					
9000	8.75E-01									
10000	1.13E+00		2.94E- 03	1.20 E-03	4.72 E-04					
11000	1.61E+00		6.55E- 03							
12000	1.82E+00		2.80E- 03	3.89 E-04	1.50 E-03		4.46 E-03			
13000	2.35E+00	9.76 E-03	4.18E- 03	2.31 E-03				3.96E-04		
14000	2.29E+00		3.89E- 03	8.68 E-04	4.61 E-04					
15000	2.80E+00	1.56 E-02	1.00E- 02	4.75 E-04	9.11 E-04		4.43 E-03			2.75E-03
16000	2.97E+00	1.39 E-02	2.29E- 02	1.23 E-03	1.43 E-03		3.67 E-03		2.19 E-03	
17000	2.84E+00	1.43 E-02	1.91E- 02	3.47 E-03	1.09 E-03		8.06 E-03	1.25E-03	4.93 E-03	
18000	3.09E+00	3.38 E-02	3.08E- 02	5.29 E-03	1.60 E-03		5.69 E-03	9.68E-04	4.82 E-04	
19000	3.14E+00	4.21 E-02	1.16E- 02	4.10 E-04	5.18 E-04		1.04 E-02	1.08E-03	1.53 E-03	
20000	3.23E+00	1.17 E-01	3.47E- 02	4.28 E-04	6.95 E-04		7.85 E-03	3.71E-04	1.88 E-03	
21000	3.05E+00	6.66 E-02	5.80E- 02	7.16 E-04	8.60 E-04		1.06 E-02		4.10 E-03	
22000	3.07E+00	1.07 E-01	3.16E- 02	1.89 E-03	7.42 E-04		3.29 E-03		2.11 E-03	
23000	3.29E+00	1.68 E-01	4.00E- 02		1.51 E-03		8.50 E-03		3.57 E-03	
24000	3.00E+00	1.80 E-01	8.86E- 02	5.90 E-04	2.37 E-03		1.61 E-02		3.19 E-03	
25000	3.13E+00	1.86 E-01	3.48E- 02	1.33 E-03	3.82 E-03		3.35 E-03		1.82 E-03	

Πίνακας 13: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πιόνιο, αντιπιόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντνετρόνιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE(m)	RADIATION DOSE (μGr/h)	¹¹ C	¹² C	¹⁰ B	¹⁶ O	⁷ Be
0	7.88E-03					
1000	2.87E-02					
2000	3.71E-02					
3000	5.47E-02					
4000	1.39E-01					
5000	2.01E-01					
6000	2.87E-01					
7000	4.75E-01					
8000	6.37E-01					
9000	8.75E-01					
10000	1.13E+00					
11000	1.61E+00					
12000	1.82E+00					
13000	2.35E+00					
14000	2.29E+00					
15000	2.80E+00					
16000	2.97E+00					
17000	2.84E+00					
18000	3.09E+00					
19000	3.14E+00				6.84E-04	
20000	3.23E+00					1.50E-02
21000	3.05E+00					
22000	3.07E+00		4.54E-02			
23000	3.29E+00					
24000	3.00E+00					
25000	3.13E+00	6.05E-02	6.98E-03	2.42E-02		

Πίνακας 14: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα ισότοπα ¹¹C, ¹²C, ¹³C, ¹⁰B, ¹⁶O και ⁷Be, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA /

DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 15,16 και 17:

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT DOSE ($\mu\text{Sv/h}$)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	7.88E-03	4.25E-04			7.45E-03		2.66E-05	
1000	3.82E-02	2.74E-03	4.21E-03	5.94E-04	7.49E-03	6.48E-03	2.74E-03	1.40E-02
2000	6.48E-02	9.65E-04	6.34E-03	4.21E-03	1.17E-02	6.52E-03	2.56E-02	9.40E-03
3000	1.23E-01	6.08E-03	1.00E-02	2.89E-03	8.78E-03	8.64E-03	6.91E-02	1.74E-02
4000	4.68E-01	1.56E-02	2.47E-02	1.57E-02	1.43E-02	1.10E-02	3.54E-01	3.48E-02
5000	6.66E-01	1.52E-02	4.07E-02	2.04E-02	2.17E-02	1.83E-02	5.00E-01	4.90E-02
6000	6.66E-01	2.78E-02	6.08E-02	2.09E-02	2.51E-02	1.97E-02	2.83E-01	2.27E-01
7000	1.41E+00	6.16E-02	1.03E-01	4.79E-02	3.32E-02	3.06E-02	9.58E-01	1.76E-01
8000	1.80E+00	8.10E-02	1.48E-01	7.56E-02	3.78E-02	3.06E-02	1.14E+00	2.79E-01
9000	2.36E+00	1.10E-01	2.12E-01	8.10E-02	4.82E-02	4.25E-02	1.39E+00	4.75E-01
10000	3.01E+00	1.58E-01	2.66E-01	1.26E-01	4.75E-02	4.28E-02	1.72E+00	6.44E-01
11000	4.79E+00	2.19E-01	3.34E-01	1.58E-01	5.51E-02	4.82E-02	3.07E+00	8.89E-01
12000	5.08E+00	2.59E-01	4.07E-01	1.59E-01	7.09E-02	5.36E-02	2.94E+00	1.18E+00
13000	6.41E+00	3.31E-01	4.72E-01	1.84E-01	7.56E-02	6.52E-02	3.37E+00	1.69E+00
14000	6.52E+00	3.32E-01	4.86E-01	2.00E-01	7.45E-02	6.88E-02	3.82E+00	1.56E+00
15000	7.92E+00	3.71E-01	5.58E-01	2.12E-01	9.14E-02	5.65E-02	4.39E+00	1.90E+00
16000	8.57E+00	3.67E-01	5.22E-01	2.04E-01	8.10E-02	5.47E-02	4.64E+00	2.38E+00
17000	8.28E+00	3.64E-01	5.04E-01	2.02E-01	7.81E-02	6.23E-02	4.50E+00	2.25E+00
18000	9.50E+00	3.92E-01	5.26E-01	1.98E-01	7.60E-02	4.82E-02	5.08E+00	2.44E+00
19000	1.00E+01	3.48E-01	5.08E-01	2.16E-01	8.68E-02	6.44E-02	5.22E+00	2.67E+00
20000	1.13E+01	3.45E-01	4.64E-01	1.84E-01	6.34E-02	6.01E-02	4.57E+00	2.90E+00
21000	9.58E+00	3.27E-01	4.54E-01	1.69E-01	5.29E-02	4.28E-02	4.10E+00	3.01E+00
22000	1.09E+01	2.91E-01	4.10E-01	1.67E-01	6.30E-02	4.36E-02	3.89E+00	2.94E+00
23000	1.21E+01	2.83E-01	3.60E-01	1.60E-01	5.00E-02	4.32E-02	4.36E+00	3.48E+00
24000	1.17E+01	2.60E-01	3.52E-01	1.30E-01	4.82E-02	2.25E-02	4.21E+00	2.97E+00
25000	1.33E+01	2.36E-01	3.34E-01	1.31E-01	2.67E-02	3.60E-02	3.60E+00	3.34E+00

Πίνακας 15: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e-, ποζιτρόνιο e+, πρωτόνιο, νετρόνιο, μόνιο, αντιμόνιο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT DOSE (μSv/h)	alpha	deuteron	pi+	pi-	kaon+	He3	anti_proton	triton	anti_neutron
0	7.88E-03									
1000	3.82E-02									
2000	6.48E-02									
3000	1.23E-01									
4000	4.68E-01									
5000	6.66E-01									
6000	6.66E-01									
7000	1.41E+00			1.21E-03						
8000	1.80E+00				9.18E-04					
9000	2.36E+00									
10000	3.01E+00		2.94E-03	2.40E-03	9.47E-04					
11000	4.79E+00		6.55E-03							
12000	5.08E+00		2.80E-03	7.74E-04	3.01E-03		4.46E-03			
13000	6.41E+00	1.95E-01	4.18E-03	4.61E-03				7.88E-04		
14000	6.52E+00		3.89E-03	1.74E-03	9.18E-04					
15000	7.92E+00	3.11E-01	1.00E-02	9.54E-04	1.82E-03		4.43E-03			7.27E-03
16000	8.57E+00	2.79E-01	2.29E-02	2.47E-03	2.85E-03		3.67E-03		2.19E-03	
17000	8.28E+00	2.85E-01	1.91E-02	6.95E-03	2.17E-03		8.06E-03	2.49E-03	4.93E-03	
18000	9.50E+00	6.77E-01	3.08E-02	1.06E-02	3.20E-03		5.69E-03	1.94E-03	4.82E-04	
19000	1.00E+01	8.46E-01	1.16E-02	8.21E-04	1.04E-03		1.04E-02	2.16E-03	1.53E-03	
20000	1.13E+01	2.34E+00	3.47E-02	8.57E-04	1.39E-03		7.85E-03	7.42E-04	1.88E-03	

