



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
—ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837—

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη δόσεων ακτινοβολίας από γεγονότα της
έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στο γεωδιάστημα

Αναστασία Τεζάρη

Φυσικός, B.Sc., M.Sc.

Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2ος Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΑΘΗΝΑ 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη δόσεων ακτινοβολίας από γεγονότα της
έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στο γεωδιάστημα

Αναστασία Τεζάρη
Φυσικός, B.Sc., M.Sc.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Παντελής Καραίσκος (Κύριος Επιβλέπων)
Καθηγητής Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

Παναγιώτης Παπαγιάννης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

Ελένη Χριστοπούλου - Μαυρομιχαλάκη
Ομότιμη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2021

Επταμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Παντελής Καραίσκος (Κύριος Επιβλέπων)
Καθηγητής Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

Παναγιώτης Παπαγιάννης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ

Ελένη Χριστοπούλου - Μαυρομιχαλάκη
Ομότιμη Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Ιωάννης Δαγκλής
Καθηγητής Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, Πρόεδρος ΕΛΚΕΔ

Έλενα Φλόκα
Καθηγήτρια Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Αρχάδιος Μανουσάκης-Κατσιμάκης
Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Εμμανουήλ Γεωργούλης
Ερευνητής Α', Διευθυντής Ερευνών ΚΕΑΕΜ Ακαδημίας Αθηνών

*Στο Δημήτρη,
στη Ρόζα,
και σε έναν σκύλο
που τον έλεγαν Ερνέστο.*

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής του Τμήματος Ιατρικής της Σχολής Επιστημών Υγείας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η διατριβή πραγματεύεται την εκτίμηση δόσεων ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα αεροσκαφών και επανδρωμένων διαστημικών αποστολών λόγω φαινομένων κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης, καθώς και άλλων πλανητών, με τη χρήση του λογισμικού DYASTIMA / DYASTIMA-R. Το λογισμικό DYASTIMA / DYASTIMA-R αποτελεί πιστοποιημένο εργαλείο και επίσημο προϊόν της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας.

Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος ‘Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση’, στο πλαίσιο της Πράξης ‘Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας - 2ος Κύκλος’ (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της διατριβής αυτής.

Εγκάρδιες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς την Τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή της διατριβής, ήτοι τον Παντελή Καραάσκο, Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ, τον Παναγιώτη Παπαγιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Ιατρικής Σχολής ΕΚΠΑ, και την Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχάλη, Ομότιμη Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και Επιστημονική Υπεύθυνη του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ, που ανέλαβαν την επίβλεψη της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά και τα μέλη της Επταμελούς Επιτροπής, ήτοι τον Ιωάννη Δαγκλή, Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και Πρόεδρο του Ελληνικού Κέντρου Διαστήματος (ΕΛΚΕΔ), την Έλενα Φλόκα, Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, τον Αρκάδιο Μανουσάκη-Κατσιάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, καθώς και τον Εμμανουήλ Γεωργούλη, Ερευνητή Α΄ και Διευθυντή Ερευνών του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών (ΚΕΑΕΜ) της Ακαδημίας Αθηνών, για τη

συμβολή τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ομότιμη Καθηγήτρια Ελένη Μαυρομιχαλάκη, η οποία με έχει στηρίξει έμπρακτα από τα πρώτα μου βήματα ως προπτυχιακή φοιτήτρια στο Τμήμα Φυσικής, κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου, έως και σήμερα που φτάνω πλέον στην ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Την ευχαριστώ επίσης για τη δυνατότητα που μου έδωσε να δουλέψω ερευνητικά ως μέλος της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας, της οποίας είναι Επιστημονική Υπεύθυνη, να συμμετάσχω σε Ευρωπαϊκά Ερευνητικά Προγράμματα, να παρακολουθήσω ενεργά διεθνή συνέδρια και συναντήσεις εργασίας που οργανώθηκαν στην Ελλάδα και στο εξωτερικό και να συνεργαστώ με αξιόλογα μέλη της ελληνικής και διεθνούς επιστημονικής κοινότητας. Η ευγνωμοσύνη μου είναι απεριόριστη για όλο το χρόνο που μου αφιέρωσε, για το ειλικρινές της ενδιαφέρον και για την αμέριστη συμπαράστασή της ως δεύτερη μητέρα σε όλη μου την πορεία μέχρι σήμερα.

Πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω συνολικά στα μέλη της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ αλλά και σε κάθε έναν ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον συνεργάτη μου Δρ. Παύλο Πασχάλη για την άριστη συνεργασία, για την υλοποίηση και διάθεση του λογισμικού DYASTIMA, για τη συμβολή του στη διαδικασία αξιολόγησης του DYASTIMA / DYASTIMA-R, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά του στην κατανόηση και πραγματοποίηση των απαραίτητων για την εργασία αυτή προσομοιώσεων. Χωρίς τη βοήθειά του δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της μελέτης αυτής.

Ευχαριστώ, επίσης, θερμά τη Δρ. Μαρία Γεροντίδου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ, για τις πολύτιμες συμβουλές και την ηθική υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια της διατριβής και όχι μόνο. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στην υποψήφια διδάκτορα Δήμητρα Λίγγρη, για τη φιλία της, την κατανόησή της και τις υπέροχες και συνάμα δύσκολες στιγμές που περάσαμε καθημερινά στο γραφείο αλλά και στα συνέδρια που διοργανώσαμε και παρακολουθήσαμε μαζί. Τέλος, ευχαριστώ το Δρ. Ευάγγελο Παούρη, τη Δρ. Μαρία Λιβαδά και τον υποψήφιο διδάκτορα Λουκά Ξαπλαντέρη για τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον συνάδελφο και φίλο Δρ. Αναστάσιο Κανελλάκοπουλο για τις χρήσιμες υποδείξεις του στην επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής φύσης, αλλά και για την πρόσβαση που μου παρείχε στην υπηρεσία Cloud Infrastructure του CERN Data Center, για την υλοποίηση μεγάλου μέρους των προσομοιώσεων. Στο ίδιο πλαίσιο, ευχα-

ριστώ επίσης θερμά τον συνάδελφο Δρ. Αργύρη Στασινάκη για τις γνώσεις που μου προσέφερε, την ανοχή του και τη σημαντική βοήθειά του στις δύσκολες ώρες των υπολογισμών. Ευχαριστώ επίσης τον συνάδελφο Δημήτρη Αλεξανδρίδη για την όμορφη συνεργασία μας και για τη βοήθειά του στην αξιολόγηση των αεροπορικών πτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στη Δρ. Norma Crosby και στον Δρ. Mark Dierckxsens, διαπρεπείς επιστήμονες του Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB) του Βελγίου για την ευκαιρία που μου έδωσαν να συνεργαστώ μαζί τους όλα αυτά τα χρόνια, για την καθοδήγησή τους και τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους.

Κλείνοντας αυτή την ενότητα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Αλεξάνδρα και Βαγγέλη, για την αγάπη, τη βοήθεια και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια, από την πρώτη κιόλας στιγμή που τους εκμυστηρεύτηκα την αγάπη μου για τις επιστήμες. Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους αγαπημένους μου φίλους Λία, Νίκο, Μιχάλη και Χριστόφορο που ήταν μαζί μου σε όλες τις ευχάριστες στιγμές, αλλά και που με ανέχτηκαν στις δυσκολίες. Πολλές ευχαριστίες θέλω να δώσω επίσης και σε όλους τους μαθητές μου όλα αυτά τα χρόνια για το γέλιο και την ηθική τους υποστήριξη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αγαπημένο μου Δρ. Δημήτρη Κατσινή, που πίστεψε σε μένα από την αρχή. Χωρίς τη βοήθεια, τη στήριξη, την αγάπη του και τη μόνιμη παρουσία του σε όλες τις καλές και κακές μας στιγμές, ίσως να μην ήμουν τώρα σε αυτή τη θέση.

Συντομογραφίες & Ακρώνυμα

EKΠΑ	Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
IKY	Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών
ANEMOS	Athens Neutron Monitor Station
ESA	European Space Agency
SSA	Space Situational Awareness
SWE	Space Weather Service Network
R-ESC	Radiation Expert Service Centre
NMDB	Neutron Monitor DataBase
ICRP	International Radiation Protection Commission
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
DYASTIMA	DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application
FL	Flying Level
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
GLE	Ground Level Enhancement
SPE	Solar Proton Event
CME	Coronal Mass Ejection
EMY	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
LET	Linear Energy Transfer
ISA	International Standard Atmosphere

Χρήσιμες Ιστοσελίδες

<https://mpl.med.uoa.gr/>
<http://cosray.phys.uoa.gr/>
<https://www.esa.int/>
<https://swe.ssa.esa.int/space-radiation>
<https://swe.ssa.esa.int/anemos-federated>
<https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>
<https://www.nasa.gov/>
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>
<https://www.spenvis.oma.be/>
<https://www.trad.fr/en/space/omere-software/>
<https://creme.isde.vanderbilt.edu/>
<http://spaceweather.gr/>
<http://radiopaedia.org/>
<https://eeae.gr/>
<https://www.iaea.org/>
<https://www.ifalpa.org/>
<http://spaceweather.phys.uoa.gr/>
<https://www.icrp.org/>
<https://www.icru.org/>
<http://www.faa.gov/>
<http://hnms.gr/emv/el/spaceWeather/spaceWeather>
<https://swe.ssa.esa.int/avidos-federated>
http://www.gsf.de/epcard2/index_en.phtml
<http://www.sievert-system.org/>
<http://www.pcaire.com/>
<https://phits.jaea.go.jp/>

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
----------	---

Summary	5
---------	---

Θεωρητικό Μέρος

1 Κοσμική Ακτινοβολία	13
1.1 Ορισμός	13
1.2 Σύσταση Κοσμικής Ακτινοβολίας	15
1.3 Ενεργειακό Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας	17
1.4 Ατμοσφαιρικοί Καταιγισμοί	21
1.5 Μαγνητόσφαιρα της Γης	26
1.6 Μαγνητική Δυσκαμψία	28
1.7 Διαμόρφωση Κοσμικής Ακτινοβολίας	32
1.7.1 11-ετής Ηλιακός Κύκλος	34
1.7.2 22-ετής Ηλιακός Κύκλος	36
1.7.3 Μείωση Forbush	36
1.7.4 Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας	37
1.7.5 27-ήμερη Μεταβολή	38
1.7.6 Ημερήσια Ανισοτροπία	39
1.8 Καταγραφή Κοσμικής Ακτινοβολίας	40
1.8.1 Μπαλόνια και Δορυφόροι	40
1.8.2 Επίγειες Διατάξεις	43
1.8.3 Μετρητές Νετρονίων	45
1.8.4 Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ	49
1.9 Διαστημικός Καιρός και Γεωδιάστημα	51
1.10 Επίδρασεις Διαστημικού Καιρού	54
1.10.1 Επίδραση σε τεχνολογικά συστήματα	57
1.10.2 Επίδραση σε βιολογικά συστήματα	58
2 Ακτινοβολίες	61
2.1 Ιστορική αναδρομή	61
2.2 Είδη Ακτινοβολιών	64

2.3	Πηγές Ακτινοβολιών	65
2.4	Αλληλεπίδραση Ακτινοβολίας και Ύλης	66
2.5	Μεγέθη Δοσιμετρίας και Ακτινοπροστασίας	69
2.5.1	Ραδιομετρικά Μεγέθη	69
2.5.2	Δοσιμετρικά Μεγέθη	70
2.5.3	Προστατευτικά Μεγέθη	71
2.5.4	Λειτουργικά Μεγέθη	75
2.6	Ακτινοπροστασία	76
2.6.1	Κατηγορίες και Καταστάσεις Έκθεσης	76
2.6.2	Αρχές Ακτινοπροστασίας	77
2.7	Βιολογικές Επιπτώσεις Ακτινοβολιών	79
2.8	Έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία	85
2.8.1	Πληρώματα αεροσκαφών	88
2.8.2	Επιβάτες	96
2.8.3	Πληρώματα διαστημικών αποστολών	96
2.9	Πρωτόκολλα ακτινοπροστασίας για κοσμική ακτινοβολία	100
2.10	Μοντέλα	107
2.10.1	AVIDOS	109
2.10.2	CARI	111
2.10.3	NAIRAS	113
2.10.4	PLANETOCOSMICS - MAGNETOCOSMICS	113
2.10.5	EPCARD	114
2.10.6	PCAIRE	115
2.10.7	JISCARD EX	117
2.10.8	SIEVERT	118

Πειραματικό Μέρος

3	Λογισμικό DYASTIMA	123
3.1	DYASTIMA	123
3.2	DYASTIMA-R	127
3.3	Παράμετροι Εισόδου	131
3.3.1	Γενικά Χαρακτηριστικά της Γης	131
3.3.2	Γήινη Ατμόσφαιρα	133

3.3.3	Πρωτογενές Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας	138
3.3.4	Γεωμετρία της προσομοίωσης	144
3.3.5	Κατώφλια Ενέργειας	147
3.3.6	Ρυθμίσεις Δοσιμετρικών Υπολογισμών	148
3.4	Παράμετροι εξόδου	148
3.5	Πρώτα αποτελέσματα με το DYASTIMA-R	151
4	Αξιολόγηση DYASTIMA-R	155
4.1	Πρωτόκολλα Αξιολόγησης	155
4.2	Αξιολόγηση του DYASTIMA-R	159
4.3	Σύγκριση με άλλα μοντέλα	167
5	Εφαρμογές και Αποτελέσματα	175
5.1	Ηλιακοί Κύκλοι 23 & 24	175
5.1.1	Φάσματα Κοσμικής Ακτινοβολίας	176
5.1.2	Ενεργειακή Εναπόθεση	179
5.1.3	Δοσιμετρικοί Υπολογισμοί	186
5.2	Σενάρια Worst Case	201
5.2.1	Worst Case GCR	202
5.2.2	Worst Week	206
5.3	Αεροπορικές πτήσεις	208
5.4	Ατμόσφαιρες άλλων πλανητών	215
5.4.1	Πλανήτη Αφροδίτη	216
5.4.2	Πλανήτη Άρης	225
6	Συμπεράσματα και Προοπτικές	235
6.1	Υπολογισμοί δόσεων στους ηλιακούς κύκλους 23 & 24	235
6.2	Υπολογισμοί δόσεων σε έντονα γεγονότα	239
6.3	Υπολογισμοί δόσεων κατά τη διάρκεια πτήσεων	240
6.4	Υπολογισμοί δόσεων σε άλλους πλανήτες	241
6.5	Αξιολόγηση του DYASTIMA-R	244
6.6	Χρησιμότητα και Προοπτικές	247

Παράρτημα

Α΄ Προσομοιώσεις με το DYASTIMA-R	289
Β΄ Πολυωνυμική Προσαρμογή	295
Κατάλογος Δημοσιεύσεων	299

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη και ο υπολογισμός των δόσεων ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών λόγω έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία στο γεωδιαστημικό χώρο.

Η φυσική ακτινοβολία που υπάρχει στο διαστημικό περιβάλλον αποτελείται από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες και τα ηλιακά σωματίδια. Ο Ήλιος είναι η κινητήρια δύναμη για την πλειονότητα των ατμοσφαιρικών διαδικασιών. Έτσι οποιαδήποτε μεταβολή αυτών μπορεί να αποδοθεί σε μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιακής διαμόρφωσης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, καθώς και στην τροχιακή κίνηση της Γης.

Με τον όρο Διαστημικό Καιρό ορίζονται οι συνθήκες που επικρατούν στην μαγνητόσφαιρα της Γης, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα λόγω του ηλιακού ανέμου. Οι μεταβολές αυτών, που οφείλονται κυρίως σε έντονα ηλιακά φαινόμενα αλλά και στις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες που μεταβάλλουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος κοντά στη Γη, μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα, τη λειτουργία διαφόρων διαστημικών και επίγειων τεχνολογικών συστημάτων και υπηρεσιών ή να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή και υγεία. Για τους λόγους αυτούς, η επιστημονική κοινότητα οδηγήθηκε στην ανάπτυξη ειδικών κέντρων πρόβλεψης και παρακολούθησης Διαστημικού Καιρού. Ο Μετρητής Νετρονίων του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου της Αθήνας (Athens Neutron Monitor Station – ANeMoS), ως ιδρυτικός μέλος της υψηλής ανάλυσης Ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων μετρητών νετρονίων (High resolution Neutron Monitor Database – NMDB), και η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής που συμμετέχει ως expert group στην Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA), παρέχοντας και εξελίσσοντας εργαλεία και υπηρεσίες, απαραίτητα για την έρευνα και τις επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού.