21000	9.58E+00	1.33E+00	5.80E-02	1.43E-03	1.72E-03		1.06E-02		4.10E-03	
22000	1.09E+01	2.15E+00	3.16E-02	3.78E-03	1.48E-03		3.29E-03		2.11E-03	
23000	1.21E+01	3.35E+00	4.00E-02		3.03E-03		8.50E-03		3.57E-03	
24000	1.17E+01	3.60E+00	8.86E-02	1.18E-03	4.75E-03		1.61E-02		3.19E-03	
25000	1.33E+01	3.74E+00	3.48E-02	2.65E-03	7.63E-03		3.35E-03		1.82E-03	

Πίνακας 16: Ο μέσος ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πιόνιο, αντιπιόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντνετρονίο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE(m)	EQUIVELENT DOSE (μSv/h)	¹¹ C	¹² C	¹⁰ B	¹⁶ O	⁷ Be
0	7.88E-03					
1000	3.82E-02					
2000	6.48E-02					
3000	1.23E-01					
4000	4.68E-01					
5000	6.66E-01					
6000	6.66E-01					
7000	1.41E+00					
8000	1.80E+00					
9000	2.36E+00					
10000	3.01E+00					
11000	4.79E+00					
12000	5.08E+00					
13000	6.41E+00					
14000	6.52E+00					
15000	7.92E+00					
16000	8.57E+00					
17000	8.28E+00					
18000	9.50E+00					
19000	1.00E+01				1.36E-02	

20000	1.13E+01					3.01E-01
21000	9.58E+00					
22000	1.09E+01		9.11E-01			
23000	1.21E+01					
24000	1.17E+01					
25000	1.33E+01	1.21E+00	1.40E-01	4.82E-01		

Πίνακας 17: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα ισότοπα ^{11}C , ^{12}C , ^{10}B , ^{16}O και ^7Be όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2014 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 18,19 και 20:

ALTITUDE(m)	RADIATION DOSE (μGy/h)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	8.17E-03	1.64E-03	7.67E-04	9.40E-04	4.82E-03		3.41E-06	
1000	2.61E-02	3.30E-03	4.36E-03	2.56E-03	5.33E-03	6.34E-03	2.87E-03	1.33E-03
2000	7.31E-02	3.05E-03	5.11E-03	4.10E-03	1.01E-02	1.52E-02	2.91E-02	6.52E-03
3000	5.62E-02	4.72E-03	2.04E-02	1.83E-03	1.25E-02	1.00E-02	4.25E-03	2.37E-03
4000	1.25E-01	1.47E-02	1.82E-02	1.60E-02	1.90E-02	1.13E-02	1.04E-02	3.54E-02
5000	1.62E-01	2.55E-02	2.84E-02	1.52E-02	2.22E-02	1.96E-02	2.50E-02	2.61E-02
6000	3.01E-01	3.24E-02	6.44E-02	2.78E-02	2.96E-02	1.30E-02	5.08E-02	8.28E-02
7000	5.51E-01	4.57E-02	8.71E-02	4.86E-02	3.89E-02	3.59E-02	2.00E-01	9.50E-02
8000	7.45E-01	7.99E-02	1.58E-01	5.51E-02	4.90E-02	3.56E-02	2.19E-01	1.48E-01
9000	1.11E+00	1.47E-01	2.30E-01	1.07E-01	5.15E-02	4.14E-02	2.34E-01	2.96E-01
10000	1.49E+00	1.78E-01	3.01E-01	1.33E-01	7.13E-02	5.90E-02	3.48E-01	3.92E-01

11000	1.66E+00	2.15E-01	3.82E-01	1.63E-01	4.32E-02	8.14E-02	2.11E-01	5.08E-01
12000	2.04E+00	2.81E-01	4.57E-01	2.03E-01	7.24E-02	6.26E-02	3.60E-01	5.72E-01
13000	2.70E+00	3.89E-01	5.15E-01	2.26E-01	8.10E-02	6.73E-02	5.83E-01	8.17E-01
14000	2.73E+00	3.67E-01	5.44E-01	2.59E-01	9.36E-02	6.01E-02	3.89E-01	1.00E+00
15000	3.37E+00	3.54E-01	5.76E-01	2.65E-01	9.43E-02	8.39E-02	6.12E-01	1.23E+00
16000	3.51E+00	4.03E-01	6.16E-01	2.63E-01	9.47E-02	5.94E-02	6.34E-01	1.41E+00
17000	3.60E+00	4.39E-01	6.70E-01	2.30E-01	8.89E-02	5.87E-02	4.68E-01	1.58E+00
18000	3.85E+00	4.07E-01	5.94E-01	2.59E-01	7.70E-02	7.56E-02	6.23E-01	1.75E+00
19000	3.89E+00	4.46E-01	5.40E-01	2.31E-01	7.67E-02	7.09E-02	6.30E-01	1.80E+00
20000	3.92E+00	4.21E-01	5.62E-01	2.03E-01	7.81E-02	5.58E-02	5.94E-01	1.86E+00
21000	4.50E+00	3.31E-01	5.40E-01	2.20E-01	6.73E-02	5.72E-02	5.26E-01	2.56E+00
22000	4.28E+00	3.82E-01	4.93E-01	1.84E-01	7.27E-02	3.92E-02	5.58E-01	2.19E+00
23000	4.10E+00	3.78E-01	3.92E-01	1.80E-01	6.59E-02	5.26E-02	5.40E-01	2.17E+00
24000	4.14E+00	3.13E-01	4.07E-01	1.71E-01	5.00E-02	3.71E-02	3.74E-01	2.31E+00
25000	4.03E+00	2.86E-01	3.67E-01	1.28E-01	4.39E-02	4.25E-02	5.69E-01	2.29E+00

Πίνακας 18: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e-, ποζιτρόνιο e+, πρωτόνιο, νετρόνιο, μιονίο, αντιμιονίο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUD E(m)	RADIATION DOSE (μGy/h)	alp ha	deute ron	pi+	pi-	kao n+	He3	anti_pr oton	trit on	anti_neu tron
0	8.17E-03									
1000	2.61E-02									
2000	7.31E-02									
3000	5.62E-02									
4000	1.25E-01									
5000	1.62E-01									
6000	3.01E-01									
7000	5.51E-01			6.70E-						

				04						
8000	7.45E-01				7.56 E- 04					
9000	1.11E+00		4.28E -03	7.88E- 04	9.94 E- 04					
10000	1.49E+00		2.82E -03	1.31E- 03	7.31 E- 04			6.44E- 04		
11000	1.66E+00	4.61 E- 02	1.21E -02	6.73E- 04	9.54 E- 04					
12000	2.04E+00		2.13E -02	1.07E- 03					1.06 E- 02	
13000	2.70E+00	1.44 E- 02	3.39E -03	2.57E- 03	9.22 E- 04					
14000	2.73E+00		8.86E -03		1.68 E- 03					
15000	3.37E+00		9.72E -03	2.62E- 02	1.17 E- 01					
16000	3.51E+00	1.13 E- 02	9.14E -03		1.73 E- 03				7.52 E- 04	
17000	3.60E+00	2.31 E- 02	1.62E -02	1.28E- 03	1.80 E- 03		1.07 E- 02	1.57E- 03	8.17 E- 03	
18000	3.85E+00	3.92 E- 02	1.20E -02	0.00E +00	1.11 E- 03				1.32 E- 03	
19000	3.89E+00	3.50 E- 02	1.84E -02	7.13E- 04	5.04 E- 03		5.22 E- 03		5.90 E- 04	
20000	3.92E+00	6.80 E- 02	5.36E -02	1.65E- 03	8.46 E- 04		1.05 E- 02		1.08 E- 03	
21000	4.50E+00	1.26 E- 01	6.30E -02	1.52E- 03			8.17 E- 03		1.21 E- 03	
22000	4.28E+00	2.85 E- 01	2.15E -02	6.70E- 04			1.64 E- 02	8.50E- 04	5.08 E- 03	
23000	4.10E+00	1.22 E- 01	8.68E -02	1.75E- 03	6.37 E- 04		3.22 E- 03	7.24E- 04	2.86 E- 02	
24000	4.14E+00	2.06 E- 01	6.23E -02		6.62 E- 08		4.54 E- 02		2.21 E- 02	
25000	4.03E+00	2.40 E- 01	3.44E -02	8.10E- 04			1.18 E- 02		1.67 E- 02	