Καθώς η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία φτάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, συγκρούεται με τα μόρια των ανώτερων στρωμάτων και μέσω μιας σειράς πυρηνικών αντιδράσεων παράγονται δευτερογενή σωματίδια, οι λεγόμενοι καταιγισμοί, τα οποία καταγράφονται από επίγειους μετρητές, όπως για παράδειγμα οι μετρητές νετρονίων και οι μετρητές μιονίων. Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης επηρεάζεται από τη φάση του ηλιακού κύκλου, τη θωράκιση της ατμόσφαιρας και της μαγνητόσφαιρας της Γης, καθώς και από το υψόμετρο. Η μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διατριβής αυτής, με αξιόλογα και πρωτότυπα αποτελέσματα.

Οι καταστάσεις έκθεσης στον εναέριο και διαστημικό χώρο είναι διαφορετικές από εκείνες του γήινου περιβάλλοντος και αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα στη μελέτη του Διαστημικού Καιρού. Η ακτινοβολία στο γεωδιαστημικό χώρο μπορεί να είναι ιονίζουσα ή μη ιονίζουσα. Η ιονίζουσα ακτινοβολία (ηλιακές και γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για τα βιολογικά συστήματα, εξαιτίας του μεταλλαξογόνου και καρκινογόνου χαρακτήρα της. Πιο συγκεκριμένα, οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις συνδέονται με μακρόχρονη έκθεση στη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία, ενώ οι άμεσες επιπτώσεις κυρίως με ηλιακά γεγονότα μεγάλης έντασης. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα εργαλεία, λογισμικά και πρωτόκολλα ακτινοπροστασίας για την αξιολόγηση της επαγγελματικής έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών σε κοσμική ακτινοβολία. Μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές που είναι διαθέσιμες σήμερα για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών στη γήινη ατμόσφαιρα είναι τα AVIDOS, CARI, NAIRAS, PLANETOCOSMICS, EPCARD, PCAIRE, JISCARD και SIEVERT. Ένα τέτοιο εργαλείο χρησιμοποιείται στα πλαίσια της διατριβής αυτής, με το όνομα DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA).

Πιο συγκεκριμένα, το DYASTIMA έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και αποτελεί μια αυτόνομη και ιδιαίτερα εύχρηστη εφαρμογή για τη GEANT4 Monte Carlo προσομοίωση καταιγισμών των δευτερογενών σωματιδίων παραγομένων μέσα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη λόγω κοσμικής ακτινοβολίας. Το φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, η δομή της ατμόσφαιρας, το γεωμαγνητικό πεδίο, οι φυσικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κοσμικών σωματιδίων και των μορίων της ατμόσφαιρας, οι συνθήκες του Διαστημικού Καιρού καθώς και το χωροχρονικό πλαίσιο πραγματοποίησης της προσομοίωσης, αποτελούν τις παραμέτρους εισόδου, οι οποίες εισάγονται από το χρήστη μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος. Η έξοδος του προγράμματος παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τον καταιγισμό, όπως την ενέργεια, τον αριθμό και την εναπόθεση ενέργειας στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα.

Το DYASTIMA-R αποτελεί μία επέκταση του ανωτέρου εργαλείου, το οποίο έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης δοσιμετρικών υπολογισμών για ποικίλα σενάρια πτήσεων, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται από το DYASTIMA. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για διάφορους τύπους και ενέργειες σωματιδίων, διαφορετικά ατμοσφαιρικά ύψη, διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες και κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας, αλλά και διάφορες φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας. Το DYASTIMA και DYASTIMA-R αποτελεί πλέον federated product στην Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), και πιο συγκεκριμένα στο Space Situational Awareness (SSA) Space Weather Service Network (SWE) Space Radiation Expert

Service Centre (R-ESC), όπου η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ συμμετέχει ως expert group. Επίσης, έχει πιστοποιηθεί σύμφωνα με τα κριτήρια που προτείνονται από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) και τη Διεθνή Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (ICRU) και αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας στον ατμοσφαιρικό χώρο.

Το λογισμικό DYASTIMA / DYASTIMA-R, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μελετήσει συνολικά όλες τις ιδιότητες του ατμοσφαιρικού καταιγισμού και να υπολογίσει δόσεις ακτινοβολίας, για οποιεσδήποτε συνθήκες, χάρη στη μεγάλη ελευθερία παραμετροποίησης που προσφέρει το γραφικό περιβάλλον εργασίας. Αυτό δίνει τη δυνατότητα μελέτης όχι μόνο της γήινης ατμόσφαιρας, αλλά και της ατμόσφαιρας άλλων πλανητών. Για το λόγο αυτό, το DYASTIMA / DYASTIMA-R αποτελεί όχι μόνο ένα αξιόπιστο ερευνητικό εργαλείο, αλλά και ένα εκπαιδευτικό λογισμικό, το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο στην ερευνητική κοινότητα, στα πληρώματα αεροσκαφών, στους επιβάτες, στις αεροπορικές εταιρείες και στους νομοθέτες.

Η δομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελείται από έξι κεφάλαια, ένα παράρτημα και εκτενή βιβλιογραφία, και έχει την εξής μορφή:

Στο **Πρώτο Κεφάλαιο**, πραγματοποιείται μία εκτενής αναφορά όλων των βασικών εννοιών και μεγεθών που σχετίζονται με την κοσμική ακτινοβολία και μία αναλυτική περιγραφή των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας και οι μέθοδοι καταγραφής των διαφόρων φαινομένων. Τέλος, παρουσιάζεται συνοπτικά το νέο επιστημονικό πεδίο του Διαστημικού Καιρού, και οι επιπτώσεις που επιφέρει στα τεχνολογικά και βιολογικά συστήματα.

Στο **Δεύτερο Κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα είδη και οι πηγές της ακτινοβολίας, καθώς και οι τρόποι αλληλεπίδρασης αυτής με την ύλη. Γίνεται ορισμός των μεγεθών δοσιμετρίας, που είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής περιγραφή των επιπτώσεων της κοσμικής ακτινοβολίας στην υγεία των πληρωμάτων αεροσκαφών, επιβατών και αστροναυτών, και παρουσιάζονται αντίστοιχα οι αρχές και τα πρωτόκολλα ακτινοπροστασίας. Τονίζεται η χρησιμότητα ύπαρξης υπολογιστικών μοντέλων και εφαρμογών για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών για πληρώματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών. Ένα τέτοιο εργαλείο που προτείνεται στα πλαίσια της διατριβής αυτής είναι το DYASTIMA / DYASTIMA-R.

Στο **Τρίτο Κεφάλαιο**, παρουσιάζεται αναλυτικά το εργαλείο DYASTIMA που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Η νέα βελτιωμένη έκδοση του περιέχει

την επέκταση DYASTIMA-R, η οποία δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης δοσιμετρικών υπολογισμών μέσα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής για την αξιολόγηση της έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών στην κοσμική ακτινοβολία. Γίνεται εκτενής αναφορά στην παραμετροποίηση του DYASTIMA / DYASTIMA-R και δίνονται τα πρώτα αποτελέσματα από την εφαρμογή του.

Στο **Τέταρτο Κεφάλαιο**, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία αξιολόγησης (validation) του DYASTIMA / DYASTIMA-R σύμφωνα με τα δεδομένα αναφοράς που προτείνονται από την ICRP και την ICRU. Η διαδικασία αυτή αποτελεί απαραίτητο βήμα και διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα που δίνει το DYASTIMA / DYASTIMA-R είναι ορθά, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών σε κοσμική ακτινοβολία. Πραγματοποιείται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης του DYASTIMA / DYASTIMA-R με αυτά από άλλα διεθνώς αναγνωρισμένα μοντέλα.

Στο **Πέμπτο Κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το DYASTIMA / DYASTIMA-R που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής. Αρχικά, δίνονται τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων 23 και 24 για διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα και διάφορες τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια έντονων φαινομένων του Διαστημικού Καιρού, τα οποία αποτελούν εν δυνάμει κίνδυνο τόσο για τα τεχνολογικά συστήματα στον επίγειο, εναέριο και διαστημικό χώρο, όσο και για την υγεία των πληρωμάτων αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών. Ακόμα, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, πραγματοποιείται εκτίμηση δόσεων ακτινοβολίας για διάφορες αεροπορικές πτήσεις με σημείο αναχώρησης το αεροδρόμιο της Αθήνας. Τέλος, παρουσιάζεται μία πρώτη προσπάθεια υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας στις ατμόσφαιρες άλλων πλανητών του ηλιακού μας συστήματος, και πιο συγκεκριμένα της Αφροδίτης και του Άρη.

Στο **Έκτο Κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης καθώς και οι προοπτικές συνέχισης αυτής της έρευνας με το νέο εργαλείο DYASTIMA / DYASTIMA-R.

Στο Παράρτημα, παρατίθενται σε πίνακες τα κυριότερα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το DYASTIMA / DYASTIMA-R.

Τέλος, παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφία από έγκυρα επιστημονικά περιοδικά και βιβλία σχετικά με το αντικείμενο της διατριβής, καθώς και οι δημοσιεύσεις και οι παρουσιάσεις σε συνέδρια που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διδακτορικής διατριβής.

Summary

This dissertation has taken place at the Medical Physics Laboratory of the Faculty of Medicine of the National and Kapodistrian University of Athens, in collaboration with the Athens Cosmic Ray Group of the Faculty of Physics of the National and Kapodistrian University of Athens.

This research is co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund - ESF) through the Operational Programme “Human Resources Development, Education and Lifelong Learning” in the context of the project “Strengthening Human Resources Research Potential via Doctorate Research - 2nd Cycle” (MIS-5000432), implemented by the State Scholarships Foundation (IKY).

The object of this research is the study and calculation of radiation dose received by aircrews and spacecraft crews due to exposure to cosmic radiation in geospace.

Radiation exposure in space is entirely different from the radiation that is experienced on Earth’s surface and it is an important topic in the field of space weather. However, as radiation propagates through the interplanetary medium and finally reaches the atmosphere and the Earth’s surface may have multiple effects not only on our climate, but also on technological and biological systems. Therefore, the continuous monitoring and analysis of the several solar and cosmic ray phenomena may help us to a better understanding of the solar – terrestrial relations and determine correlations between Space Weather and various atmospheric processes that may lead to climate changes.

Space radiation consists mainly of three components: trapped particles in Earth’s magnetosphere, solar particles that are injected into space during solar flares and coronal mass ejections and galactic cosmic rays, which are particles originated from sources outside of our solar system. Space radiation can be ionizing (particles of the components mentioned above) as well as non-ionizing (ultra-violet radiation). Ionizing radiation is of great importance, as it is far more dangerous for the radiation exposure of biological systems. The Sun is the driving force for the majority of the terrestrial atmospheric processes. Therefore, any variation in these processes may be attributed to the solar radiation changes and its modulation by the galactic cosmic rays as well as the Earth’s orbital motion.

Space Weather characterizes the conditions of the Earth’s magnetosphere, ionosphere and thermosphere due to the solar wind. These variations, that are mainly due to strong solar

phenomena but also to galactic cosmic rays that alter the conditions of the environment near the Earth, may affect the climate, the operation of various space and terrestrial technological systems and services or endanger human life and health. For these reasons, the scientific community was led to develop space weather forecasting and monitor centres. The Athens Neutron Monitor Station (A.Ne.Mo.S.), located at the University of Athens, as a founding member of the High Resolution Neutron Monitor Database (NMDB) and as an expert group at the European Space Agency (ESA), provides many federated products and tools, which are of great importance for the research concerning Space Weather effects.

As primary cosmic rays reach the top of the atmosphere, collisions with the atmospheric molecules (mainly nitrogen and oxygen) take place and lighter fragments are produced, through a series of nuclear reactions. As a result, cascades of secondary particles are produced, consisting of protons, neutrons, mesons such as pions, gamma-rays, electrons and muons, with their antiparticles respectively. These particles are recorded by ground-based monitors, such as neutron monitors and muon monitors[3]. Secondary cosmic radiation consists of the nucleonic, mesonic and leptonic components. Cosmic ray intensity on the top of the atmosphere is modulated by the solar activity, the Earth's atmosphere and magnetosphere, and the atmospheric altitude.

Radiation exposure in space is totally different than the one experienced on Earth's surface. Space radiation is ionizing (solar and galactic cosmic rays) and non-ionizing (ultra-violet radiation). Ionizing radiation can be extremely dangerous to biological systems, causing mutations and carcinogenesis. Specifically, the chronic effects are due to the long term exposure to galactic cosmic rays, while the acute effects are mostly related to high intensity solar phenomena. Several types of cancers, melanoma, vision impairment/cataract, as well as diseases of the cardiovascular system are some typical examples. For these reasons, several models, software applications and radiation protection protocols for monitoring cosmic ray intensity and radiation dose received by aircrews and space crews are developed. Some of the most popular applications available today for performing radiation dosimetry calculations in the Earth's atmosphere are AVIDOS, CARI, NAIRAS, PLANETOCOSMICS, EPCARD, PCAIRE, JISCARD and SIEVERT. In the scope of this work, a new tool, called DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA) has been used.

More specifically, DYASTIMA is developed by the Athens Cosmic Ray Group of the National and Kapodistrian University of Athens. It is a stand-alone and user-friendly software

for the Monte Carlo simulation of the cascades in the atmosphere of a planet, developed in GEANT4. DYASTIMA is based on a graphical user interface application, which can be easily operated even by non-experienced users, and it supports extensive parametrization of several input parameters, allowing the simulation of any planet and any input spectra. The output of DYASTIMA provides all the information concerning the atmospheric showers, such as the number, the direction, the arrival time, the energy and the energy deposit of the secondary cosmic ray particles at different atmospheric altitudes.

DYASTIMA-R is an extension of DYASTIMA and performs radiation dosimetry calculations for various flight scenarios, by using the output provided by DYASTIMA. The calculations are performed for different particle types and energies, different atmospheric altitudes, geographic coordinates, cut-off rigidity thresholds and phases of solar activity. DYASTIMA and DYASTIMA-R consist a federated product of the European Space Agency (ESA), in the Space Situational Awareness (SSA) Space Weather Service Network (SWE) Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC), where the Athens Cosmic Ray Group participates as an expert group.

DYASTIMA / DYASTIMA-R has been validated according to the specifications of the ICRU Report 84, which provides reference data for the validation of doses from cosmic radiation exposure of aircraft crews. Simulations have been performed for three different flying altitudes (FL310, FL350, FL390) corresponding to the usual flying range of large passenger-jet aircraft flights, eighteen vertical geomagnetic cut-off rigidity values R_c (0 GV to 17 GV, with an increment of 1 GV) corresponding to the full range of geographic latitudes, and three different time periods (January 1998, January 2000, January 2002) covering different periods of solar activity and solar magnetic field polarity.

The software DYASTIMA / DYASTIMA-R, enables the user to fully study all the properties of the atmospheric showers and to calculate radiation doses, for any conditions, thanks to the provision of parametrization and configuration offered by the graphical user interface. This allows the study of the Earth's atmosphere, but the atmospheres of other planets as well. Therefore, DYASTIMA / DYASTIMA-R is not only a reliable research tool, but also an educational software, which can be useful to the scientific community, aircraft crews, passengers, airlines and legislators.

This dissertation consists of six chapters, an appendix and an extensive bibliography, according to the following structure:

In **Chapter 1**, all the basic concepts and quantities associated with cosmic radiation are extensively presented. A detailed description of the secondary particle cascades inside the atmosphere (atmospheric showers) is given, as they are an integral part of this PhD research. Next, the modulation of cosmic radiation, as well as the instrumentation for recording the cosmic radiation variations, are thoroughly described. Finally, geospace is defined and the new field of Space Weather is briefly presented. The effects of several Space Weather phenomena on technological and biological systems are highlighted.

In **Chapter 2**, the radiation types and sources are presented, alongside with the radiation interactions with matter. All dosimetry quantities, which are necessary for the evaluation of radiation exposure, and more specifically the exposure due to cosmic radiation, are defined. Next, a comprehensive description of the effects of cosmic radiation on the health of aviation crews, frequent flying passengers and astronauts is performed. The principles and protocols of radiation protection related to cosmic radiation are presented in detail. Finally, the usefulness of software models and applications for performing dosimetry calculations for aircraft and spacecraft crews is emphasized. Some of the most widely known tools used for radiation assessment are presented. One such tool, named DYASTIMA-R, is proposed in the context of this work.

In **Chapter 3**, the software tool DYASTIMA, developed by the Athens Cosmic Ray Group for the study of atmospheric showers, is presented. DYASTIMA is based on a graphical user interface application, supporting extensive parametrization of several input parameters. More specifically, the input parameters, such as the primary cosmic ray spectrum at the top of the atmosphere, the structure of the atmosphere, the geomagnetic field, the physical interactions that take place between the cosmic ray particles and the molecules of the atmosphere, the space weather conditions, and the time and location of the simulation are presented in detail. The output of DYASTIMA provides all the information concerning the atmospheric showers, such as the number, the direction, the arrival time, the energy and the energy deposit of the secondary cosmic ray particles at different atmospheric altitudes. The new version contains the extension DYASTIMA-R, which enables radiation dosimetry calculations to be performed in the atmosphere of a planet. This tool was used in this work to evaluate the exposure to cosmic radiation of aircraft crews. Extensive reference is made to the configuration of DYASTIMA and DYASTIMA-R, while some preliminary results are also provided.

In **Chapter 4**, the validation of DYASTIMA / DYASTIMA-R is performed according to the reference data provided by the International Radiation Protection Commission (ICRP) and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). This process is a necessary step for all software applications that provide radiation dosimetry calculations for aviation and ensures that the results of these models are accurate, and can be used to assess the cosmic radiation exposure of aircraft crews. The values calculated by DYASTIMA-R are in good accordance with the reference data, and therefore, DYASTIMA / DYASTIMA-R consist a reliable tool for the radiation assessment of aircrews. The results of the validation of DYASTIMA / DYASTIMA-R are also compared with those of other widely known models.

In **Chapter 5**, the results of the DYASTIMA / DYASTIMA-R simulations performed in the framework of this work are presented. Initially, dosimetry calculations are performed during the last two solar cycles 23 and 24 for different atmospheric altitudes and different values of vertical cut-off rigidity. Additionally, simulations have also been performed during extreme Space Weather events, which may pose a potential hazard to both ground, air and space technology systems, as well as to the health of aircraft and spacecraft crews. Then, based on the above results, the radiation doses during various air flights is calculated. Finally, a first attempt to radiation dosimetry calculations in the atmospheres of other planets in our solar system, and more specifically in Venus and Mars, is made.

In **Chapter 6**, the overall results and conclusions of this thesis are presented, and the prospects and future plans of the research with the tool DYASTIMA / DYASTIMA-R are discussed.

At the end, an extensive literature on the subject of the dissertation is provided, as well as a list of the author's publications.

Θεωρητικό Μέρος

1 Κοσμική Ακτινοβολία

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία εκτενής αναφορά όλων των βασικών εννοιών και μεγεθών που σχετίζονται με την κοσμική ακτινοβολία. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των ατμοσφαιρικών καταιγισμών, οι οποίοι είναι αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας στα πλαίσια της διατριβής αυτής. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας και οι μέθοδοι καταγραφής των διαφορών φαινομένων. Τέλος, ορίζεται το γεωδιάστημα και παρουσιάζεται συνοπτικά το καινούριο πεδίο του Διαστημικού Καιρού, και οι επιπτώσεις που επιφέρουν τα φαινόμενα του Διαστημικού Καιρού στα τεχνολογικά και βιολογικά συστήματα.

1.1 Ορισμός

Ως κοσμική ακτινοβολία ορίζεται το σύνολο σωματιδίων πολύ υψηλών ενεργειών ($10^6 - 10^{21}$ eV) με ηλιακή, γαλαξιακή ή εξωγαλαξιακή προέλευση που φτάνουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ρυθμό 1000 σωματιδίων ανά τετραγωνικό μέτρο ανά δευτερόλεπτο (Berezinsky, 1990; Dorman, 2004; Ginzburg and Syrovatsky, 1965; Schlickeiser and Lerche, 2001). Πρόκειται για ιονισμένους πυρήνες, περίπου 90% πρωτόνια, 9% σωματΙΑ-α και 1% βαρύτερους πυρήνες (Mavromichalaki, 2005).

Τα περισσότερα κοσμικά σωματίδια είναι σχεδόν σχετικιστικά, έχοντας κινητική ενέργεια ίδιας τάξης με την ενέργεια ηρεμίας τους. Ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων αυτών, μάλιστα, είναι υπερ-σχετικιστικό, με την ενέργειά τους να ξεπερνά τα 10^{20} eV (περίπου 20 joules), δηλαδή 11 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την ισοδύναμη ενέργεια ηρεμίας ενός πρωτονίου (Gaisser et al., 2016). Τα τελευταία είναι ιδιαίτερα σπάνια με ρυθμό καταγραφής μικρότερο από 1 σωματίο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά αιώνα.

Οι κοσμικές ακτίνες ανακαλύφθηκαν όταν κατά την περίοδο 1911 – 1912, ο Victor Hess, φυσικός Αυστριακής καταγωγής, εκτέλεσε ένα πλήθος πειραμάτων με αερόστατο για τη μέτρηση της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 1.1). Το 1911 το μπαλόνι του έφτασε σε υψόμετρο περίπου 1100 μέτρων, χωρίς όμως να παρατηρήσει κάποια ουσιαστική αλλαγή στην ποσότητα της ακτινοβολίας σε σύγκριση με το επίπεδο του εδάφους. Όμως, στις 7 Αυγούστου 1912, μετά από αρκετές πτήσεις ακόμα, κατάφερε να φτάσει σε ύψος 5300 μέτρων, όπου και ανακάλυψε ότι ο ρυθμός ιονισμού ήταν τρεις φορές υψηλότερος από το επίπεδο της θάλασσας. Έτσι, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διεισδυτική ακτινοβολία εισερχόταν στην ατμόσφαιρα από ψηλά. Ο Hess στην πραγματικότητα ανακάλυψε μια φυσική πηγή σωματιδίων υψηλής ενέργειας: τις κοσμικές ακτίνες. Για το λόγο αυτό, τιμήθηκε με το Βραβείο Nobel το 1936.

Οι μετρήσεις-κλειδί του Hess έπονται άλλων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην κο-



Σχήμα 1.1: Ο Victor Hess στο αερόστατό του το 1912
(<https://home.cern/news/news/physics/cosmic-rays-discovered-100-years-ago>)

ρυφή του Πύργου του Eiffel από τον Theodor Wulf, σε μπαλόνι από τον Albert Gockel, αλλά και υποβρύχια από τον Domenico Pacini. Όλα τα δεδομένα συμφώνησαν με το συμπέρασμα ότι ένα μη αμελητέο τμήμα της διεισδυτικής αυτής ακτινοβολίας ήταν ανεξάρτητο από την άμεση δράση των διάφορων ραδιενεργών ουσιών που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα του γήινου φλοιού. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε στη γέννηση του κλάδου της Σωματιδιακής Φυσικής, ο οποίος αναπτύχθηκε για πολλά χρόνια μελετώντας τις κοσμικές ακτίνες στην ατμόσφαιρα της Γης. Ποζιτρόνια, μίονια, πιόνια και παράξενα σωματίδια ανακαλύφθηκαν από την άμεση ανίχνευση των κοσμικών ακτίνων ή προϊόντων των αλληλεπιδράσεών τους, ενώ χρειάστηκαν πάνω από 4 δεκαετίες προσπάθειας για την αναπαραγωγή έστω και μερικών ενεργειών των κοσμικών ακτίνων.

Αν και η κοσμική ακτινοβολία έχει ανακαλυφθεί πάνω από 100 χρόνια, η προέλευσή της δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστή. Τα σωματίδια με ενέργειες μικρότερες από 10^{10} eV είναι ηλιακής προέλευσης, και για αυτό ονομάζονται ηλιακές κοσμικές ακτίνες. Συνδέονται χρονικά με βίαια γεγονότα στον ήλιο, όπως εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας, και χαρακτηρίζονται από έντονες μεταβολές (Dorman, 2004; Gaisser et al., 2016). Η ροή τους μπορεί να αυξηθεί έως και 100% μέσα σε λίγες ώρες, κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών γεγονότων. Τα σωματίδια με ενέργειες $10^{10} - 10^{14}$ eV προέρχονται κυρίως από πηγές μέσα στο γαλαξία μας, όπως είναι οι εκρήξεις καινοφανών (Novae) ή υπερκαινοφανών αστέρων (Supernovae), οι αστέρες εκλάμψεων, οι παλλόμενοι αστέρες (pulsars) και η διαστρική ύλη. Πρόκειται για τις λεγόμενες γαλαξιακές

κοσμικές ακτίνες, η ένταση των οποίων παρουσιάζει αντισυσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα, ενώ αποτελούν και την πληθώρα κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης. Τέλος, τα σωματίδια με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{14} eV έχουν εξωγαλαξιακή προέλευση, ενώ αυτά με ενέργειες άνω των 10^{19} eV είναι ακόμα και σήμερα άγνωστης προέλευσης, λόγω έλλειψης στατιστικών στοιχείων (Mursula et al., 2003). Πιθανώς, να προέρχονται από πηγές έξω από το γαλαξία μας και να επιταχύνονται σε ραδιογαλαξίες ή ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες.

1.2 Σύσταση Κοσμικής Ακτινοβολίας

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία, αυτή δηλαδή που φτάνει στο όριο της Γήινης ατμόσφαιρας, αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες (Mavromichalaki, 2005). Αυτές είναι οι εξής:

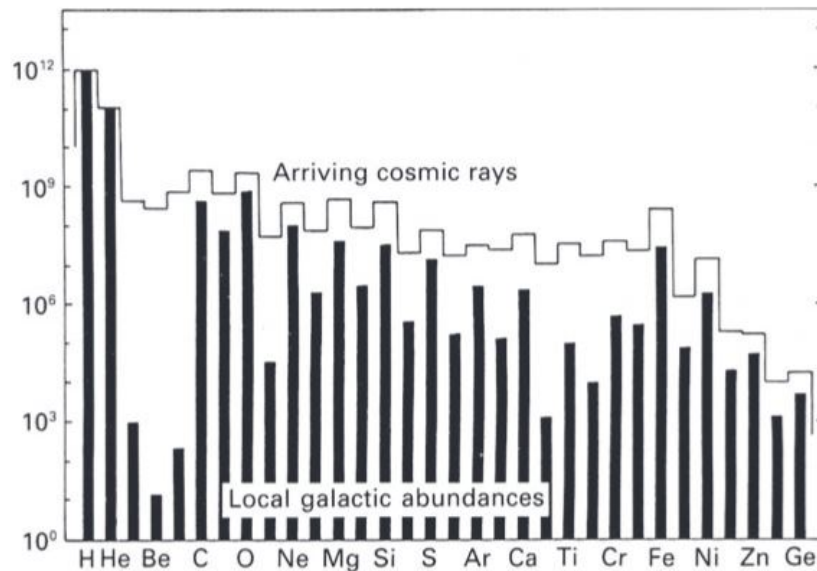
- Ηλιακή κοσμική ακτινοβολία
- Γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία
- Ανώμαλες κοσμικές ακτίνες

Σύμφωνα με πλήθος μετρήσεων και πειραματικών δεδομένων από δορυφόρους και πυραύλους, η σύσταση της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στο σύνολό της είναι κυρίως πρωτόνια (85%), σωματίδια α (5%), λίθιο (Li), βηρύλλιο (Be) και βόριο (B) σε ποσοστό 0.1%, άνθρακας (C), άζωτο (N), οξυγόνο (O) και φθόριο (F) σε ποσοστό 0.42%, σίδηρος (Fe) και άλλα υπερβαρέα υπερουράνια στοιχεία σε ποσοστό 0.04%, αλλά και ηλεκτρόνια, ακτίνες γ και νετρόνια σε ποσοστό 1-2%.

Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή κοσμική ακτινοβολία είναι ενεργητικά σωματίδια, με ενέργειες της τάξης των μερικών εκατοντάδων MeV / νουκλεόνιο, που προέρχονται κυρίως από ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας. Τα σωματίδια αυτά είναι κυρίως πρωτόνια, σωματίδια α σε ποσοστό περίπου 10% καθώς και βαρύτεροι πυρήνες (λιγότερο από 1%).

Η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από πιο ενεργητικά σωματίδια που προέρχονται κυρίως από πηγές εντός του γαλαξία μας. Αυτά είναι κατά βάση πρωτόνια, σωματίδια α (7% - 10%) και βαρύτεροι πυρήνες (περίπου 1%). Πέρα από τους παραπάνω πυρήνες, περιέχονται επίσης ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, ακτίνες γ (1%) και μια πολύ μικρή ροή νετρίνων που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις με τη γαλαξιακή ύλη (Dorman, 2004). Τα σωματίδια με ενέργειες μικρότερες από 1 GeV υφίστανται έντονη ηλιακή διαμόρφωση, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη ροή σε περιόδους ή γεγονότα έντονης ηλιακής δραστηριότητας (Longair, 2011).

Τέλος, οι ανώμαλες κοσμικές ακτίνες προέρχονται από το μεσοαστρικό χώρο πέρα από την ηλιόπαιση και παρουσιάζουν τελείως διαφορετική σύσταση από την ηλιακή και τη γαλαξιακή συνιστώσα. Εδώ επικρατούν τα σωματίδια-α σε σχέση με τα πρωτόνια, αλλά και το οξυγόνο σε σχέση με τον άνθρακα. Παρά το γεγονός ότι κοσμικές ακτίνες με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{12} eV είναι πιθανόν να διατηρήσουν πληροφορίες σχετικά με την κατεύθυνση άφιξής τους στο ηλιακό σύστημα, λόγω των μεταβολών του γαλαξιακού μαγνητικού πεδίου, δεν είναι σε θέση να διατηρήσουν πληροφορίες για την αρχική κατεύθυνση διάδοσής τους και ως εκ τούτου σχετικά με την πηγή προέλευσής τους. Γενικότερα, η κατανομή των διευθύνσεων άφιξης κοσμικών ακτίνων υψηλής ενέργειας είναι εξαιρετικά ομοιόμορφη, με ανισοτροπία να ανιχνεύεται μόνο σε επίπεδο μικρότερο του 0.1%.



Σχήμα 1.2: Σχετικές αφθονίες των στοιχείων της κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας σε σχέση με τις αφθονίες του ηλιακού συστήματος C (Longair, 2011).

Η σύγκριση των χημικών αφθονιών των κοσμικών ακτίνων με τις αφθονίες στο ηλιακό μας σύστημα παρέχει σημαντικές πληροφορίες τόσο για της πηγές όσο και για τους μηχανισμούς διάδοσης των κοσμικών ακτίνων προς τη Γη. Στο σχήμα 1.2, παρουσιάζονται με μπλε χρώμα οι σχετικές αφθονίες των κοσμικών ακτίνων όπως φτάνουν στη γήινη ατμόσφαιρα, και οι σχετικές αφθονίες του ηλιακού συστήματος, με κόκκινο χρώμα. Η κατανομή των στοιχειωδών αφθονιών στην κοσμική ακτινοβολία δεν είναι τόσο διαφορετική από εκείνη των τυπικών αφθονιών του ηλιακού συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως οι κορυφές στα στοιχεία C, N, O, Fe παρουσιάζονται στις αφθονίες τόσο των κοσμικών ακτίνων όσο και του ηλιακού συστήματος. Τα ελαφριά στοιχεία (Li, Be, B) παρουσιάζονται σε υπεραφθονία στην κοσμική ακτινοβολία. Το

Τιμές γ	Ενεργειακή περιοχή
1.6	$10^9 - 10^{15} \text{eV}$
2.2	$10^{15} - 10^{18} \text{eV}$ (γόνατο)
1.6	$> 10^{18} \text{eV}$ (αστράγαλος)

Πίνακας 1.1: Θεωρητικές τιμές του φασματικού εκθέτη γ ως συνάρτηση της ενεργειακής περιοχής των κοσμικών ακτίνων.

ίδιο συμβαίνει και για τα στοιχεία με ατομικό αριθμό και μάζα ελαφρώς μικρότερα από αυτά του Fe και μεγαλύτερα από του Ca (Sc, Ti, V, Cr Mn) (Longair, 2011). Αντίθετα, εμφανίζεται μία έλλειψη H₂ και He σε σχέση με τα πιο βαριά στοιχεία. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διάδοση της κοσμικής ακτινοβολίας στο μεσοαστρικό χώρο, όπου οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες συγκρούονται με τα άτομα και μόρια του μεσοαστρικού χώρου με αποτέλεσμα να παράγονται ελαφρότερα στοιχεία (φαινόμενο θρυμματισμού). Οι αφθονίες των βαρύτερων από το Fe στοιχείων στις κοσμικές ακτίνες είναι όμοιες με αυτές του ηλιακού συστήματος, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα κοσμικά σωματίδια έχουν επιταχυνθεί από υλικό παρόμοιας χημικής σύστασης με αυτό του ηλιακού συστήματος (Mavromichalaki, 2005).

1.3 Ενεργειακό Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας

Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων εκτείνεται από τα 10^6 eV έως τα 10^{22} eV. Το φάσμα αυτό δίνει την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ενέργειας. Η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη από 1 GeV ελαττώνεται έντονα με την αύξηση της ενέργειας. Η σχέση που συνδέει την ένταση με την ενέργεια δίνεται από τον εκθετικό νόμο

$$J(> E) = kE^{-\gamma} \quad (1.1)$$

όπου $J(E)$ η μεταβολή της έντασης των κοσμικών ακτίνων των οποίων οι ενέργειες υπερβαίνουν ένα ορισμένο κατώτερο ενεργειακό όριο E , και k και γ σταθερές. Πιο συγκεκριμένα, η σταθερά γ ονομάζεται φασματικός εκθέτης. Οι θεωρητικές τιμές που μπορεί να πάρει ο φασματικός εκθέτης δίνονται στον Πίνακα 1.1, ενώ οι τιμές που έχουν κριθεί κατάλληλες πειραματικά για τις διάφορες ενεργειακές περιοχές και τα διάφορα είδη σωματιδίων δίνονται στον Πίνακα 1.2.