Πίνακας 19: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πιόνιο, αντιπιόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντνετρόνιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE(m)	RADIATION DOSE (μGy/h)	¹¹ C	¹² C	¹³ C	¹¹ B	¹² B	⁹ Be	⁶ Li	¹⁴ N
0	8.17E-03								
1000	2.61E-02								
2000	7.31E-02								
3000	5.62E-02								
4000	1.25E-01								
5000	1.62E-01								
6000	3.01E-01								
7000	5.51E-01								
8000	7.45E-01								
9000	1.11E+00								
10000	1.49E+00								
11000	1.66E+00								
12000	2.04E+00								
13000	2.70E+00								
14000	2.73E+00								
15000	3.37E+00								
16000	3.51E+00								
17000	3.60E+00								
18000	3.85E+00								
19000	3.89E+00						1.60E-02		
20000	3.92E+00								
21000	4.50E+00								
22000	4.28E+00							3.07E-02	
23000	4.10E+00	9.22E-04	4.36E-02		2.73E-02	2.56E-02			
24000	4.14E+00	4.00E-02		4.03E-02					4.79E-02
25000	4.03E+00								

Πίνακας 20: Ο μέσος ρυθμός απορροφούμενης δόσης κοσμικής ακτινοβολίας (μGy/h) για τα ισότοπα ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{11}B , ^{12}B , ^9Be , ^6Li και ^{14}N , όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $\text{H}^*(10)$ κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για κάθε σωματίδιο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα), δίνεται στους παρακάτω πίνακες 21,22 και 23:

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT DOSE (μSv/h)	e+	e-	gamma	mu+	mu-	neutron	proton
0	8.17E-03	1.64E-03	7.67E-04	9.40E-04	4.82E-03		8.57E-06	
1000	4.61E-02	3.30E-03	4.36E-03	2.56E-03	5.33E-03	6.34E-03	2.16E-02	2.66E-03
2000	2.29E-01	3.05E-03	5.11E-03	4.10E-03	1.01E-02	1.52E-02	1.79E-01	1.30E-02
3000	8.71E-02	4.72E-03	2.04E-02	1.83E-03	1.25E-02	1.00E-02	3.28E-02	4.75E-03
4000	3.24E-01	1.47E-02	1.82E-02	1.60E-02	1.90E-02	1.13E-02	1.74E-01	7.09E-02
5000	5.40E-01	2.55E-02	2.84E-02	1.52E-02	2.22E-02	1.96E-02	3.74E-01	5.22E-02
6000	9.07E-01	3.24E-02	6.44E-02	2.78E-02	2.96E-02	1.30E-02	5.76E-01	1.65E-01
7000	1.97E+00	4.57E-02	8.71E-02	4.86E-02	3.89E-02	3.59E-02	1.52E+00	1.90E-01
8000	2.71E+00	7.99E-02	1.58E-01	5.51E-02	4.90E-02	3.56E-02	2.03E+00	2.96E-01
9000	2.98E+00	1.47E-01	2.30E-01	1.07E-01	5.15E-02	4.14E-02	1.80E+00	5.94E-01
10000	4.61E+00	1.78E-01	3.01E-01	1.33E-01	7.13E-02	5.90E-02	3.08E+00	7.85E-01
11000	5.44E+00	2.15E-01	3.82E-01	1.63E-01	4.32E-02	8.14E-02	2.60E+00	1.02E+00
12000	5.87E+00	2.81E-01	4.57E-01	2.03E-01	7.24E-02	6.26E-02	3.64E+00	1.14E+00
13000	8.21E+00	3.89E-01	5.15E-01	2.26E-01	8.10E-02	6.73E-02	5.00E+00	1.63E+00
14000	7.70E+00	3.67E-01	5.44E-01	2.59E-01	9.36E-02	6.01E-02	4.36E+00	2.01E+00
15000	9.79E+00	3.54E-01	5.76E-01	2.65E-01	9.43E-02	8.39E-02	5.65E+00	2.47E+00
16000	1.00E+01	4.03E-01	6.16E-01	2.63E-01	9.47E-02	5.94E-02	5.54E+00	2.83E+00

17000	9.72E+00	4.39E-01	6.70E-01	2.30E-01	8.89E-02	5.87E-02	4.54E+00	3.16E+00
18000	1.17E+01	4.07E-01	5.94E-01	2.59E-01	7.70E-02	7.56E-02	6.01E+00	3.50E+00
19000	1.21E+01	4.46E-01	5.40E-01	2.31E-01	7.67E-02	7.09E-02	6.12E+00	3.60E+00
20000	1.28E+01	4.21E-01	5.62E-01	2.03E-01	7.81E-02	5.58E-02	6.30E+00	3.74E+00
21000	1.39E+01	3.31E-01	5.40E-01	2.20E-01	6.73E-02	5.72E-02	4.97E+00	5.11E+00
22000	1.75E+01	3.82E-01	4.93E-01	1.84E-01	7.27E-02	3.92E-02	5.58E+00	4.36E+00
23000	1.50E+01	3.78E-01	3.92E-01	1.80E-01	6.59E-02	5.26E-02	5.08E+00	4.32E+00
24000	1.71E+01	3.13E-01	4.07E-01	1.71E-01	5.00E-02	3.71E-02	4.64E+00	4.64E+00
25000	1.55E+01	2.86E-01	3.67E-01	1.28E-01	4.39E-02	4.25E-02	5.22E+00	4.57E+00

Πίνακας 21: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια ηλεκτρόνιο e⁻, ποζιτρόνιο e⁺, πρωτόνιο, νετρόνιο, μίονιο, αντιμίονιο και ακτινοβολίας γ, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUD E(m)	EQUIVELENT DOSE (μSv/h)	alpha	deuter on	pi+	pi-	kao n+	He3	anti_pr oton	trito n	anti_neu tron
0	8.17E-03									
1000	4.61E-02									
2000	2.29E-01									
3000	8.71E-02									
4000	3.24E-01									
5000	5.40E-01									
6000	9.07E-01									
7000	1.97E+00			1.34 E-03						
8000	2.71E+00				1.52 E-03					
9000	2.98E+00		4.28E -03	1.58 E-03	1.99 E-03					
10000	4.61E+00		2.82E -03	2.62 E-03	1.46 E-03			1.29E- 03		
11000	5.44E+00	9.22E- 01	1.21E -02	1.35 E-03	1.91 E-03					
12000	5.87E+00		2.13E	2.13					1.06	

			-02	E-03					E-02	
13000	8.21E+00	2.89E-01	3.39E-03	5.15E-03	1.84E-03					
14000	7.70E+00		8.86E-03		3.37E-03					
15000	9.79E+00		9.72E-03	5.26E-02	2.34E-01					
16000	1.00E+01	2.26E-01	9.14E-03		3.46E-03		1.07E-02		7.52E-04	
17000	9.72E+00	4.64E-01	1.62E-02	2.56E-03	3.60E-03			3.14E-03	8.17E-03	
18000	1.17E+01	7.85E-01	1.20E-02		2.22E-03				1.32E-03	
19000	1.21E+01	6.98E-01	1.84E-02	1.42E-03	1.01E-02		5.22E-03		5.90E-04	
20000	1.28E+01	1.36E+00	5.36E-02	3.29E-03	1.69E-03		1.05E-02		1.08E-03	
21000	1.39E+01	2.53E+00	6.30E-02	3.04E-03			8.17E-03		1.21E-03	
22000	1.75E+01	5.69E+00	2.15E-02	1.34E-03			1.64E-02	1.70E-03	5.08E-03	
23000	1.50E+01	2.44E+00	8.68E-02	3.49E-03	1.27E-03		3.22E-03	1.45E-03	2.86E-02	
24000	1.71E+01	4.10E+00	6.23E-02		1.32E-07		4.54E-02		2.21E-02	
25000	1.55E+01	4.79E+00	3.44E-02	1.62E-03			1.18E-02		1.67E-02	