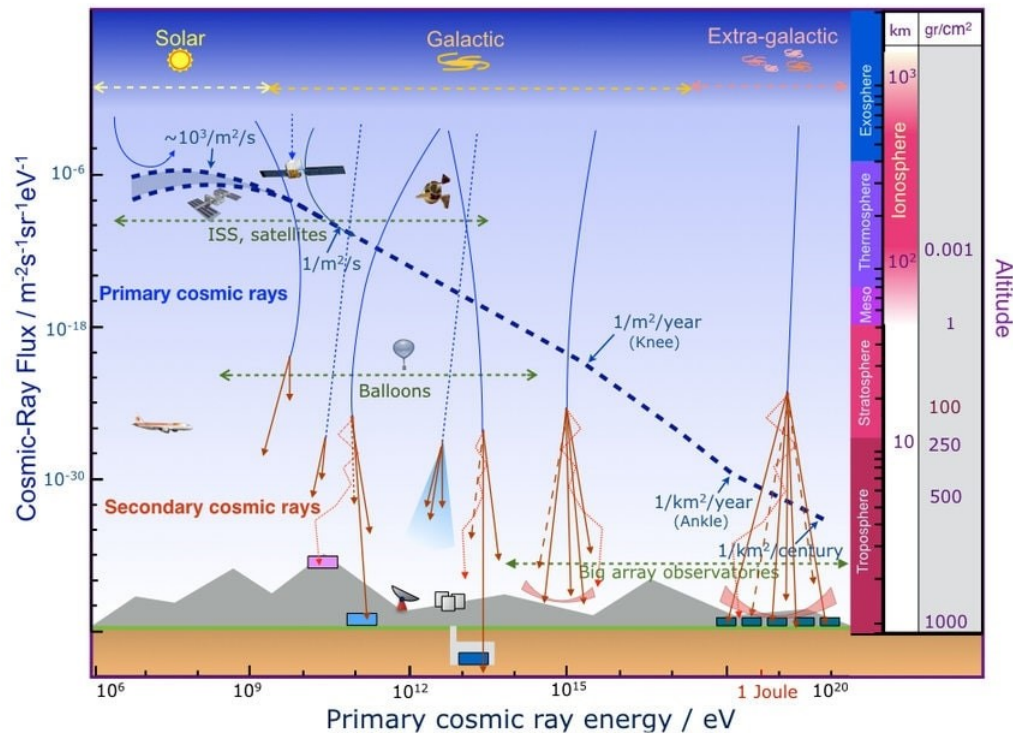
Παρατηρείται ότι η τιμή του εκθέτη δε μεταβάλλεται αισθητά σε ολόκληρο το πεδίο τιμών της ενέργειας της κοσμικής ακτινοβολίας, με εξαίρεση μία μικρή μεταβολή στην περιοχή των $10^{15} - 10^{18}$ eV. Η μεταβολή αυτή οφείλεται πιθανόν στη διαφορετική σύσταση και πηγή των κοσμικών ακτίνων αυτών των ενεργειών.

Τιμές γ	Ενεργειακή περιοχή ανά πυρήνα
~ 2	$(0.5 - 1) \cdot 10^9 eV$
1.9 – 2.2	$(0.35 - 20) \cdot 10^9 eV$ (γόνατο)
~ 2.5	$10^{10} - 10^{12} eV$ (γόνατο)
2.7 – 3	$10^{13} - 10^{18} eV$ (γόνατο)
2.5	$> 2 \cdot 10^9 eV$ (αστράγαλος)

Πίνακας 1.2: Τιμές που αποδίδονται πειραματικά στο φασματικό εκθέτη γ ως συνάρτηση της ενεργειακής περιοχής ανά πυρήνα (Ginzburg, 1974)

Ο λογάριθμος της παραπάνω σχέσης δίνει το ολοκληρωμένο φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας (1.2). Μία αναπαράσταση του ολοκληρωμένου ενεργειακού φάσματος δίνεται στο Σχήμα 1.3. Η κλίση της ευθείας είναι ίση με γ . Για τη μελέτη του ενεργειακού φάσματος απαιτούνται διάφορα είδη ανιχνευτών, τα οποία θα αναφερθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1.8.

$$\log J(E) = f(\log E) \quad (1.2)$$



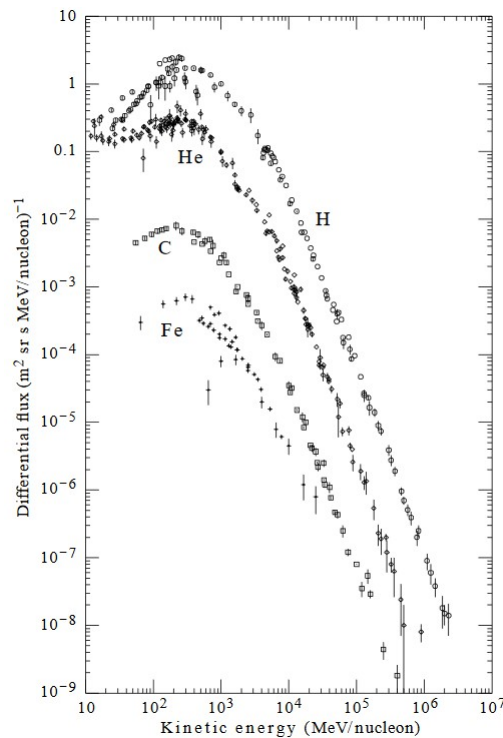
Σχήμα 1.3: Ολοκληρωμένο φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας. Διακρίνονται το ‘γόνατο’ και ο ‘αστράγαλος’, όπου έχουμε μεταβολή του φασματικού εκθέτη (Garzon et al., 2016).

Το φάσμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, διαχωρίζεται στις εξής περιοχές, ανάλογα με την τιμή του (Mursula et al., 2003):

- Η πρώτη περιοχή περιλαμβάνει σωματίδια με ενέργειες $10^6 - 10^{10} \text{ eV}$ (ηλιακή κοσμική ακτινοβολία). Οι κοσμικές ακτίνες εδώ υπόκεινται έντονα σε διαμόρφωση από την ηλιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα το φάσμα να μην ακολουθεί τον εκθετικό νόμο. Η ηλιακή διαμόρφωση ακολουθεί τη σχέση:

$$dJ(E) = -kE^{(\gamma+1)}dE \quad (1.3)$$

και είναι ορατή στο διαφορικό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Διαφορικό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας. Διακρίνεται η ηλιακή διαμόρφωση στις χαμηλές ενέργειες (Simpson, 1983).

- Η δεύτερη περιοχή περιλαμβάνει κοσμικά σωματίδια με ενέργειες $10^{10} - 10^{15} \text{ eV}$ (γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία), με το φασματικό εκθέτη να παίρνει περίπου την τιμή 2.7. Εδώ βρίσκεται και ο κύριος όγκος των κοσμικών ακτίνων.
- Η τρίτη περιοχή ξεκινά περίπου στα 10^{15} eV , όπου αλλάζει απότομα η κλίση με το φασματικό εκθέτη να φτάνει την τιμή του 3.1. Η τιμή αυτή διατηρείται περίπου μέχρι τα 10^{20} eV .

Η περιοχή αυτή όπου παρατηρείται η μεταβολή του φασματικού εκθέτη ονομάζεται γόνατο (knee).

- Η τελευταία περιοχή αφορά ενέργειες μεγαλύτερες των 10^{20} eV, όπου τα κοσμικά σωματίδια αποκτούν εξωγαλαξιακή προέλευση πλέον. Στο σημείο αυτό παρατηρείται πάλι μία μεταβολή του φασματικού εκθέτη, το οποίο ονομάζεται αστράγαλος (ankle). Δυστυχώς, τα δεδομένα στην ενεργειακή αυτή περιοχή είναι αρκετά περιορισμένα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το όριο Greisen - Zatsepin - Kuzmin (GZK), το οποίο καθορίζεται από την επιβράδυνση των αλληλεπιδράσεων των πρωτονίων με την μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου σε μεγάλες αποστάσεις (~ 160 εκατομμύρια έτη φωτός). Πρόκειται για ένα θεωρητικό ανώτατο όριο για την ενέργεια των κοσμικών πρωτονίων φτάνουν στον γαλαξία μας μέσω του διαγαλαξιακού μέσου από άλλους γαλαξίες (Greisen, 1966; Zatsepin and Kuzmin, 1966). Το όριο αντιστοιχεί σε $5 \cdot 10^{19}$ eV ή περίπου 8 joules ή αλλιώς την ενέργεια ενός πρωτονίου που ταξιδεύει με 99.9% την ταχύτητα του φωτός και έχει την ίδια τάξη μεγέθους με το ανώτερο όριο για την ενέργεια πειραματικής ανίχνευσης των κοσμικών ακτίνων.

Το όριο GZK προκύπτει με την υπόθεση ότι οι κοσμικές ακτίνες εξαιρετικά υψηλής ενέργειας είναι στο μεγαλύτερο μέρος τους πρωτόνια. Όμως μετρήσεις από το Παρατηρητήριο Pierre Auger στην Αργεντινή, υποδηλώνουν ότι οι περισσότερες κοσμικές ακτίνες εξαιρετικά υψηλής ενέργειας είναι βαρύτερα στοιχεία (Aab et al., 2017). Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση, το επιχείρημα πίσω από το όριο GZK δεν ισχύει στην αρχικά απλή μορφή του και δεν υπάρχει θεμελιώδης αντίφαση στην παρατήρηση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες που το παραβιάζουν (Watson, 2014). Άλλες θεωρίες προτείνουν ότι οι κοσμικές ακτίνες εξαιρετικά υψηλής ενέργειας παράγονται κοντά στον γαλαξία μας ή ότι η θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας τροποποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα πρωτόνια να μην χάνουν ενέργεια στο δρόμο τους προς τον γαλαξία μας.

Η ενεργειακή πυκνότητα των κοσμικών ακτίνων είναι της τάξης του 0.3 eV/cm^3 , λαμβάνοντας ως μέση ενέργεια $E = 3 \cdot 10^9 \text{ eV}$ και πυκνότητα σωματιδίων $N_p = 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$. Πειραματικά η ενεργειακή πυκνότητα ανέρχεται στο 1 eV/cm^3 . Η μαλακή κοσμική ακτινοβολία (χαμηλές ενέργειες της τάξης 10^9 eV / πυρήνα) παρέχει πληροφορίες για την ηλιακής προέλευσης ακτινοβολία, ενώ αντίστοιχα η σκληρή κοσμική ακτινοβολία (υψηλές ενέργειες $10^9 - 10^{21} \text{ eV}$ / πυρήνα) για το γαλαξιακό και εξωγαλαξιακό χώρο (Mavromichalaki, 2005).

Η μελέτη του ενεργειακού φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας αποτελεί αντικείμενο έρευνας ακόμα και σήμερα. Πολλά πειράματα λαμβάνουν χώρα για τη μέτρηση της ροής σε διάφορες ενεργειακές περιοχές. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διάφορων αριθμητικών προσεγγίσεων και τη μοντελοποίηση του φάσματος. Η γνώση του πρωτογενούς

φάσματος στην κορυφή της ατμόσφαιρας είναι απαραίτητη για την υλοποίηση των προσομοιώσεων και την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών μέσα στην ατμόσφαιρα με το εργαλείο DYASTIMA στα πλαίσια της διατριβής αυτής. Εκτενής περιγραφή των διαθέσιμων υπολογιστικών μοντέλων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του πρωτογενούς φάσματος γίνεται στο Πειραματικό Μέρος.

1.4 Ατμοσφαιρικοί Καταιγισμοί

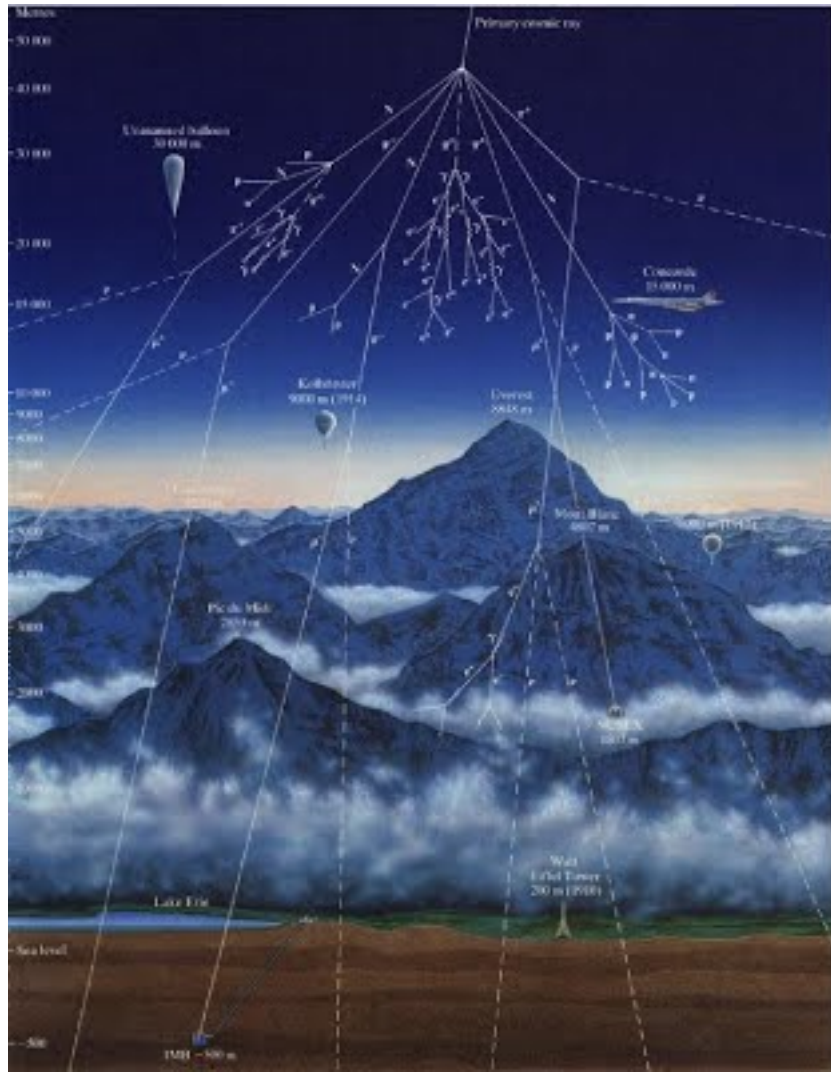
Όταν τα σωματίδια της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας φτάνουν στο ανώτερο όριο της γήινης ατμόσφαιρας, συγκρούονται με τα μόρια της ανώτερης ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέα σωματίδια. Αυτά με τη σειρά τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5, μέσα από μία σειρά φυσικών και χημικών αλληλεπιδράσεων δημιουργούν καταιγισμούς δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα (air-showers). Οι διεργασίες αυτές αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο και μπορεί να είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το φαινόμενο Compton, η δίδυμη γένεση, η εξαύλωση, οι ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις, οι διασπάσεις, ο ιονισμός, η εκπομπή ακτινοβολίας πέδης και η ακτινοβολία Cherenkov (Paschalis et al., 2014).

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες, όπως διακρίνονται και στο Σχήμα 1.6:

- την **αδρονική συνιστώσα** (αποτελείται από αδρόνια, κατά κύριο λόγο πρωτόνια, νετρόνια, πόνια και καόνια και είναι η πιο σταθερή συνιστώσα),
- τη **μιονική ή σκληρή συνιστώσα** (αποτελείται από μίονια και νετρίνα και είναι πάρα πολύ διεισδυτική),
- την **ηλεκτρομαγνητική ή μαλακή συνιστώσα** (αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια).

Ανάλογα με το μέγεθος της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου, θα υπερισχύει ένας από αυτούς τους τρεις μηχανισμούς για τη μετατροπή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας σε δευτερογενή. Οι αντίστοιχοι επίγειοι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή κάθε συνιστώσας είναι οι μετρητές νετρονίων, τα μιονικά τηλεσκόπια και οι εκτεταμμένες συστοιχίες ανιχνευτών, όπως αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Καθώς, λοιπόν, τα πρωτογενή σωματίδια εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, συγκρούονται με τα μόρια της ανώτερης ατμόσφαιρας. Οι αρχικοί αυτοί πυρήνες, μέσω ανελαστικών σκεδάσεων, θρυμματίζονται και παράγονται θραύσματα (μικρότεροι πυρήνες) και άλλα σωματίδια, όπως πρωτόνια, νετρόνια, πόνια (ουδέτερα ή φορτισμένα) και καόνια. Οι δευτερογενείς πλέον πυρήνες

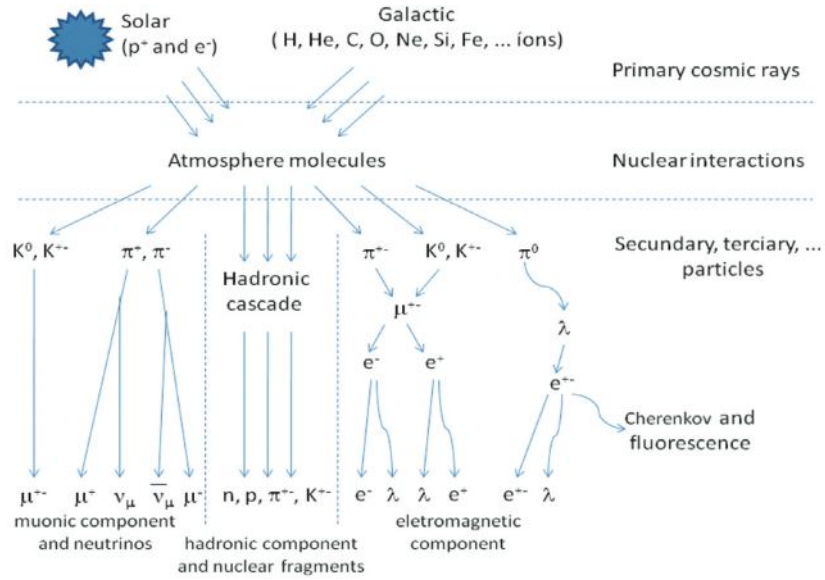


Σχήμα 1.5: Ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί (Πηγή: www.physics.purdue.edu).

καθώς και τα φορτισμένα πιόνια συνεχίζουν και πολλαπλασιάζονται μέσω διαδοχικών συγκρούσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα μόρια της ατμόσφαιρας έως ότου η ενέργεια ανά σωματίδιο να είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη για την παραγωγή πιονίου.

Τα πρωτόνια χάνουν ενέργεια μέσω ιονισμού με τα περισσότερα να ακινητοποιούνται όταν αποκτήσουν ενέργεια μικρότερη από 1 GeV . Τα ουδέτερα πιόνια μετατρέπονται άμεσα σε φωτόνια, λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής μέσω της αντίδρασης:





Σχήμα 1.6: Αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων με την ατμόσφαιρα, δίνοντας έτσι τους δευτερογενείς καταιγιτισμούς. Διακρίνονται οι τρεις συνιστώσες της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (Federico et al., 2010).

Αντίστοιχα, τα φορτισμένα πιόνια μετατρέπονται σε μίονια μέσω των αντιδράσεων:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.5)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.6)$$

Τα καόνια αντίστοιχα διασπώνται σε μίονια και πιόνια με βάση τις αντιδράσεις:

$$K \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.7)$$

$$K \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (1.8)$$

$$K \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (1.9)$$

$$K \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e \quad (1.10)$$

Τα μίονια που παράγονται ουσιαστικά δεν προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις και χάνουν την ενέργειά τους κυρίως μέσω ιονισμού. Τα χαμηλοενεργειακά μίονια μετατρέπονται σε ηλεκτρόνια,

ποζιτρόνια, και μιονικά νετρίνα μέσω των αντιδράσεων:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.11)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.12)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως κάποια μίονια υψηλών ενεργειών παράγονται στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας πριν αρχίσουν ακόμη οι πυρηνικές αντιδράσεις των πιονίων. Έτσι, τα μίονια αυτά, καθώς δεν συμμετέχουν σε πυρηνικές αντιδράσεις, είναι ιδιαίτερα διεισδτικά και παρουσιάζουν μικρές ενεργειακές απώλειες λόγω ιονισμού, φτάνοντας έτσι ακόμα και σε κάποια βάθη κάτω από την επιφάνεια της Γης σχεδόν ανεπηρέαστα.

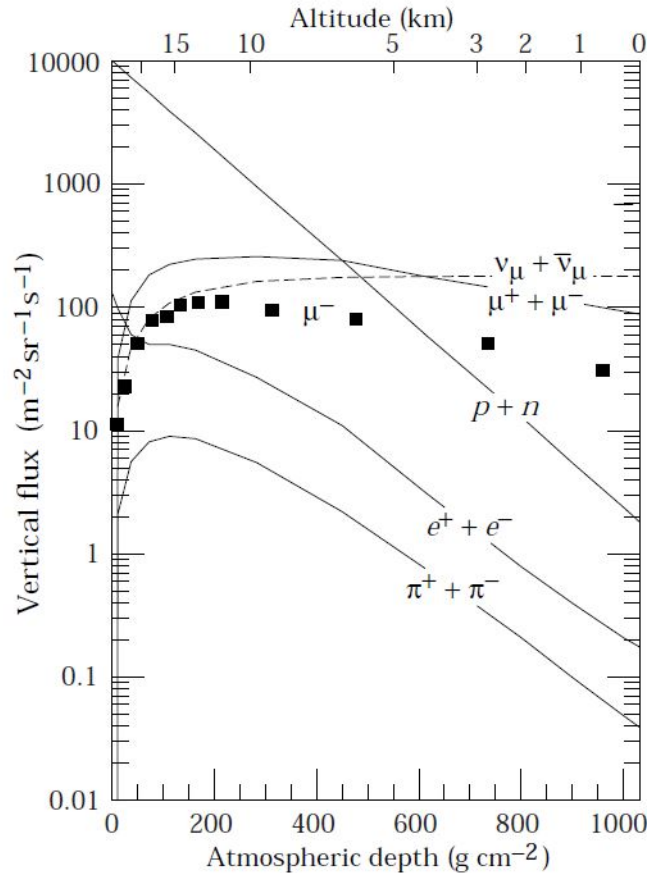
Τα φωτόνια που παράγονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις των ουδέτερων πιονίων, ξεκινούν με τη σειρά τους ηλεκτροφωτονικούς καταγισμούς, μέσω του φαινομένου της δίδυμης γένεσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση:

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.13)$$

Οι ακτίνες γ , πέρα από τη δίδυμη γένεση, μπορεί να δώσουν είτε ηλεκτρόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είτε ακτίνες γ με χαμηλότερη ενέργεια μέσω του φαινομένου Compton. Αντίστοιχα, τα παραγόμενα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια συνεχίζουν τον ηλεκτροφωτονικό καταγισμό, παράγοντας κι άλλα φωτόνια μέσω ακτινοβολίας Bremsstrahlung και ακτινοβολίας Cherenkov, τα οποία ξαναδίνουν τη δίδυμη γένεση. Όταν η ενέργεια των ηλεκτρονίων, των ποζιτρονίων και των φωτονίων πέσει κάτω από το κατώφλι που απαιτείται για τη δίδυμη γένεση, ο ηλεκτροφωτονικός καταγισμός σταματά.

Καθώς η αδρονική συνιστώσα φτάνει στην χαμηλότερη ατμόσφαιρα, η ροή της μειώνεται γρήγορα συναρτήσει του ατμοσφαιρικού βάθους. Τα μίονια, αντίστοιχα, εξαιτίας του σχετικά μεγάλου χρόνου ημιζωής, φτάνουν συχνά στην επιφάνεια της Γης, αποτελώντας μάλιστα το πιο άφθονο είδος δευτερογενών σωματιδίων στην επιφάνεια της θάλασσας (Pomerantz, 1971). Συνοπτικά, στην επιφάνεια της θάλασσας, η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια (1-2%), μίονια (80%) και ηλεκτρόνια (18%) (Mavromichalaki, 2005). Στο Σχήμα 1.7 αναπαριστώνται οι κάθετες ροές των κύριων συστατικών της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, στην ενεργειακή περιοχή όπου τα σωματίδια είναι πιο πολυάριθμα (εκτός από τα ηλεκτρόνια, τα οποία είναι τα περισσότερα κοντά στην περιοχή της κρίσιμης ενέργειά τους στα 81 MeV στον ατμοσφαιρικό αέρα). Εκτός από τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια κοντά στην κορυφή της ατμόσφαιρας, όλα τα σωματίδια παράγονται σε αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων στον αέρα. Τα μίονια και τα νετρίνα είναι προϊόντα της απο-

σύνθεσης των φορτισμένων μεσονίων, ενώ τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια προέρχονται από την αποσύνθεση ουδέτερων μεσονίων. Οι περισσότερες από αυτές τις μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί στο επίπεδο του εδάφους ή κοντά στην κορυφή της ατμόσφαιρας, αλλά υπάρχουν επίσης μετρήσεις μιονίων και ηλεκτρονίων από αεροπλάνα και μπαλόνια (Biermann et al., 1995; Gaisser and Stanev, 1995).



Σχήμα 1.7: Κάθετες ροές κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα με $E > 1\text{GeV}$ (Biermann et al., 1995; Gaisser and Stanev, 1995).

Η μελέτη των δευτερογενών καταιγισμών είναι μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη για την κατανόηση των διαφόρων διεργασιών μέσα στην ατμόσφαιρα που οφείλονται σε γεγονότα κοσμικής ακτινοβολίας και Διαστημικού Καιρού, ενώ αποτελεί και το συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα στην πρωτογενείς κοσμικές διεργασίες στο όριο της ατμόσφαιρας και τις επίγειες παρατηρήσεις από τις διάφορες ανιχνευτικές διατάξεις, μέσω των συναρτήσεων σύζευξης μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Παράλληλα, στα πλαίσια της εφαρμοσμένης έρευνας, η μελέτη των καταιγισμών μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την αξιολόγηση της

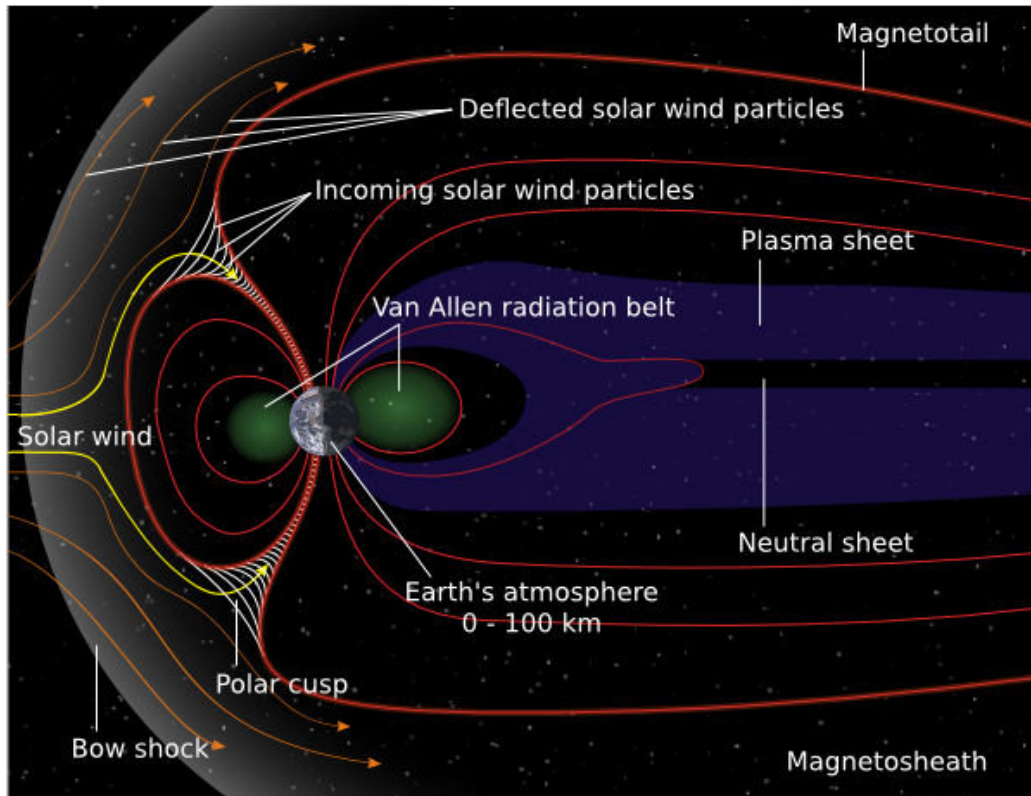
έκθεσης σε ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα, προσφέροντας σημαντικά αποτελέσματα για την ακτινοπροστασία των πληρωμάτων αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών. Στη διατριβή αυτή, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών καταγισμών DYASTIMA (Paschalis et al., 2014) για τον υπολογισμό δόσεων ακτινοβολίας σε διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα.

1.5 Μαγνητόσφαιρα της Γης

Στο ηλιακό μας σύστημα, η στεφανιαία ατμόσφαιρα (solar corona) του Ήλιου είναι ιδιαίτερα δυναμική και ζεστή, με τη θερμοκρασία της να κυμαίνεται στους $10^6 K$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διευρύνεται διαρκώς στο διαστημικό χώρο με τη μορφή ιονισμένης ύλης (πλάσμα), που ονομάζεται ηλιακός άνεμος (solar wind), και αποτελείται κυρίως από 95% ιόντα υδρογόνου και 5% ιόντα ηλίου και ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Καθώς η ιονισμένη ύλη αποτελεί καλό ηλεκτρικό αγωγό, ο ηλιακός άνεμος μεταφέρει μαζί του τα ηλιακά μαγνητικά πεδία στο διάστημα. Έτσι, οι πλανήτες αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά με τον ηλιακό άνεμο με ρεύματα μεγάλης κλίμακας που οδηγούν στον σχηματισμό μαγνητικών κοιλοτήτων γύρω από τους πλανήτες που ονομάζονται μαγνητόσφαιρες (Parks, 2015). Με εξαίρεση τον Άρη και την Αφροδίτη, που δεν έχουν εγγενή μαγνητικά πεδία, όλοι οι πλανήτες στο ηλιακό μας σύστημα περιβάλλονται από μαγνητόσφαιρες.

Το μαγνητικό πεδίο της Γης αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη μαγνητοσφαιρική (μαγνητόσφαιρα) και τη γεωμαγνητική. Το γεωμαγνητικό πεδίο αποτελεί κατά προσέγγιση πεδίο διπόλου και προκύπτει καθαρά από τα ηλεκτρικά ρεύματα που εμφανίζονται στον πυρήνα της Γης και το φλοιό. Εκτείνεται σε απόσταση 4 γήινων ακτίων και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη διακύμανση. Αντίθετα, το μαγνητοσφαιρικό πεδίο προκύπτει από την αλληλεπίδραση του εσωτερικού πεδίου της Γης με τον ηλιακό άνεμο. Η μορφή της μαγνητόσφαιρας της Γης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8. Το κατώτερο όριο της μαγνητόσφαιρας ξεκινά με την ιονόσφαιρα (ionosphere) ύψος περίπου $100 km$, όπου τα ιονισμένα συστατικά παίζουν σημαντικό ρόλο στη δυναμική της ανώτερης ατμόσφαιρας. Το εξωτερικό όριο της μαγνητόσφαιρας ονομάζεται μαγνητόπαυση (magnetopause) και διαχωρίζει τις περιοχές του γεωμαγνητικού πεδίου από τη ροή του ηλιακού ανέμου. Η θέση του ορίου αυτού καθορίζεται από την ισορροπία πίεσης μεταξύ του ηλιακού ανέμου και του μαγνητικού πεδίου της Γης. και μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 20 ακτίες Γης (η μέση ακτίνα της Γης είναι $R_E = 366367 km$). Προς την αντίθετη κατεύθυνση, η μαγνητόσφαιρα παρουσιάζει τη μαγνητική ουρά, η οποία εκτείνεται πέρα από $100 R_E$. Καθώς ο ηλιακός άνεμος διαδίδεται στο διάστημα, η ταχύτητά του αυξάνεται και κοντά στη Γη είναι $\simeq 400 km/sec$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα των κυμάτων Alfven, τα

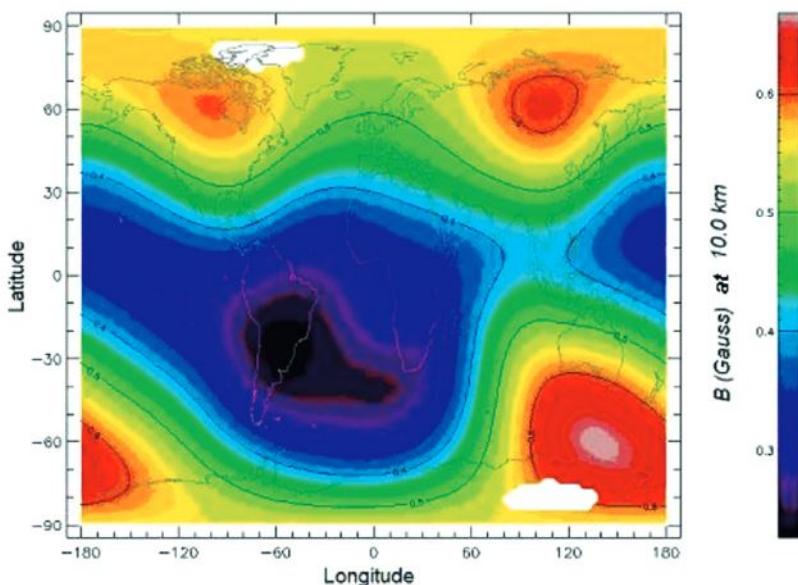
οποία είναι εγκάρσια μαγνητοϋδροδυναμικά κύματα που ταξιδεύουν προς την κατεύθυνση του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός χρουστικού κύματος (shock wave) από τη γήινη μαγνητόσφαιρα, το οποίο αποσυνδέεται και διαχωρίζεται από τη μαγνητόπαυση με σε $1 R_E$ (Parks, 2015). Τέλος, η περιοχή που εκτείνεται πίσω από το χρουστικό κύμα και μέχρι τη μαγνητόπαυση ονομάζεται μαγνητικός μανδύας (magnetosheath). Πρόκειται για μια τυρβώδη περιοχή όπου μειώνεται σημαντικά η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ($\simeq 50 \text{ km/sec}$).



Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση της γήινης μαγνητόσφαιρας (Πηγή: nasa.gov).

Μέσα στη μαγνητόσφαιρα, βρίσκονται επίσης και οι δύο ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, οι οποίες περιέχουν παγιδευμένα ενεργητικά σωματίδια. Η εσωτερική ζώνη Van Allen βρίσκεται σε ύψος περίπου $1000 - 6000 \text{ km}$ ενώ η εξωτερική ζώνη σε ύψος $13000 - 60000 \text{ km}$ (Cottin et al., 2017). Η εσωτερική ζώνη περιέχει ενεργητικά πρωτόνια με ενέργειες έως και 600 MeV και ηλεκτρόνια έως αρκετά MeV που οφείλονται στα κοσμικά νετρόνια που βομβαρδίζουν τη Γη, ενώ η εξωτερική αποτελείται κυρίως από ηλεκτρόνια, με την ύπαρξή της να συνδέεται άμεσα με τον ηλιακό άνεμο και το σέλας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα και να επηρεάζεται άμεσα από γεγονότα Διαστημικού Καιρού (Miroshnichenko, 2003).

Η ατμόσφαιρα της Γης αφαιρεί σωματίδια από τις ζώνες ακτινοβολίας και οι χαμηλές τροχιές γύρω από τη Γη μπορούν να είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένες από παγιδευμένα σωματίδια. Ωστόσο, λόγω της μετατόπισης του διπολικού όρου στο γεωμαγνητικό πεδίο μακριά από το κέντρο της Γης, υπάρχει μια περιοχή στο Νότιο Ατλαντικό όπου η παγιδευμένη ακτινοβολία βρίσκεται σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Ανωμαλία του Νοτίου Ατλαντικού (South Atlantic Anomaly - SSA) και κυριαρχεί στην ακτινοβολία που λαμβάνεται από πτήσεις σε χαμηλές τροχιές γύρω από τη Γη (Σχήμα 1.9). Επιπλέον, οι τροχιές διαστημικών σκαφών με χαμηλή κλίση τέμνουν την εξωτερική ζώνη στα λεγόμενα 'κέρατα', το οποίο αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την έκθεση των πληρωμάτων αεροσκαφών (Federico et al., 2010; Miroshnichenko, 2003).



Σχήμα 1.9: Μαγνητικό πεδίο της Γης σε ύψος 10 km, όπως ελήφθη από το SPENVIS, όπου είναι ευδιάκριτη η ανωμαλία στην περιοχή του Νότιου Ατλαντικού (Federico et al., 2010).

1.6 Μαγνητική Δυσκαμψία

Οι χαμηλότερης ενέργειας κοσμικές ακτίνες εξασθενούν αποτελεσματικά από το γεωμαγνητικό πεδίο, καθώς τα φορτισμένα αυτά σωματίδια διαδίδονται μέσα στη μαγνητόσφαιρα και την ουδέτερη ηλεκτρικά ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει γιατί το γεωμαγνητικό πεδίο, το οποίο περιλαμβάνει το εσωτερικό πεδίο και συνεισφορές από τη μαγνητόσφαιρα, προσφέρει μία θωράκιση, εκτρέποντας έτσι τα φορτισμένα σωματίδια πίσω στο διάστημα μέσω της δύναμης Lorentz. Το

φασματικό αυτό φιλτράρισμα πραγματοποιείται μέσω μιας κανονικής μεταβλητής, της μαγνητικής δυσκαμψίας.

Ας αναλογιστούμε την κίνηση ενός φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η κίνηση αυτή προσδιορίζεται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης κίνησης του Νεύτωνα για ένα φορτισμένο σωματίδιο που υπόκειται στη δύναμη Lorentz. Για ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο, η εξίσωση της κίνησης είναι:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{Ze}{c} \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{cgs}) \quad (1.14)$$

όπου \vec{p} και \vec{v} η ορμή και η ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου, \vec{B} η ένταση του μαγνητικού πεδίου, e η απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου και Z ο αριθμός των ηλεκτρονίων. Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί ισοδύναμα:

$$\frac{R}{B} \frac{d\hat{v}}{dt} = \hat{v} \times \hat{B} \quad (1.15)$$

όπου \hat{v} , \hat{B} τα μοναδιαία ανύσματα της ταχύτητας και της έντασης του μαγνητικού πεδίου και R η μαγνητική δυσκαμψία. Η μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{pc}{Ze} = \left(\frac{A}{Z} \right) \left(\frac{m\gamma v c}{e} \right) \quad (\text{GV}) \quad (1.16)$$

όπου p η σχετικιστική ορμή, Ze το φορτίο του σωματιδίου, m η μάζα του σωματιδίου, γ ο παράγοντας Lorentz, u η ταχύτητα του σωματιδίου, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, και A και Z ο μαζικός και ατομικός αριθμός του στοιχείου αντίστοιχα.

Είναι λοιπόν φανερό πως η μαγνητική δυσκαμψία R αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που καθορίζει την τροχιά που διαγράφει ένα φορτισμένο σωματίδιο κατά τη διέλευσή του μέσα από το διαπλανητικό και γήινο μαγνητικό πεδίο μέχρι τελικά να καταγραφεί στην επιφάνεια της Γης. Σωματίδια που έχουν διαφορετικό φορτίο και μάζα αλλά έχουν την ίδια δυσκαμψία, θα παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου, για δεδομένη ένταση μαγνητικού πεδίου. Σε περίπτωση που δύο σωματίδια έχουν την ίδια κινητική ενέργεια, τότε η μαγνητική δυσκαμψία θα εξαρτάται αποκλειστικά από το λόγο A/Z . Ο λόγος αυτός είναι σταθερός και περίπου ίσος με 2 για στοιχεία μέχρι τον Fe, οπότε τα στοιχεία αυτά θα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά εντός του μαγνητικού πεδίου και συνεπώς παρόμοιο ενεργειακό φάσμα. Για ενέργειες που ξεπερνούν την ενέργεια ηρεμίας των σωματιδίων, η κινητική ενέργεια των σωματιδίων θα ταυτίζεται αριθμητικά με τη μαγνητική δυσκαμψία (Mavromichalaki, 2005).

Οι κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων σε ένα καθαρό μαγνητικό πεδίο διπόλου μελετήθηκαν

ενδελεχώς από τον Stormer (Störmer, 1956). Λόγω της αξιμουθιακής συμμετρίας σε ένα τέτοιο πεδίο, η αξιμουθιακή γωνιακή ορμή αποτελεί διατηρητέα ποσότητα. Κύριο χαρακτηριστικό της θεωρίας αυτής αποτελεί ο καθορισμός οριοθετημένων περιοχών απεριόριστης ή μη κίνησης των σωματιδίων, μέσα από αναλυτικούς υπολογισμούς του ολοκληρώματος κίνησης μέσω διατήρησης της αξιμουθιακής γωνιακής ορμής (Störmer, 1956; VanAllen, 1968). Προκειμένου η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία να διαδοθεί μέσα στο γήινο μαγνητικό πεδίο και να φτάσει στην κορυφή της ατμόσφαιρας σε ένα συγκεκριμένο σημείο, οφείλει να έχει μία μαγνητική δυσκαμψία ίση ή μεγαλύτερη από μία συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από τη θέση του σημείου αυτού μέσα στο γεωμαγνητικό πεδίο. Έτσι, ορίζεται το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας R_c , το οποίο εκφράζει την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχει ένα πρωτογενές κατακόρυφο σωματίδιο ώστε να μπορεί να καταγραφεί από επίγειους μετρητές. Πιο συγκεκριμένα, το R_c δίνεται από τη σχέση:

$$R_c = \frac{\mathcal{M}}{(R_{Earth} + z)^2} \cos^4 \lambda_m \approx 15 \cos^4 \lambda_m \quad (\text{GV}) \quad (1.17)$$

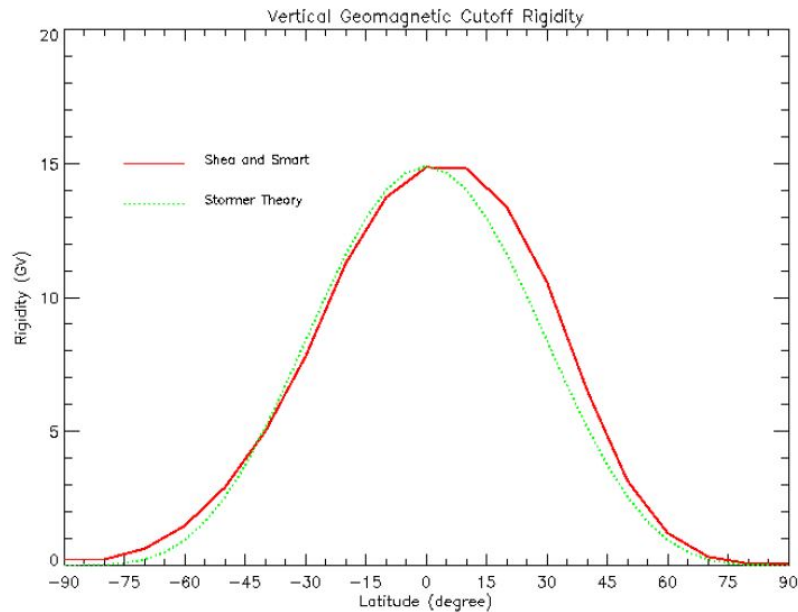
όπου \mathcal{M} η μαγνητική διπολική ροπή της Γης, R_{Earth} η μέση ακτίνα της Γης, z το υψόμετρο και λ_m το μαγνητικό πλάτος. Επομένως, τα κατακόρυφα φορτισμένα σωματίδια με ενέργειες E μικρότερες από την ενέργεια αποκοπής E_c θα εκτρέπονται από τη δύναμη Lorentz και δεν θα φτάσουν στο υψόμετρο z . Η ενέργεια αποκοπής για κάθε φορτισμένο σωματίδιο με ατομικό και μαζικό αριθμό A και Z αντίστοιχα, καθορίζεται από το R_c μέσω της σχετικιστικής εξίσωσης ενέργειας, έτσι ώστε:

$$E_c = \left[\sqrt{R_c^2 \left(\frac{Z}{A} \text{amu } c^2 \right)^2 + 1} - 1 \right] \text{amu } c^2 \quad (1.18)$$

όπου E η κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο (MeV/n), R_c το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας σε MV και $\text{amu} = 931.5 MeV/c^2$. Γίνεται φανερή λοιπόν η λειτουργία του γεωμαγνητικού πεδίου ως ένα φίλτρο αποκοπής σωματιδίων.

Η μεταβολή του R_c στην επιφάνεια της Γης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος δίνεται από τη θεωρία Stormer και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.10. Σημειώνεται πως η μελέτη αυτή γίνεται προσεγγίζοντας το μαγνητικό πεδίο της Γης ως ένα μαγνητικό πεδίο διπόλου. Το κατώφλι R_c θα είναι διαφορετικό για κάθε τόπο πάνω στη Γη και παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από το γεωγραφικό πλάτος. Λόγω της επίδρασης του εξωτερικού γινομένου στη δύναμη Lorentz στη σχέση 1.3, οι κινήσεις των φορτισμένων σωματιδίων που είναι κάθετες προς τις γραμμές μαγνητικού πεδίου θα βιώσουν τη μέγιστη εκτροπή, ενώ τα σωματίδια που κινούνται παράλληλα

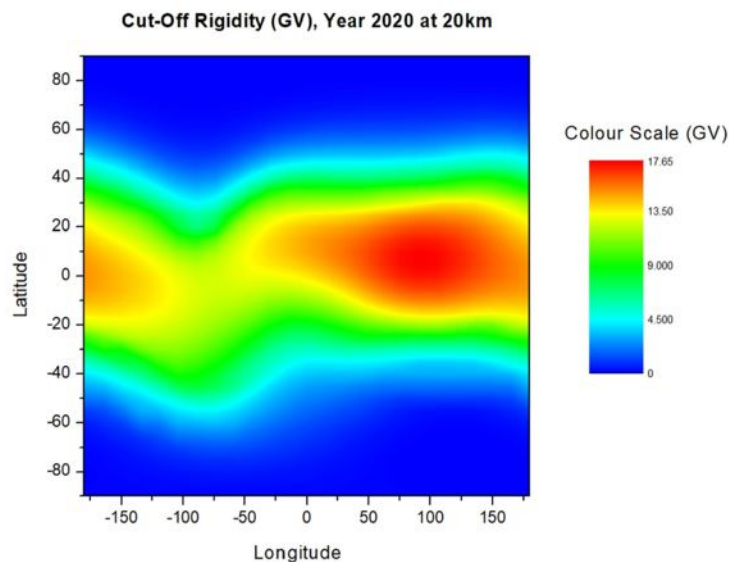
με το μαγνητικό πεδίο δεν θα αποτραπούν. Κυμαίνεται από 0GV στους μαγνητικούς πόλους της Γης έως 15GV στον Ισημερινό, με τη μέγιστη τιμή να αγγίζει περίπου τα 17GV στη νοτιοανατολική Ασία. Στις πολικές περιοχές, τα κατακόρυφα φορτισμένα σωματίδια κινούνται παράλληλα με τις του γραμμές μαγνητικού πεδίου, επομένως το R_c είναι μηδέν. Έτσι, σωματίδια όλων των ενεργειών (ακόμα και με μικρές ενέργειες, δηλαδή ηλιακές κοσμικές ακτίνες) μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης σε αυτήν την περίπτωση και να καταγραφεί υψηλότερη ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Αντίθετα, στις Ισημερινές περιοχές, όπου εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές κατωφλίου, τα κατακόρυφα φορτισμένα σωματίδια κινούνται κάθετα προς τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα ένα πρωτόνιο που φτάνει κάθετα στον Ισημερινό πρέπει να έχει κινητική ενέργεια 15GeV για να καταγραφεί στην επιφάνεια της Γης. Στα μικρότερα δηλαδή γεωγραφικά πλάτη, καθώς τα κοσμικά σωματίδια διέρχονται μέσα από το γεωμαγνητικό πεδίο, αποκόπτονται εκείνα με δυσκαμψία μικρότερη του κατωφλίου.



Σχήμα 1.10: Μεταβολή του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας R_c ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους. Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στην αναλυτική λύση όπως προβλέπεται από τη θεωρία Stormer, ενώ η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στις αριθμητικές λύσεις από τους Shea και Smart (Mertens et al., 2012).

Παρόλ' αυτά, το γεωμαγνητικό πεδίο δεν είναι ένα καθαρό πεδίο διπόλου, με το εσωτερικό πεδίο να έχει διπολικές και μη διπολικές συνεισφορές. Η διπολική ροπή είναι εκτός κέντρου και σχηματίζει γωνία με τον άξονα περιστροφής (tilt), ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και παραμορφώσεις σε μεγάλες αποστάσεις (μεγαλύτερες από $4R_{Earth}$), λόγω αλληλεπίδρασης με τον

ηλιακό άνεμο. Το εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο καθορίζεται από το Διεθνές Γεωμαγνητικό Πεδίο Αναφοράς, ή αλλιώς International Geomagnetic Reference Field (IGRF). Οι τιμές του κατωφλίου R_c , σε ένα ρεαλιστικό γεωμαγνητικό πεδίο, καθορίζονται από αριθμητικές λύσεις των τροχιών φορτισμένων σωματιδίων στο μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιώντας τεχνικές των Smart και Shea (Smart and Shea, 1994, 2005). Στο σχήμα 1.11 φαίνονται οι τιμές του R_c στα 20 km στο εσωτερικό IGRF πεδίο. Οι διαμήχεις μεταβολές στο R_c οφείλονται σε έναν συνδυασμό γεωκεντρικής μετατόπισης και σχετικής κλίσης του μαγνητικού διπόλου, σε σχέση με τον περιστρεφόμενο άξονα και τις μη διπολικές συνεισφορές στο εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο. Με τη σύγκριση των δύο μεθόδων στο Σχήμα 1.10, βλέπουμε ότι η θεωρία Stormer αντιπροσωπεύει αρκετά καλά την εξάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας από το γεωγραφικό πλάτος. Η μετατόπιση της τιμές του R_c από τον Stormer σε σχέση με τις αριθμητικές λύσεις που προκύπτουν από το IGRF οφείλεται στο γεγονός ότι η πραγματική συνεισφορά του διπόλου στο εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο είναι έκκεντρη και εμφανίζει κλίση σε σχέση με τον άξονα περιστροφής.