Πίνακας 22: Ο μέσος ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα σωματίδια άλφα-πυρήνας Ηλίου, δευτέριο, τρίτιο, πιόνιο, αντιπιόνιο, καόνιο, ήλιο-3, αντιπρωτόνιο και αντνετρονίο, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ALTITUDE (m)	EQUIVALENT DOSE (μSv/h)	¹¹ C	¹² C	¹³ C	¹¹ B	¹² B	⁹ Be	⁶ Li	¹⁴ N
0	8.17E-03								
1000	4.61E-02								
2000	2.29E-01								
3000	8.71E-02								
4000	3.24E-01								
5000	5.40E-01								
6000	9.07E-01								
7000	1.97E+00								
8000	2.71E+00								
9000	2.98E+00								

10000	4.61E+00								
11000	5.44E+00								
12000	5.87E+00								
13000	8.21E+00								
14000	7.70E+00								
15000	9.79E+00								
16000	1.00E+01								
17000	9.72E+00								
18000	1.17E+01								
19000	1.21E+01						3.20E-01		
20000	1.28E+01								
21000	1.39E+01								
22000	1.75E+01							6.16E-01	
23000	1.50E+01	1.84E-02	8.68E-01		5.44E-01	5.11E-01			
24000	1.71E+01	8.03E-01		8.06E-01					9.61E-01
25000	1.55E+01								

Πίνακας 23: Ο μέσος ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος H*(10) κοσμικής ακτινοβολίας (μSv/h) για τα ισότοπα ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{11}B , ^{12}B , ^9Be , ^6Li και ^{14}N όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο DYASTIMA / DYASTIMA-R, για το έτος 2019 και για υψόμετρο έως 25000 μέτρων (με λαμβανόμενα αποτελέσματα ανά 1000 μέτρα).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

1. Κοσμική ακτινοβολία της Ελένης Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη
2. Ιατρική Φυσική, Γεωργίου Ε., Γιακουμάκης Ε., Δημητρίου Π., Καραϊσκος Π., Κόττου Σ., Λουίζη Α., Μαλαμίτση Ι., Παπαγιάννης Π.
3. Ξυλοπαρκιώτης, Κωνσταντίνος: «Όταν πνέει ο ηλιακός άνεμος: Η επιστημονική εξήγηση για τα φώτα του Βορρά», Περισκόπιο της Επιστήμης, τεύχος 215 (Μάρτιος 1998), σσ. 40-51
4. Δαγκλής, Ιωάννης και Syun-Ich Akasofu: «Σέλας-Alaska by night», Γεωτρόπιο, τεύχος 213, σελ. 72-75, 8 Μαΐου 2004
5. Αγγελόπουλος Α., Σακελλίου Λ., 1994, Σημειώσεις Υγειοφυσικής (Ιονίζουσες Ακτινοβολίες), Αθήνα , Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων, ΕΚΠΑ
6. United States National Academy of Sciences report: «Severe Space Weather Events–Understanding Societal and Economic Impacts Workshop Report», 2008.
7. Kappenman John, Metatech Corp., Geomagnetic storms and their impacts on the US Power Grid, study prepared for the Oak Ridge National Laboratory, Jan 2010
8. United Kingdom Royal Academy of Engineering: “Extreme Space Weather: impacts on engineered systems and infrastructure”, 2013.
9. Interpretation of Cosmic-Ray Phenomena, Bruno Rossi, Reviews of Modern Physics vol. 20, n 3, 1948.
10. B. Rossi, "High Energy Particles", Prentice Hall 1965.
11. Cosmic Rays A.M.Hillas, Pergamon Press, 1972.
12. Cosmic Rays and Particle Physics Thomas K. Gaisser Cambridge University Press
13. High Energy Cosmic Rays Todor Stanev Springer

Ιστοσελίδες:

1. [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/prs/hght.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/prs/hght.rxml)
2. https://www.seibersdorf-laboratories.at/fileadmin/uploads/intranet/dateien/folder/ld_avidos_en-web.pdf
3. <http://www.trad.fr/en/space/omere-software/>
4. <http://cosray.phys.uoa.gr/>
5. <http://www.nmdb.eu/>
6. <http://swe.ssa.esa.int/web/guest/space-radiation>
7. <https://www.sievert-system.org/>
8. www.medicalradiation.com
9. <http://www.swpc.noaa.gov/>
10. <http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>
11. <http://geant4.cern.ch/>
12. <http://avidos.seibersdorf-laboratories.at/>
13. <http://Spaceweather.com>
14. <http://cordis.europa.eu>
15. <https://www.faa.gov>
16. <https://spaceweather.com/glossary/spotlessdays.htm?PHPSESSID=dli444kmrjgre0rjq6l86fv144>
17. https://web.archive.org/web/20080714032353/https://science.nasa.gov/headlines/y2008/11jul_solarcycleupdate.htm
18. <http://users.telenet.be/j.janssens/Spotless/Spotless.html>
19. <http://www.sidc.be/silso/news004>
20. www.sidc.be/silso/datafiles
21. <https://www.meteo.gr>

Δημοσιεύσεις:

1. "Extreme Space Weather Events". National Geophysical Data Center.
2. "Radiation". The free dictionary by Farlex. Farlex, Inc. Retrieved 11 January 2014.
3. "The Electromagnetic Spectrum". Centers for Disease Control and Prevention. 7 December 2015. Retrieved 29 August 2018.
4. "Geant4-a simulation toolkit", Nucl. Inst. Meth. A 506, 250-303, 2003.
5. «Middle atmosphere». www.antarctica.gov.au. Ανακτήθηκε στις 17 Ιουνίου 2018.
6. «The Mesosphere - overview | UCAR Center for Science Education». scied.ucar.edu. Ανακτήθηκε στις 17 Ιουνίου 2018.
7. Adams, J. H. Jr, Heiblim, S. and Malott, C. Evaluation of galactic cosmic ray models, presented at IEEE Nucl Space Radiat Effects Conf, Quebec City, QC, Can, Jul 2009 (2009). Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?N=0&Ntk=All&Ntt=20090034942&Ntx=mode%20matchallpartial&Nm=123|Collection|NASA%20STI|17|Collection|NACA>
8. Agostinelli S. et al. (Geant4 collaboration), Nucl. Inst. Meth. A 506 (2003), 250-303.
9. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. (Geant4 collaboration):
10. Akkreditierungsgesetz. BGBl. Nr.: 468/1992, 430/ 1995, BGBl. I Nr. 136/2001, 85/2002, Austria (2002).
11. Al Anid, H., Lewis, B. J., Bennett, L. G. I. and Takada, M. Modelling of solar radiation exposure at high altitude during solar storms. Radiat. Prot. Dosim. 136(4), 311–316 (2009) 1093/rpd/ ncp127.

12. Allison J. et al. (Geant4 collaboration), IEEE Trans. Nuclear Sci. 53 (2006), 270-278.
13. Allison J. et al. (Geant4 collaboration), Nucl. Inst. & Meth. A 835 (2016), 186-225.
14. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. (Geant4 collaboration): "Geant4 developments and applications", IEEE Trans. Nuclear Sci. 53, 270-278, 2006.
15. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. (Geant4 collaboration): "Recent developments in Geant4", Nucl. Inst. & Meth. A 835, 186-225, 2016.
16. Ambrožová I., Brabcová K., Spurný F., Shurshakov V.A., Kartsev I.S., Tolochev R.V.: «Monitoring on Board Spacecraft by Means of Passive Detectors», 2011.
17. Axford W. I.: «The Modulation of Galactic Cosmic Rays in the Interplanetary Medium», Space Sci. 13, 115-130, 1965
18. Badhwar, G. D. The radiation environment in low-Earth orbit. Radiat. Res. 148, 3–10 (1997).
19. Barish J.R.: «In-flight Radiation Exposure During Pregnancy», 2004.
20. Barnden L. (1973): 'Forbush decreases 1966-1972: Their Solar and Inter-planetary Association and their Anisotropies', Proceedings of the 13th International Cosmic Ray Conference, Vol. 2, p. 127, Denver Colorado
21. Barnden L. (1973): 'Forbush decreases 1966-1972: Their Solar and Inter-planetary Association and their Anisotropies', Proceedings of the 13th International Cosmic Ray Conference, Vol. 2, p. 127, Denver Colorado
22. Bartels, J. (1934), "Twenty-Seven Day Recurrences in Terrestrial-Magnetic and Solar Activity, 1923-1933", Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 39 (3): 201–202a, Bibcode:1934TeMAE.39..201B, doi:10.1029/TE039i003p00201

23. Battistoni, G. et al. In: Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6–8 September 2006. Albrow, M. and Raja, R. Eds. AIP Conference Proceeding 896, 31–49 (2007).
24. Battistoni, G., Ferrari, A. and Muraro, S. Primary cosmic rays' fluxes in FLUKA. INFN Report (DOSMAX Work Contract No. 451004269) (2004).
25. Battistoni, G., Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Villari, R. Evaluation of the doses to aircrew members taking into consideration the aircraft structures. *Adv. Space Res.* 36, 1645–1652 (2005).
26. Bazilevskaya, G. A., Krainev, M. B., & Makhmutove, V. S. 2000, Effects of cosmic rays on the Earth's environment, *JASTPh* 62, 1577–1586.
27. Bazilevskaya, G.A., I.G. Usoskin, E.O. Flückiger, R.G. Harrison, L. Desorgher, et al. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. *Space Sci. Rev.*, 137, 149–173, 2008.
28. Beck, P. et al. Measurements and simulation of the radiation exposure to aircraft crew workplaces due to cosmic radiation in the atmosphere. *Radiat. Prot. Dosimetry* 126(1–4), 564–567 (2007).
29. Belov A. (2000): 'Cosmic Rays in the Heliosphere', *Solar System Research*, Vol. 34, issue 2, p.143
30. Belov A. V. and E. A. Eroshenko: 'The energy spectra and other properties of the great proton events during 22-nd solar cycle', *Adv. Space Res.* 17, 167, 1996.
31. Belov, A. V., and Struminsky A. B. (1997): 'Neutron monitor sensitivity to primary protons below 3 GeV derived from data of ground level events', *Proc. 25-th Intern. Cosmic Ray Conf.*, 1, 201-204

32. Belov, A., E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, C. Plainaki and V. Yanke (2005a): 'Solar cosmic rays during the extremely high ground level enhancement of February 23, 1956', *Anal. Geophys.* 23, 1.
33. Belov, Á., E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, C. Plainaki and V. Yanke (2005b): A study of Great Ground Level Enhancement on 23 February 1956', *Adv. Space Res.* 35, 4, 697.
34. Beringer Claus, Jonas Daniel, Gemünden Hans Georg.: « Establishing Project Portfolio Management: An Exploratory Analysis of the Influence of Internal Stakeholders' Interactions», 2012.
35. Borak Thomas B., Heilbronn Lawrence H., Townsend Lawrence W., McBetha Rafe A. Wouter de Wet: «Quality factors for space radiation: A new approach», 2014.
36. Bottolier-Depois, J. F. et al. Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation. EURADOS Annual Meeting 2009, 26–30 January 2009, Braunschweig, Germany, These proceedings.
37. Bottollier-Depois J.F., Chau Q., Bouisset P., Kerlau G., Plawinski L., Lebaron-Jacobs L. (2000) Assessing exposure to cosmic radiation during long-haul flights, *Radiat. Res.* 153,526-532.
38. Cane H. (2000): 'Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases', *Space Science Reviews*, Vol. 93, p.55
39. Cane H., Richardson I., von Rosenvinge T. (1996): 'Cosmic Ray Decreases: 1964-1994', *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, p. 21561
40. Carmichael H., IQSY Instruction Manual, vol. 7, Deep River, Canada, 1964
41. Clem J. and L. I. Dorman (2000): 'Neutron monitor response functions', *Space Sci. Rev.*, 93, 1, 335-359.

42. Clem J.M. and Dorman L.I., Neutron Monitor Response Functions, Space Science Review, vol. 93, pp. 335-359, 2000
43. Clem, J. M. et al. Contribution of obliquely incident particles to neutron monitor counting rate. J. Geophys. Res. 102(A12), 26919–26926 (1997).
44. Close F. E. The particle odyssey: a journey to the heart of the matter. Oxford University Press, Oxford; New York, new ed edition, 2002.
45. Copeland Kyle: «CARI-7A: Development and validation», 2017.
46. Copeland, K. Cosmic ray particle fluences in the atmosphere resulting from primary cosmic ray heavy ions and their resulting effects on dose rates to aircraft occupants as calculated with MCNPX 2.7.0. Doctoral Thesis, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, Canada) (2014).
47. Copeland, K. Recent and planned developments in the CARI program. Federal Aviation Administration Office of Aviation Medicine Report, DOT/FAA/AM- 13/6 (2013).
48. Copeland, K., Sauer, H. H., Duke, F. E. and Friedberg, W. Cosmic radiation exposure of aircraft occupants on simulated high-latitude flights during solar proton events from 1 January 1986 through 1 January 2008. Adv. Space Res. 42(6), 1008–1029 (2008).
49. Dorman L., (1974): ‘Cosmic Rays’, North-Holland Publishing Company, Amsterdam
50. Dorman L.I., Paschalis P., Plainaki C., Mavromichalaki H.: “Estimation of cosmic ray ionization in the Earth’s atmosphere during GLE71”, Proc. 34th ICRC 2015
51. Dr. S. Sanz Fernández de Córdoba (24 Ιουνίου 2004). «The 100 km Boundary for Astronautics». Διεθνής Αεροναυτική Ομοσπονδία. Ανακτήθηκε στις 7 Μαΐου 2014.
52. EC-contract DOSMAX (FIGM-CT-2000-00068), work package 6: «Evaluation of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew», 2000.

53. Enyinna P.: «Radiological risk assessment of cosmic radiation at aviation altitudes (a trip from Houston Intercontinental Airport to Lagos International Airport)», 2016.
54. EPA (United States Environmental Protection Agency) Air Travel and Cosmic Radiation. Johnstown Castle Estate Wexford, Y35 W821. 2015. [Last retrieved on 2016 Jan 09]. Available from: <http://www.epa.ie>.
55. EPA (United States Environmental Protection Agency) Air Travel and Cosmic Radiation. Johnstown Castle Estate Wexford, Y35 W821. 2015. [Last retrieved on 2016 Jan 09]. Available from: <http://www.epa.ie>
56. EPA (United States Environmental Protection Agency) Air Travel and Cosmic Radiation. Johnstown Castle Estate Wexford, Y35 W821. 2015. [Last retrieved on 2016 Jan 09]. Available from: <http://www.epa.ie>.
57. Ertley Camden: «Studying the polarization of Hardx-ray solar flares with the gamma ray polarimeter experiment (GRAPE)», 2007.
58. EURADOS WG 5: «Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew-Compilation of Measured and Calculated Data », Radiation Protection 140, 2004.
59. European Commission (1996) Official publication of the European Communities, L 159
60. European Community Council Directive 96/29/EURATOM. Official J. European Communities 39(L159) (1996).
61. Fasso`, A., Ferrari, A., Ranft, J. and Sala, P. R. FLUKA: a multi-particle transport code. CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
62. Ferrari, A. and Pelliccioni, M. On the conversion coefficients for cosmic ray dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 104(3), 211–220 (2003).

63. Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Rancati, T. Calculation of radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure. *Radiat. Prot. Dosimetry* 93(2), 101–114 (2001).
64. Ferrari, A., Pelliccioni, M. and Rancati, T. Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure. *Radiat. Prot. Dosimetry* 93(2), 101–114 (2001).
65. Foelsche, T., Mendell, R. B., Wilson, J. W. and Adams, R. R. Measured and calculated neutron spectra and dose equivalent rates at high altitudes; relevance to SST operations and space research. Report No. NASA TN D-7715 (Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration) (1974).
66. Forbush S. (1954): ‘World-Wide Cosmic-Ray Variations 1937-1952’, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 59, p. 525
67. Forbush S. (1958): ‘Cosmic-Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles’, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 63, p. 651
68. Frakes, S. J. Computer programs INVERSE and FORWARD (2002). Available at: http://www.ngs.noaa.gov/PC_PROD/Inv_Fwd/ (accessed June 29, 2012).
69. Gaisser, T. K. 1990, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press
70. Gaisser, T. K. et al. Primary spectrum to 1 TeV and beyond. In: *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001)*, Hamburg, Germany, 643–646, 7–15 August 2001.
71. Galata E., Ioannidou S., Papailiou M., Mavromichalaki H., Paravolidakis K., Kouremeti M., Rentifis L., Simantirakis E., Trachanas K.: «Impact of space weather on human heart rate during the years 2011–2013», 2017.
72. Garrett-Bakelman et al., *Science* 364, eaau8650 (2019)
73. Gerontidou, M. et al., *NMDB MEETING* (2019).