Σχήμα 1.11: Τιμές του κατωφλίου R_c σαν συνάρτηση των γεωγραφικών συντεταγμένων για το 2020 (Gerontidou et al., 2021).

1.7 Διαμόρφωση Κοσμικής Ακτινοβολίας

Σε γαλαξιακή κλίμακα, η κοσμική ακτινοβολία εμφανίζει μεγάλη ισοτροπία και σταθερότητα. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία αποτελεί την πιο μεγάλη και σταθερή συνιστώσα της, αυτή επηρεάζεται έντονα από την ηλιακή δραστηριότητα μέχρι να φτάσει

στη Γη, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ανισotropίες και μεταβολές στο ενεργειακό φάσμα και την ένταση των κοσμικών ακτίνων με περιοδικό ή μη χαρακτήρα (Axford, 1965; Potgieter, 2013). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλιακή διαμόρφωση της κοσμικής ακτινοβολίας και η επίδρασή του μπορεί να φτάσει ακόμα και σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις των $10 AU$.

Πιο συγκεκριμένα, οι μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας προκαλούν μεταβολή των χαρακτηριστικών του ηλιακού ανέμου, ο οποίος αποτρέπει τα κοσμικά σωματίδια να φτάσουν στη γη μέσω του μαγνητικού πεδίου που μεταφέρει. Όσο πιο έντονα τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η θωράκιση της Γης από την κοσμική ακτινοβολία, καθώς τα γαλαξιακά σωματίδια προσκρούουν στο μεταφερόμενο μαγνητικό πεδίο και ανακλώνται πίσω στο διάστημα, με μηχανισμό παρόμοιο με αυτό της μαγνητικής φιάλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αντι-συσχέτισης μεταξύ της ηλιακής δραστηριότητας και της έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (Forbush, 1958; Parker, 1965), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.12. Επιπροσθέτως, κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών φαινομένων, παρατηρείται και αυξημένη ροή ηλιακών σωματιδίων, που προκαλούν με τη σειρά τους αυξημένους καταγισμούς δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με τη μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από τη σχέση:

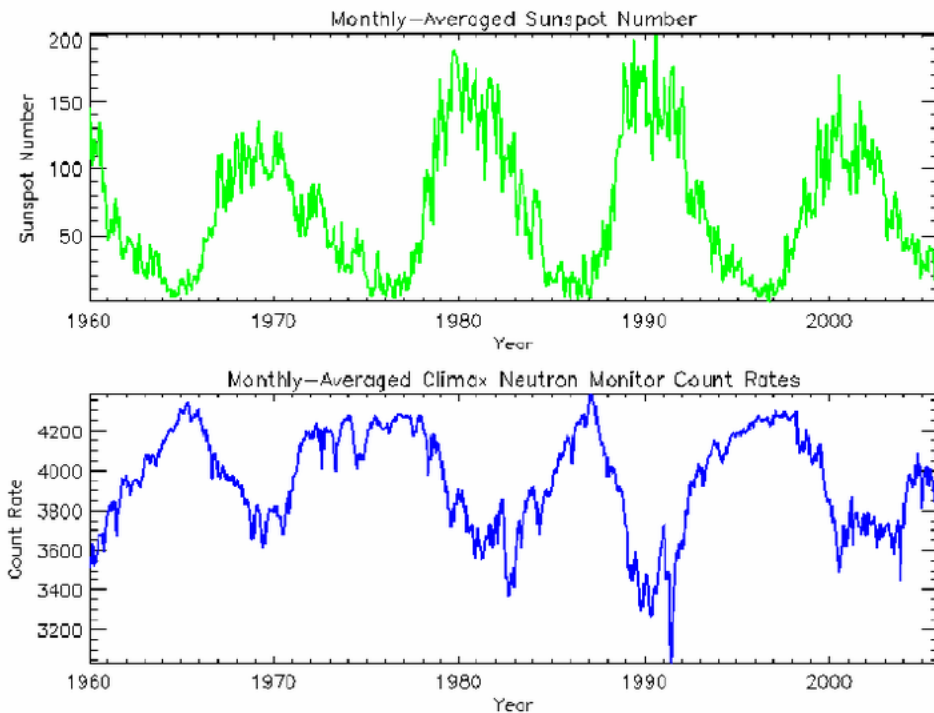
$$\frac{\Delta J(R)}{J(R)} = k R^{-\gamma} \quad (1.19)$$

Η σχέση αυτή δίνει το φάσμα των μεταβολών (variational spectrum). Αν $\gamma = 0$, τότε πραγματοποιείται ίση απορρόφηση της έντασης για τα σωματίδια όλων των δυσκαμψιών. Οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να διακριθούν σε ισότροπες και ανισότροπες. Οι ισότροπες μεταβολές περιλαμβάνουν:

- τον ενδεκαετή κύκλο (Solar Cycle)
- τον 22ετή ηλιακό κύκλο (Hale Cycle)
- τις μειώσεις Forbush
- την 27ήμερη διαμόρφωση

ενώ, αντίστοιχα, οι ανισότροπες μεταβολές περιλαμβάνουν:

- την ημερήσια μεταβολή
- την ημιημερήσια μεταβολή
- άλλες μεταβολές μικρής κλίμακας, όπως επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας.



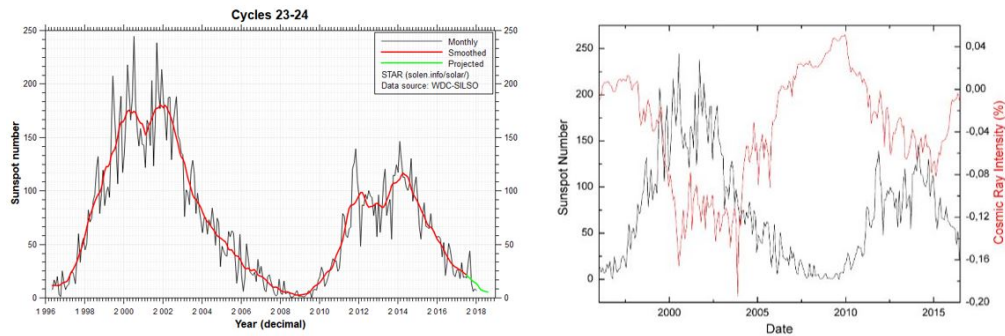
Σχήμα 1.12: Αριθμός ηλιακών κηλίδων και ο ρυθμός καταγραφής της κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση του χρόνου. Είναι ευδιάκριτη η αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στην ηλιακή δραστηριότητα και την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφεται από επίγειους μετρητές νετρονίων για τα έτη 1960-2005 (Mertens et al., 2008).

1.7.1 11-ετής Ηλιακός Κύκλος

Η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει μία περιοδικότητα 11 ετών, με μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή, και χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των ηλιακών εκλάμψεων και των στεμματικών εκπομπών μάζας (Hathaway, 2010). Μέτρο της δραστηριότητας αυτής θεωρείται ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων, με την περιοδικότητα των ηλιακών κηλίδων να αποτελεί ουσιαστικά τον ενδεκαετή Ηλιακό Κύκλο. Η αρίθμηση των ηλιακών κύκλων ξεκίνησε μαζί με την καταμέτρηση των ηλιακών κηλίδων το 1775.

Ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων αυξάνεται στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, οπότε το μαγνητικό πεδίο που μεταφέρεται με τον ηλιακό άνεμο είναι αυξημένο με αποτέλεσμα περισσότερα κοσμικά σωματίδια να εκτρέπονται και να μην καταγράφονται στην επιφάνεια της Γης. Έτσι, παρατηρείται μία αρνητική συσχέτιση ανάμεσα στην ηλιακή δραστηριότητα και την

κοσμική ακτινοβολία, με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της σε περιόδους ηλιακού μεγίστου, και αντίστοιχα τη μέγιστη τιμή της σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.12. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται με μία χρονική υστέρηση κάποιων μηνών. Λόγω του ενδεκαετούς κύκλου, η νουκλεονική συσυστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεταβολή της τάξης του 20% για μαθηνητικές δυσκαμψίες μικρότερες από 1GV, ενώ η μεσονική συσυστώσα παρουσιάζει μικρότερες μεταβολές της τάξης του 5%, με τη μεγαλύτερη διαμόρφωση να λαμβάνει χώρα στις χαμηλές ενέργειες ακόμα και κατά τη διάρκεια ηλιακού ελαχίστου. Βασικός μηχανισμός της ενδεκαετούς διαμόρφωσης είναι ο μηχανισμός μεταφοράς και διάχυσης των κοσμικών ακτίνων.



Σχήμα 1.13: Στα αριστερά δίνεται ο αριθμός ηλιακών κηλίδων για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (Tomona et al., 2017), ενώ στα δεξιά παρουσιάζεται η αντισυσχέτιση της ηλιακής δραστηριότητας με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για το ίδιο χρονικό διάστημα (Lingri et al., 2016a).

Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζονται οι ηλιακοί κύκλοι 23 και 24. Τα δεδομένα που αναφέρονται παρακάτω βασίζονται στον υπολογισμό του εξομαλυνμένου μηνιαίου μέσου αριθμού ηλιακών κηλίδων (www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression). Ο ηλιακός κύκλος 23 ξεκίνησε τον Αύγουστο του 1996 και τελείωσε τον Δεκέμβριο του 2008, με χρονική διάρκεια 12.3 χρόνων. Το μέγιστο παρατηρήθηκε το Νοέμβριο του 2001 με 180.3 ηλιακές κηλίδες. Κατά τη διάρκεια της καθοδικής φάσης του κύκλου (2001-2006) παρατηρήθηκε πλήθος έντονων φαινομένων, όπως επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας, μειώσεις Forbush και μαγνητοσφαιρικά γεγονότα (Eroshenko et al., 2004; Mavromichalaki et al., 2005b).

Κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου ανάμεσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, υπήρξαν συνολικά 817 ημέρες χωρίς ηλιακές κηλίδες, παρατηρήθηκε δηλαδή ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο ελάχιστο τα έτη 2006-2009, με το 2008 και το 2009 να παρουσιάζεται ασυνήθιστα χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα. Λόγω της αρνητικής συσχέτισης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ηλιακή δραστηριότητα, καταγράφηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας κατά το διάστημα αυτό (Paouris et al., 2012).

Ο ηλιακός κύκλος 24 ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2008 και τελείωσε τον Δεκέμβριο του 2019, με την ηλιακή δραστηριότητα να είναι ελάχιστη μέχρι και τις αρχές του 2010. Το πρώτο μέγιστο παρατηρήθηκε το Μάρτιο του 2012 με 98.3 ηλιακές κηλίδες ενώ το δεύτερο και κύριο μέγιστο του κύκλου παρατηρήθηκε τον Απρίλιο του 2014 με 116.4 ηλιακές κηλίδες. Η μέγιστη αυτή τιμή είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τους πρόσφατους ηλιακούς κύκλους, σε επίπεδο που δεν είχε παρατηρηθεί από τους κύκλους 12 έως 15 (1878-1923), κάνοντας τον 24ο Ηλιακό Κύκλο έναν από τους πιο ήρεμους και χαμηλής δραστηριότητας κύκλους (Svalgaard et al., 2005).

1.7.2 22-ετής Ηλιακός Κύκλος

Παρατηρώντας καλύτερα το Σχήμα 1.12, μπορεί κανείς να διακρίνει πως η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει ουσιαστικά μία περιοδικότητα 22 ετών, η οποία σχετίζεται με την αλλαγή πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου (Gnevyshev and Ohl, 1948).

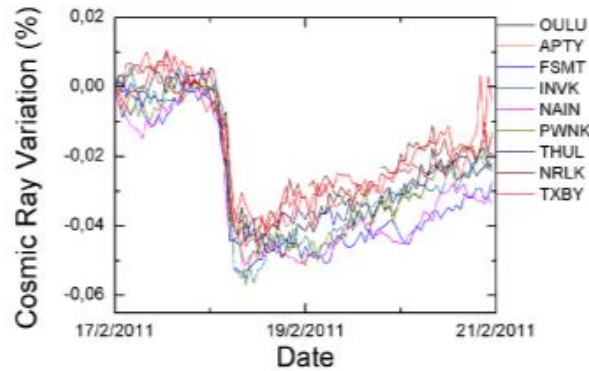
Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από τη διαφορετική μορφολογία των άρτιων και περιττών ηλιακών κύκλων (Mavromichalaki et al., 1997). Πιο συγκεκριμένα, οι άρτιοι κύκλοι παρουσιάζουν δύο μέγιστα, η ροή γίνεται μεγάλη αμέσως μετά το μέγιστο του κύκλου και παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα, παρουσιάζουν απότομη επαναφορά (2-3 χρόνια) και έχουν μικρή χρονική υστέρηση. Αντίθετα, οι περιττοί κύκλοι παρουσιάζουν ένα μέγιστο, η ροή έχει απότομη άνοδος και μέγιστο κοντά στο ελάχιστο του κύκλου, παρουσιάζουν επαναφορά μεγάλης διάρκειας (6-8 χρόνια) και έχουν μεγάλη χρονική υστέρηση αρκετών μηνών.

1.7.3 Μείωση Forbush

Οι μειώσεις Forbush αποτελούν βραχυχρόνες μειώσεις της έντασης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, διάρκειας από αρκετές ώρες έως αρκετές ημέρες (Lingri et al., 2019, 2016b). Η απότομη ελάττωση λαμβάνει χώρα συνήθως εντός μίας έως δύο ημερών και ακολουθείται από μια αργή και σταδιακή επάνοδο, που διαρκεί συνήθως αρκετές ημέρες. Η ανακάλυψή τους έγινε από τον Forbush (Forbush, 1937) και στο σχήμα 1.14 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα.

Για πολλά χρόνια, οι ηλιακές εκλάμψεις αποτελούσαν τους κύριους φυσικούς μηχανισμούς για τη δημιουργία μίας μείωσης Forbush. Όμως, στη δεκαετία του 1970, η πρώτη παρατήρηση των στεμματικών εκπομπών μάζας (Coronal Mass Ejections - CMEs) και των διαπλανητικών ομολόγων τους (Interplanetary Coronal Mass Ejections - ICMEs) άλλαξε το τοπίο, με τις CMEs και τις ταχείς ροές ηλιακού ανέμου να θεωρούνται πλέον ως η επικρατέστερη αιτία δημιουργίας των μειώσεων Forbush (Cane, 2000). Οι μειώσεις Forbush μπορεί να είναι μικρές, με έως 5% μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, αλλά και αισθητά μεγαλύτερες,

αγγίζοντας μειώσεις της τάξης του 25%. Οι τελευταίες συνδέονται με CMEs που συνοδεύονται από κρουστικά κύματα (Mavromichalaki et al., 2005a). Πρόκειται για φαινόμενα εξωγήινης προέλευσης και οφείλονται σε μηχανισμό ανάλογο της ενδεκαετούς μεταβολής.



Σχήμα 1.14: Μία τυπική μείωση Forbush στις 18/11/2011, όπως καταγράφηκε από επίγειους μετρητές νετρονίων (Lingri et al., 2016b).

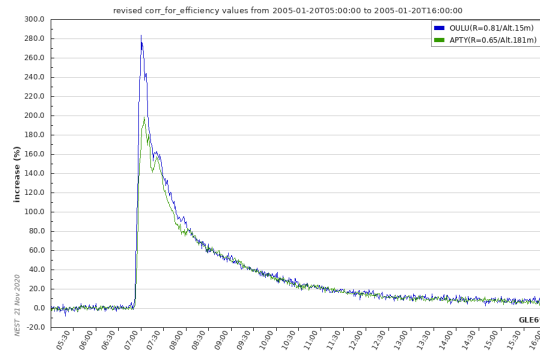
Οι μειώσεις Forbush καταγράφονται από επίγειους μετρητές νετρονίων. Το πλάτος της μείωσης μεταβάλλεται ανάλογα με το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας αλλά και ανάλογα με τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις κάθε σταθμού. Παρατηρούνται πιο έντονα στους γεωμαγνητικούς πόλους, ενώ αυτές που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας είναι συνήθως μικρότερες από αυτές που παρατηρούνται κατά το μέγιστο του ηλιακού κύκλου (Paouris et al., 2012). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι πολλές μειώσεις Forbush λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα με γεωμαγνητικές καταιγίδες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η μείωση Forbush της τάξης του 28% που συνέβη κατά την έντονα διαταραγμένη περίοδο τον Οκτώβριο του 2003 (Βλέπε Halloween Solar Storms), και αποτελεί τη μεγαλύτερη μείωση Forbush του 23ου ηλιακού κύκλου (Belov, 2008; D'Andrea et al., 2009), καθώς και οι δύο μειώσεις Forbush, τον Ιούνιο του 2015, με πλάτος 8.4% και 4% αντίστοιχα, που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια μίας ισχυρής γεωμαγνητικής καταιγίδας (Samara et al., 2018).