74. Giannaropoulou E., Papailiou M., Mavromichalaki H., Gigolashvili M., Tvildiani L., Janashia K., Preka-Papadema P. & Papadima Th.: «A study on the various types of arrhythmias in relation to the polarity reversal of the solar magnetic field», 2014.
75. Giannaropoulou E., Papailiou M., Mavromichalaki H., Gigolashvili M., Tvildiani L., Janashia K., Preka-Papadema P. and Papadima Th.: «Possible influence of the polarity reversal of the solar magnetic field on the various types of arrhythmias», 2013.
76. Gnevyshev, M.N. and Ohl, A.I., «On the 22-year cycle of solar activity», *Astron. Zh.*, 25, 18–20., 1948
77. Goldhagen, P. Private communication, July 25, 2014 (2014). Revised data for neutron spectra and total neutron fluxes measured on the ER-2 aircraft at 4 locations.
78. Grieder, P. K. F. 2001, *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elsevier Science.
79. Grieder, P.K.F. *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*, Elsevier Science B. V, The Netherlands, ISBN: 0-444-50710-8, 2001.
80. Hady Ahmed A.: «Deep solar minimum and global climate changes», 2013.
81. Hathaway D. H., «The Solar Cycle», *Living Rev. Solar Phys.*, 7, (2010), 1
82. Hatton C.J., The Neutron Monitor, in J., G. Wilson and S.A. Wouthuysen (eds.), *Progress in Elementary Particle and Cosmic-ray Physics*, vol. 10, chapter 1, North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1971
83. Hedin A. E.; *Journal of Geophysical Research* 96(A2):(1991), 1159–1172. Σύσταση ατμόσφαιρας και πρωτογενές φάσμα για $>75\chi\lambda\mu$
84. Hess W. N., Canfield E. H., and Lingenfelter R. E. Cosmic-ray neutron demography. *Journal of Geophysical Research*, 66(3): PP.665–677, 1961.

85. Houseman, J. and Fehr A.: Listening for Cosmic Rays, Scientific Report Series of Aurora Research Institute, 5, 1996. <http://www.bartol.udel.edu>
86. Huestis, D. L. Accurate evaluation of the Chapman function for atmospheric attenuation. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 69(6), 709–721 (2001) 10.1016/S0022-4073(00)00107-2.
87. ICAO, Doc 7488-CD third ed. (1993).
88. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 37(2–4), 63–68 (2007).
89. ICRP Publication 103: «Recommendations of the International Commission on Radiological Protection», 2007.
90. ICRP Publication 103: «The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection», 2007.
91. ICRP Publication 60 (1991) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 21 (1-3).
92. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 21(1–3), 79–89 (1990).
93. ICRP, Ann. ICRP 42, ICRP Publication 123 (2013).
94. ICRP, Ann. ICRP 45, ICRP Publication 123 (2016).
95. ICRP: “Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space”, ICRP Publication 123, Ann. ICRP 42, 2013.
96. ICRP: “Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation”, ICRP Publication 123, Ann. ICRP 45, 1-48, 2016.

97. ICRU, 1993b. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
98. ICRU, Journal of the ICRU 10, Report 84, Oxford University Press (2010).
99. ICRU: "Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew", Journal of the ICRU 10, Report 84, Oxford University Press, 2010.
100. International Civil Aviation Organization: "Manual of The ICAO Standard Atmosphere", Doc 7488-CD third ed., 1993.
101. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. ICRU Report 84, J. ICRU, 10(2). (Oxford, UK: Oxford University Press (2010).
102. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Stopping powers and ranges for protons and alpha particles. ICRU Report 49. (Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements, Inc (1993).
103. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51 (Bethesda, MD: ICRU Publications) (1993).
104. International Commission on Radiation Units and Measurements (October 2011). Seltzer, Stephen M. (ed.). "Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation". Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements (Revised ed.). 11 (1): 1-31. doi:10.1093/jicru/ndr012. PMID 24174259. ICRU report 85a.
105. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Pub 60 (Tarrytown, NY: Elsevier Science) (1991).

106. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Pub 103 (London, UK: Elsevier) (2007).
107. International Standards Organization Space Environment (Natural and Artificial) – Galactic Cosmic Ray Model (ISO 15930:2004) (Geneva, Switzerland: ISO) (2004).
108. ISO 15390:2004 (2004).
109. ISO 15390:2004, “Space environment (natural and artificial)-Galactic cosmic ray model”, 2004
110. ISO 2533:1975 (2007).
111. James, M. and McKinney, G. Private communications, 2012 (2012).
112. John A. Lockwood: «Forbush decreases in the cosmic radiation». 1971
113. Joint Aviation Authorities Committee. Joint Aviation Requirements, JAR-OPS 1, Commercial Air Transport. Global Engineering Documents (2007). <http://www.jaa.nl>. (last accessed 2009).
114. Krimigis stamatis M., Decker Robert B., Roelof Edmond C., Hill Matthew E., Bostrom Carl O., Dialynas Konstantinos, Gloeckler George, Hamilton Douglas C., Keath Edward P. & Lanzerotti Louis J.: «Energetic charged particle measurements from Voyager 2 at the heliopause and beyond», 2019
115. Kwan-Hoong Ng (20–22 October 2003). "Non-Ionizing Radiations – Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures" (PDF). Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN ICNIR2003 Electromagnetic Fields and Our Health.
116. Lantos P., Fuller N. (2003) History of the solar flare radiation doses on-board aeroplanes using semi-empirical model and Concorde measurements, Radiat. Prot. Dosim., to be published.

117. Lantos P., Fuller N., Bottollier-Depois J.F. (2001) Monitoring the radiation doses received by aircrews, Proceedings of ICRP 2001, pp. 4067-4070.
118. Le Caër, Sophie (2011). "Water Radiolysis: Influence of Oxide Surfaces on H₂ Production under Ionizing Radiation". *Water*. 3: 235–253. doi:10.3390/w3010235
119. Lillhoök, J. et al. A comparison of ambient dose equivalent meters and dose calculations at constant flight conditions. *Radiat. Meas.* 42, 323–333 (2007).
120. Lindborg, L. et al. Eds. Cosmic radiation exposure of aircraft crew—compilation of measured and calculated data. European Commission, Radiation Protection Issue No. 140. (2004). ISBN 92-894-8448-9. Figure 5. Graphical user interface of AVIDOS-WEB 1.0. The upper part displays flight route, lower left part is the input data panel and lower right panel shows calculation results. AVIDOS—A SOFTWARE PACKAGE FOR EUROPEAN ACCREDITED AVIATION DOSIMETRY 289
121. Liu G.S., Cook A., Richardson M., Vail D., Holsinger F.C, Oakley-Girvan I.: «Thyroid cancer risk in airline cockpit and cabin crew: a meta-analysis», 2018.
122. Lockwood J. (1971): 'Forbush Decreases in the Cosmic Radiation', *Space Science Reviews*, Vol. 12, p. 658
123. Logachev Yu.I. (Ed.), Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996, Moscow University Press, pp.248, Moscow (1998).
124. Magann Everett F, Chauhan Suneet P, Dahlke Joshua D, McKelvey Samantha S, Watson Erin M, Morrison John C: «Air Travel and Pregnancy Outcomes: A Review of Pregnancy Regulations and Outcomes for Passengers, Flight Attendants, and Aviators», 2010.
125. Mavromichalaki H., Gerontidou M., Mariatos G., Plainaki C., Papaioannou A., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Tsitomeneas S. (2005b): "Space Weather forecasting at the New Athens Center: The recent events of January 2005", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol.52, no 6, pp.2307-2312

126. Mavromichalaki H., Papageorgiou Ch., Gerontidou M.: «Solar cycle and 27-day variations of diurnal anisotropy of cosmic rays during the solar cycle 24», *Astrophysics and Space Science*, Space Science, 361, 69-77, 2016 DOI: 10.1007/s10509-016-2661-z
127. Mavromichalaki H., Papailiou M., Dimitrova S., Babayev E., Loucas P.: «Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth», 2012.
128. Mavromichalaki H., Papailiou M., Dimitrova S., Babayev E.S., Mustafa F. R.: «Geomagnetic Disturbances and Cosmic Ray Variations in Relation to Human Cardio-health State: A Wide Collaboration», 2008.
129. Mavromichalaki H., Papailiou M., Dimitrova Svetla, Babayev Elchin Safarli-ogly: «Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth», 2012.
130. Mavromichalaki H., Papaioannou A., Mariatos G., Papahliou M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. and Stassinopoulos E. G.: «Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity», *IEEE TNS* 54, 1089-1096, 2007
131. Mavromichalaki H., Plainaki C., Gerontidou M., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Mariatos G., Belov A., Eroshenko E., Klepach E. and Yanke V.: «GLEs as a Warning Tool for Radiation Effects on Electronics and Systems: A new Alert System based on Real-Time Neutron», *IEEE TNS* 54, 1083-1088, 2007
132. Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Plainaki C., Gerontidou M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.: «Space weather prediction by cosmic rays», *Adv. Space Res.* 37, 1141-1147, 2006
133. Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis Ch., Mariatos G., Papaioannou A., Belov A., Eroshenko E., and Yanke V. for the NMDB team: «Implementation of the

Ground Level Enhancement Alert Software at NMDB database», *New Astronomy*, 15, 744-748, 2010

134. Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Gerontidou M., Papaioannou A., Plainaki C., Tatsis S., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. (2005a): "The new Athens centre on data processing from the neutron monitor network in real time", *Annales Geophysicae*, 23, pp.1-8
135. Mavromichalaki, H., Belehaki, A. and Rafios X.: "Simulated effects at Neutron Monitor Energies: Evidence of the 22-year Cosmic-Ray Variation" *Astr. and Astrophys.* 330, 764, 1997.
136. Mavromichalaki, H., Marmatsouri, E. and Vassilaki, A.: "Simulation of long-term cosmic-ray intensity variations" *Solar Physics* 125, 409, 1990.
137. McMath, G. E. and McKinney, G. W. MCNP6 elevation scaling of cosmic ray backgrounds. Report LA-UR-14-21331 (Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory) (2014)
138. Mendenhall M. H. and Weller R. A.: "A probability-conserving cross-section biasing mechanism for variance reduction in Monte Carlo particle transport calculations", *Nucl. Inst. Meth. A* 667, 38-43, 2012.
139. Mertens, C. J., Meier, M. M., Brown, S., Norman, R. B. and Xu, X. NAIRAS aircraft radiation model development, dose climatology, and initial validation. *Space Weather* 11, 1–33 (2013) 10.1002/swe.20100.
140. Mewaldt, R. A. Elemental composition and energy of galactic cosmic rays. In: *Proceedings of Workshop on the Interplanetary Charged Particle Environment*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA), pp. 121–132 (1988).
141. Miroshnichenko Andrey E., Evlyukhin Andrey B., Ye Feng Yu, Bakker Reuben M., Chipouline Arkadi, Kuznetsov Arseniy I., Luk'yanchuk Boris, Chichkov Boris N. & Kivshar Yuri S.: « Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles», 2015.

142. Mukherjee B., Rybka D., Makowski D., Lipka T. and Simrock S.: «Radiation measurement in the environment of FLASH using passive dosimeters», 2007.
143. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Aeronautics and Space Administration, and United States Air Force U.S. Standard Atmosphere, 1976 (NOAA-S/T 76-1562) (Washington, DC: NOAA) (1976).
144. Neubeck C., Geniza M.J., Kaue P.M., Robinson R.J., Chrisler W.B., Sowa M.B.: «The Effect of Low Dose Ionizing Radiation on Homeostasis and Functional Integrity in an Organotypic Human Skin Model», 2015.
145. Normand E. and Baker T. J. Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux. IEEE Transactions on Nuclear Science, 40(6):1484–1490, December 1993.
146. Normand E. Single event effects in avionics. IEEE Transactions on Nuclear Science, 43(2):461–474, April 1996.
147. Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Suslov, A.A.: “Galactic cosmic ray flux simulation and prediction”, Adv. Space Res. 17, 1996.
148. O’Brien K., Friedberg W., Sauer H.H., Smart D.F. (1996) Atmospheric Cosmic Rays and Solar Energetic Particles at Aircraft Altitudes, Environ. Znr. 22(Suppl. 1), 9-44.
149. O’Brien, K. et al. World-wide radiation dosage calculations for air crew members. Adv. Space Res. 31(4), 835–840 (2003).
150. O’Brien, K. Personal Communication to Wallace Friedberg. A 1×1 Degree World Grid of interpolated Cosmic Ray Vertical Cutoff Rigidities from IGRF 1995, based on a 5×15-degree table calculated by D.F. Smart and M.A. Shea (1999).
151. O’Neill, P. M. Badhwar–O’Neill 2010 galactic cosmic ray flux model—revised. IEEE Trans. Nucl. Sci. 57(6), 3148–3153 (2010) 10.1109/TNS.2010.2083688.

152. Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications (MCNPX 2.7.0) RSICC code package C740 (2011), developed at Los Alamos National Laboratory (available from the Radiation Safety Information Computational Center at ORNL, Oak Ridge, TN).
153. Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., Guischina R., Yanke V.: «Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum», *Solar Phys* DOI 10.1007/s11207-012-0051-4, 2012
154. Papailiou M., Dimitrovab S., Babayevc E. S., and Mavromichalaki H.: «Analysis of Changes of Cardiological Parameters at Middle Latitude Region in Relation to Geomagnetic Disturbances and Cosmic Ray Variations», 2010.
155. Parker, E.N., 1965, «The passage of energetic charged particles through interplanetary space», *Planet. Space Sci.*, 13, 9–49.
156. Paschalis P. et al., *New Astronomy* 33 (2014), 26-37.
157. Paschalis P. et al.: "Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the Earth's atmosphere", *New Astronomy*, 33, 26-37, 2014
158. Paschalis P., et al., XXV ECRS 2016 Proceedings -eConf TBA, arXiv:1612.08937 [physics.space-ph] (2016).
159. Paschalis P., Mavromichalaki H., Dorman L.I., Plainaki C., Tsirigkas D.: “Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the Earth's atmosphere”, *New Astronomy* 33, 26-37, 2014.
160. Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H.: ‘Primary Data Processing Algorithms for Neutron Monitors’, *Proc. 23rd ECRS (Moscow, 3-7 July 2012)*, ecrs_sh-636, *Journal of Physics: Conference Series* 409 (2013) 012198 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012198/
161. Paschalis P., Tezari A., Gerontidou M., Mavromichalaki H., Ioannidou S.: “Space

162. Paschalis P., Tezari A., Gerontidou M., Mavromichalaki H., Nikolopoulou P.: “Space Radiation exposure calculations during different solar and galactic cosmic ray activities”, XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf TBA, arXiv:1612.08937 [physics.space-ph], 2016.
163. Paschalis Pavlos, Tezari Anastasia, Gerontidou Maria, Mavromichalaki Helen and Ioannidou Sofia: “Space Radiation Exposure Simulation During Different Phases of Solar Activity“, 2017
164. Paschalis Pavlos, Tezari Anastasia, Mavromichalaki Helen, Crosby Norma, Dierckxsens Marc: «Validation of DYASTIMA and integration to ESA SSA R-ESC», 2019.
165. Pelliccioni M., Rad. Prot. Dos. 88, 4 (2000), 279–297.
166. Pelliccioni, M. Overview of fluence to effective dose and fluence to ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using FLUKA code. Radiat. Prot. Dosimetry 88(4), 279–297 (2000).
167. Pelliccioni, M. 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 (2000).
168. Pelowitz, D. B. Ed.. MCNPX User’s Manual, Version 2.7.0. Report LA-CP-11-00438 (Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory) (2011).
169. Petropoulos B., Mavromichalaki H., Papailiou, M., Kelesidis, K., Mertzanos, G.: «Similarity of subcardian and sharp variations of cosmic ray intensity to the heart variability», 2006.
170. Pfozter, G. 1936, Dreifachkoinzidenzen der Ultrastrahlung aus vertikaler Richtung in der Stratosphere (in German), Z. Phys. 102, 23–58.

171. Plainaki C. et al.: “Solar energetic particle interactions with the Venusian atmosphere”, 2016
172. Plainaki C., Belov A., E. Eroshenko, Mavromichalaki H., Yanke V.: «Modelling ground level enhancements: The event of 20 January 2005», *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112, A04102, doi:10.1029/2006JA011926, 2007
173. Plainaki C., Paschalis P., Grassi D., Mavromichalaki H., Andriopoulou M.: “Interactions of cosmic rays with the Venusian atmosphere during different solar activity conditions”, *Annales Geophysicae* 34, 595-608, 2016.
174. Plainaki, C., A. Belov, E. Eroshenko, H. Mavromichalaki, V. Yanke (2006) : ‘Modeling ground level enhancements: the event of 20 January 2005’, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 2006 (in press).
175. Poluianov, S.V., Usoskin, I.G., Mishev, A.L. et al. GLE and Sub-GLE Redefinition in the Light of High-Altitude Polar Neutron Monitors. *Sol Phys* 292, 176 (2017).
176. Quality Management System of Austrian Research Centers GmbH. Erfassung der Strahlenbelastung in Flugzeugen aufgrund der kosmischen Strahlung mit Modelrechnungen (GSR-PV-0510), Austria (2007).
177. Radiation exposure simulations during different phases of solar activity”, HPS 50th Midyear Meeting 2017, Maryland
178. Regener, E. 1933, New Results in Cosmic Ray Measurements, *Nature*, 132,696–698.
179. Regener, E. and Pfozter, G. 1935, Intensity of the Cosmic Ultra-Radiation in the Stratosphere with the Tube-Counter, *Nature*, 134, 325–325.
180. Regener, E., Pfozter, G., 1935. Vertical Intensity of Cosmic Rays by Threefold Coincidences in the Stratosphere. *Nature* 136, 718-719.
181. Ross Eddie and Chaplin William J.: “The Behaviour of Galactic Cosmic-Ray Intensity During Solar Activity Cycle 24”, Published: 21 January 2019.

182. Sato, T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: extension of PARMA/EXPACS. *PLOS One* 10 (12), e0144679 (2015).
183. Sato, T. et al. Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.52. *J. Nucl. Sci. Technol.* 50(9), 913–923 (2013).
184. Shea, M. A. and Smart, D. F. A world grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1980.0. In: 18th International Cosmic Ray Conference, Conference Papers, 3, p. 415 (1983).
185. Shea, M. A., Smart, D. F. and McCall, J. R. A five degree by fifteen degree world grid of trajectory determined vertical cutoff rigidities. *Can. J. Phys.* 46, S1028–S1101 (1968).
186. Shrivastava P. (2005): ‘Study of large solar flares in association with halo coronal mass ejections and their helio-longitudinal association with Forbush decreases of the cosmic rays’, *Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference*, Vol. 1, p. 355, India
187. Simpson J.A., Cosmic Radiation Neutron Intensity Monitor, *Annals of the Int. Geophysical Year IV, Part VII*, Pergamon Press, London, p. 351, 1958
188. Simpson, J.A.: Cosmic Radiation Neutron Intensity Monitor, *Annals of the IGY*, 1955.
189. Sladkova et al., A.I. Sladkova, G.A. Bazilevskaya, V.N. Ishkov, M.N. Nazarova, N.K. Pereyaslova, A.G. Stupis in, V.A. Ulyev, I.M. Chertok
190. Smart D F and Shea M A. Cosmic ray exposure factors for shuttle altitudes derived from calculated cut-off rigidities. *Advances in space research: the official journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*, 4(10):161–164, 1984.
191. Smart D.F., M.A. Shea, 30th ICRC, Mexico 2007.

192. Smart, D. F. and Shea, M. A. The limitations of using vertical cutoff rigidities determined from the IGRF magnetic field models for computing aircraft radiation dose. *Adv. Space Res.* 32(1), 95–102 (2003) 10.1016/S0273-1177(03)00501-5.
193. Smart, D. F. and Shea, M. A. World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 1990. In: 25th International Cosmic Ray Conference, Conference Papers, 2, pp. 401–404 (1997).
194. Smart, D. F. and Shea, M. A. World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities from IGRF 2010, in partial fulfillment of FAA Procurement AAM-610-12-0157 (2012).
195. Smart, D. F. and Shea, M. A. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidities for Epoch 1990. *Proceedings of the 25th International Cosmic Ray Conference*, Durban, South Africa, 1997, pp. 401–404.
196. Smart, D. F. Vertical Geomagnetic Cutoff Rigidity Latitude Plots: IGRF 2000. Report for FAA CAMI contract AC-04-02566 (2005).
197. Souvatzoglou G., Papaioannou A., Mavromichalaki H., Dimitroulakis J., Sarlanis C.: «Optimizing the real-time ground level enhancement alert system based on neutron monitor measurements: introducing GLE Alert Plus», *Space Weather*, 12, 633-649, 2014,
198. Spurny, F., Datchev T. (2001) Measurement in an aircraft during an intense solar flare, Ground Level Event 60, on the 15th April 2001, *Rudolf Prof. Dosim.* 95, 273-275.
199. Stoker P.H., Dorman L.I., and J.M. Clem J.M., Neutron Monitor Design Improvements, *Space Science Review*, vol. 93, pp. 361-380, 2000
200. Störmer, C. *The Polar Aurora* (London: Oxford University Press) (1950).
201. Strahlenschutzverordnung fliegendes Personal. BGBl. II Nr. 235/2006, Austria (2006).

202. Svalgaard, L., Cliver, E.W. and Kamide, Y., 2005, «Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? », *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01 104.
203. Tezari A., Paschalis P., Gerontidou M., Mavromichalaki H., Karaiskos P.: «Radiation exposure of aircrews due to space radiation», 2019.
204. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". *Annals of the ICRP*. ICRP publication 103. 37 (2–4). 2007. ISBN 978-0-7020-3048-2. Retrieved 17 May 2012. Wr
205. The European co-operation for Accreditation. <http://www.european-accreditation.org>. (last accessed 2009).
206. The Pierre Auger Collaboration: «The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory», 2015.
207. Thierfeldt, S. et al. Evaluation of implementation of radiation protection measures for aircrew in the European Union. EURADOS Annual Meeting 2009, 26–30 January 2009, Braunschweig, Germany, These proceedings.
208. Toro Daniel Gomez: «emporal Filtering with Soft Error Detection and Correction Technique for Radiation Hardening Based on a C-element and BICS», 2014.
209. Tylka A.J., Adams J. H., Boberg Jr., P. R., Brownstein B., Dietrich W. F., Flueckiger E. O., Petersen E. L., Shea M. A., Smart D. F., Smith E. C.: “CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44, 2150-2160, 1997.
210. U.S. Government Printing Office: “U.S. Standard Atmosphere”, 1976.
211. Usoskin IG, Mursula K (2003) Long-term solar cycle evolution: review of recent developments. *Solar Phys* 218:319–343. doi:10.1023/B: SOLA.0000013049.27106.07

212. Various. MCNP Reference Collection. Available at https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/references.shtml#mcnpx_refs (last date accessed September 19, 2016).
213. Venkat Ratnam, M.; Patra, A. K.; Krishna Murthy, B. V. (25 March 2010). «Tropical mesopause: Is it always close to 100 km? ». *Journal of Geophysical Research* 115 (D6). doi:10.1029/2009jd012531. ISSN 0148-0227.
214. von Zahn, U.; Höffner, J.; Eska, V.; Alpers, M. (1 November 1996). «The mesopause altitude: Only two distinctive levels worldwide? ». *Geophysical Research Letters* 23 (22): 3231–34. doi:10.1029/96gl03041. ISSN 0094-8276
215. Vuković B.Radolić V.Miklavčić I.Poje M.Varga M.Planinić J.: «Cosmic radiation dose in aircraft – a neutron track etch detector», 2007.
216. Wawrzynczak A and Alania, M. (2005): ‘Fluctuations of the interplanetary magnetic field during the Forbush Effects of galactic cosmic rays, *Acta Physica Polonica B*, 36, 5, 1847.
217. Weisstein, Eric W. "Radiation". *Eric Weisstein's World of Physics*. Wolfram Research. Retrieved 11 January 2014.
218. Weller R.A., Mendenhall M. H., Reed R. A., Schrimpf R. D., Warren K. M., Sierawski B. D., Massengill L. W.: “Monte Carlo simulation of single event effects” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 57, 1726-1746, 2010.
219. Ziegler J.F. Terrestrial cosmic rays. *IBM Journal of Research and Development*, 40(1):19–39, 1996.
220. Ζερεφός (2001). Μαθήματα Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Φυσικής του Περιβάλλοντος
221. Σημαντηράκης Γεώργιος : «Προστασία από τις Ακτινοβολίες», http://eeae.gr/docs/president/_simant.radprotect2.pdf