1.7.4 Επίγεια Επαύξηση Κοσμικής Ακτινοβολίας

Με τον όρο επίγεια επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement – GLE) ορίζεται μία απότομη αύξηση μικρής διάρκειας στο ρυθμό καταμέτρησης των σωματιδίων που καταγράφονται από επίγειους ανιχνευτές (Belov et al., 2005b; Plainaki et al., 2010). Πρόκειται για ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (Solar Energetic Particles - SEPs) με ενέργειες άνω των 433MeV (ή αλλιώς μαγνητική δυσκαμψία περίπου 1GV), με μόλις περίπου το 15% των ηλιακών

πρωτονικών γεγονότων να μπορεί να παράγει δευτερογενή σωματίδια που καταγράφονται στην επιφάνεια της Γης. Αποτελούν έκτακτα γεγονότα διάρκειας λίγων ωρών, τα οποία είναι ιδιαίτερα σπάνια, με κατά μέσο όρο 10 - 15 γεγονότα ανά ηλιακό κύκλο. Λαμβάνουν χώρα κυρίως κατά το μέγιστο ή την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου, ενώ τα περισσότερα καταγράφονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπου οι δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου είναι πιο ανοιχτές (Plainaki, 2007).

Η συστηματική καταγραφή των γεγονότων αυτών ξεκίνησε από το 1940 και έκτοτε έχουν καταγραφεί συνολικά 71 γεγονότα. Κατά τη διάρκεια του 23ου Ηλιακού Κύκλου, ο οποίος χαρακτηρίζεται από έντονη ηλιακή δραστηριότητα καταγράφηκαν συνολικά δεκαέξι GLEs (GLE55 - GLE70)(Andriopoulou et al., 2011; Gopalswamy et al., 2010), με το GLE69 στις 20 Ιανουαρίου του 2005 (Σχήμα 1.15) να είναι ένα από τα ισχυρότερα γεγονότα που έχουν καταγραφεί (Plainaki et al., 2007), με σχετική αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που άγγιξε το 270%. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του αρκετά ήρεμου 24ου Ηλιακού Κύκλου, καταγράφηκαν μόλις δύο GLEs, το GLE71 στις 17 Μαΐου 2012 (Papaioannou et al., 2013) και το GLE72 στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 (Mavromichalaki et al., 2018), με ποσοστό μεταβολή της έντασης που δεν ξεπέρασε το 16%. Παρά τη χαμηλή συχνότητα εμφάνισής τους, η έγκαιρη και ακριβής πρόβλεψη τέτοιων γεγονότων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα τόσο για τα τεχνολογικά όσο και για τα βιολογικά συστήματα.



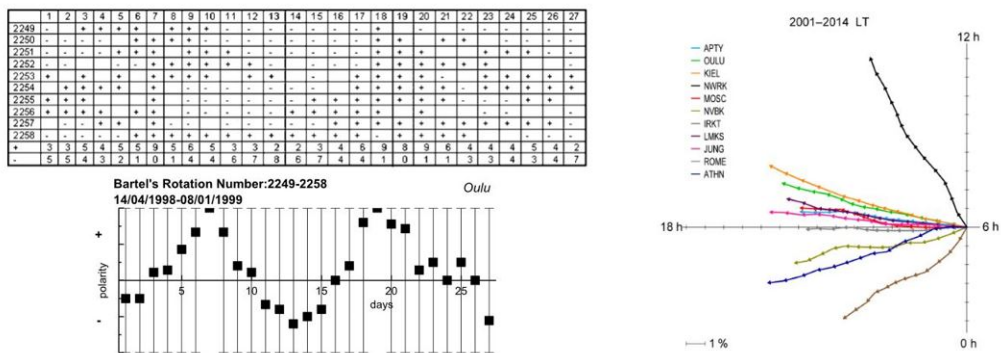
Σχήμα 1.15: Σχετική μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του GLE69, όπως καταγράφηκε από τους μετρητές νετρονίων OULU και APTY.

1.7.5 27-ήμερη Μεταβολή

Η χρονική διάρκεια μιας περιστροφής του Ήλιου γύρω από τον άξονά του (ή αλλιώς Bartel rotation) είναι 27 ημέρες, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται και μία ανάλογη 27-ήμερη διαμόρφωση στην κοσμική ακτινοβολία (Mavromichalaki et al., 2016). Ο άξονας του ηλιακού μαγνητικού

πεδίου δεν ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής του Ήλιου, με τον ηλιοσφαιρικό μανδύα κατά μήκος του ηλιακού μαγνητικού ισημερινού, να διαχωρίζει τις μαγνητικές γραμμές με αντίθετη πολικότητα. Ο μανδύας περιστρέφεται μαζί με τον Ήλιο με περίοδο 27 ημερών κατά μέσο όρο, κατά τη διάρκεια των οποίων, η Γη βρίσκεται άλλοτε πάνω και άλλοτε κάτω από τον ηλιοσφαιρικό μανδύα.

Έτσι, ένα παρατηρητής που βρίσκεται σταθερά στο ίδιο ημισφαίριο της Γης για χρονικό διάστημα 27 ημερών δύναται να παρατηρήσει τη σπειροειδή κατά τομείς δομή του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή την εναλλαγή πολικότητας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που περιστρέφεται με τον Ήλιο 4 φορές (Σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.16: Στα αριστερά παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ της μέσης ημερήσιας πολικότητας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κάθε ημέρας κατά τη διάρκεια των 27 ημερών για τις περιστροφές μάρων Bartel rotations No. 2249-2258 από τη χρονική περίοδο 14 Απριλίου 1998 έως 8 Ιανουαρίου 1999, όπου είναι ευδιάκριτοι οι 4 τομείς διαφορετικής πολικότητας (Mavromichalaki et al., 2016), ενώ στα δεξιά δίνεται μία αναπαράσταση των ανυσμάτων της ημερήσιας ανισοτροπίας σε τοπικό χρόνο για 11 μετρητές νετρονίων για τη χρονική περίοδο 2001-2014 (Tezari et al., 2016).

1.7.6 Ημερήσια Ανισοτροπία

Η ημερήσια ανισοτροπία της κοσμικής ακτινοβολίας αποτελεί μία ανισοτροπική βραχύχρονη μεταβολή τοπικού χρόνου. Το φαινόμενο αυτό, περιοδικότητας 24 ωρών, οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της και συνεπώς την περιστροφή του ασυμπτωτικού κώνου υποδοχής σωματιών κάθε σταθμού καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια της γης, ενώ ο μηχανισμός δημιουργίας της είναι απόρροια της θεωρίας μεταφοράς και διάχυσης (Tezari and Mavromichalaki, 2016; Tezari et al., 2016).

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ημερήσιας ανισοτροπίας είναι το πλάτος και η φάση, δηλαδή η μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας εντός ενός εικοσιτετραώρου και η ώρα που παρατηρήθηκε αυτό. Η αναπαράσταση της ημερήσιας ανισοτροπίας

γίνεται συνήθως με τη χρήση πολικών διαγραμμμάτων πρόσθεσης ανυσμάτων, όπου το μήκος κάθε ανύσματος αντιστοιχεί στο πλάτος του φαινομένου και η γωνία στη φάση (Σχήμα 1.16). Λόγω της μικρής χρονικής κλίμακας, το φαινόμενο αυτό δεν επηρεάζει την μακρόχρονη διαμόρφωση ούτε και τα γεγονότα Διαστημικού Καιρού.

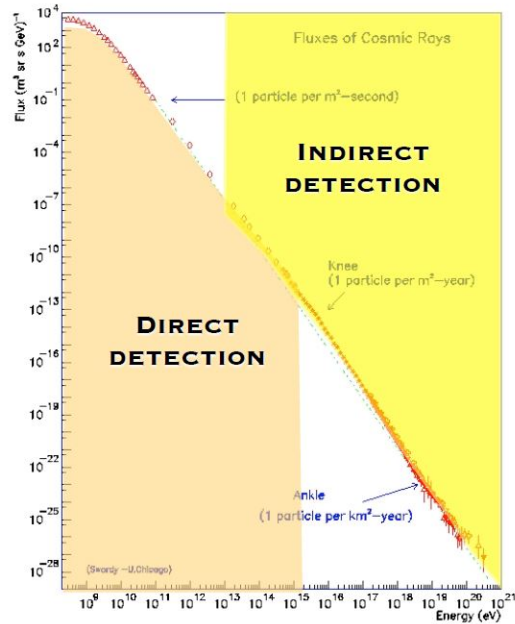
1.8 Καταγραφή Κοσμικής Ακτινοβολίας

Η καταγραφή και καταμέτρηση των κοσμικών ακτίνων αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα σύγχρονα επιστημονικά προβλήματα, λόγω της φύσης τους αλλά και του ιδιαίτερα ευρέως ενεργειακού τους φάσματος. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας προσεγγίζεται είτε άμεσα, με συσκευές τοποθετημένες σε στρατοσφαιρικά μπαλόνια και δορυφόρους, είτε έμμεσα, με όργανα που βρίσκονται στο έδαφος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.17).

Πιο συγκεκριμένα, η κοσμική ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας παρουσιάζει υψηλή ροή (περίπου $1/m^2sec$) αλλά απορροφάται στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Για το λόγο αυτό, η καταγραφή τους γίνεται άμεσα στην κορυφή της ατμόσφαιρας ή στο διαστημικό χώρο με μπαλόνια, πυραύλους και δορυφόρους. Αντίθετα, οι κοσμικές ακτίνες υψηλών ενεργειών είναι πιο σπάνιες ($1/km^2year$), αλλά διεισδύουν μέχρι το έδαφος μέσω ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Έτσι, η παρατήρηση και καταγραφή τους γίνεται με έμμεσο τρόπο μέσω επίγειων ανιχνευτικών διατάξεων και τηλεσκοπίων (Boezio et al., 2020). Οι επίγειες αυτές ανιχνευτικές διατάξεις τώρα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας που καταμετρούν. Έτσι, για την καταγραφή της νουκλεονικής συνιστώσας χρησιμοποιούνται ευρέως οι μετρητές νετρονίων, για τη μεσονική συνιστώσα χρησιμοποιούνται επίγειοι ή υπόγειοι ανιχνευτές μιονίων, και τέλος για τη μαλακή συνιστώσα χρησιμοποιούνται ανιχνευτές Cherenkov. Η κατανομή των διατάξεων αυτών στην επιφάνεια της Γης φαίνονται στο Σχήμα 1.18.

1.8.1 Μπαλόνια και Δορυφόροι

Η μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας πραγματοποιούνταν στην αρχή μόνο μέσω επανδρωμένων μπαλονιών (1912-1932). Οι μετρήσεις γίνονταν κυρίως με ηλεκτροσκόπια ή θαλάμους ιονισμού, σχετικά απλοϊκά δηλαδή όργανα. Ένα βήμα εμπρός πραγματοποιήθηκε την περίοδο 1932-1947 με τα μπαλόνια να φτάνουν πλέον στη στρατόσφαιρα, με επανδρωμένες πτήσεις σε καμπίνες υπό πίεση μέχρι τα 23 km και συσκευές ραδιοφωνικής μετάδοσης μέχρι τα 30 km. Αρχισαν να χρησιμοποιούνται όλο και πιο σύνθετες συσκευές, όπως μετρητές Geiger-Müller, συνήθως με κάποιον απορροφητή μολύβδου, για ανίχνευση ιονισμού και φωτογραφικά γαλακτώματα για ιχνηλάτηση. Μία νέα εποχή ξεκίνησε το 1947, όπου η χρήση πλαστικού έκανε δυνατή την

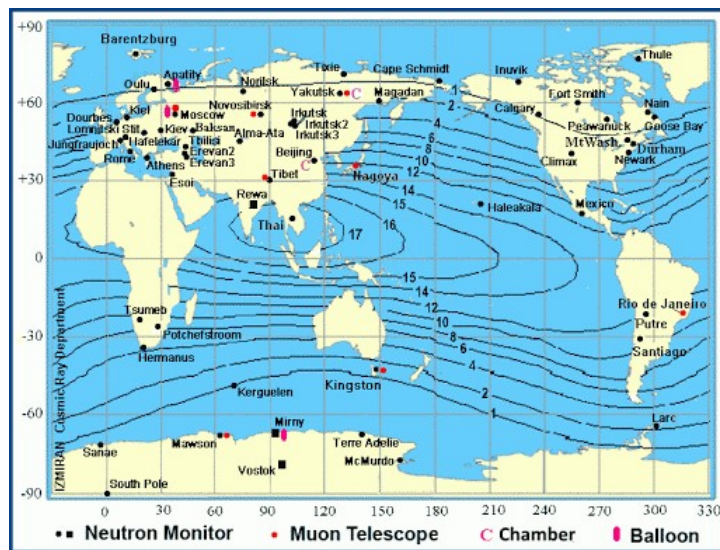


Σχήμα 1.17: Άμεση και έμμεση καταγραφή των κοσμικών ακτίνων (Ghia, 2020a).

κατασκευή πολύ μεγάλων αλλά ταυτόχρονα ελαφριών μπαλονιών, ικανών να αντέξουν βαριά ωφέλιμα φορτία, όπως θαλάμους αερίου.

Στη νεότερη γενιά πειραμάτων, τα δεδομένα καταγράφονται ηλεκτρονικά κατά την πτήση και μεταδίδονται στο έδαφος, ενώ περιλαμβάνονται σπινθηριστές, ανιχνευτές πυριτίου και θερμοδόμετρα (Ghia, 2020a,b). Ένα τέτοιο μπαλόνι φαίνεται και στο Σχήμα 1.19. Μερικά από τα κυριότερα εγχειρήματα όπου χρησιμοποιήθηκαν μπαλόνια για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων είναι τα ακόλουθα:

- ANITA (*Antarctic Impulse Transient Array*)
- BESS (*Balloon-borne Experiment with a superconducting Solenoid Spectrometer*)
- BETS (*Balloon borne Electron Telescope with Scintillating fibers*)
- CAPRICE (*Cosmic AntiParticle Ring Imaging Cherenkov Experiment*)
- CREAM (*Cosmic Ray Energetics and Mass Balloon Experiment*)
- HEAT (*High Energy Antimatter Telescope*)
- JACEE (*Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment*)
- RUNJOB (*RUssian-Nippon JOint Balloon Experiment*)



Σχήμα 1.18: Παγκόσμιο δίκτυο για τη συνεχή καταγραφή γαλαξιακών και ηλιακών κοσμικών ακτίνων, που περιλαμβάνει μετρητές νετρονίων, μετρητές μιονίων, θαλάμους ιονισμού και ραδιοβολήσεις. Οι καμπύλες αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας (σε GV) για τα πρωτογενή κοσμικά σωματίδια (Πηγή: <http://cr0.izmiran.ru/>).

- SMILI (*Superconducting Magnet Instrument for Light Isotopes*)
- TRACER (*Transition Radiation Array for Cosmic Energetic Radiation*)



Σχήμα 1.19: Παράδειγμα στρατοσφαιρικού μπαλονιού από το πείραμα TRACER (Πηγή: <http://stratocat.com.ar/>).

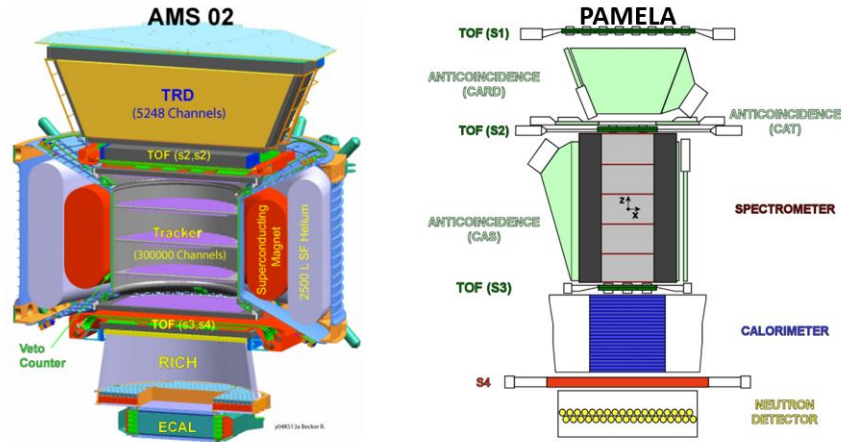
Από το τέλος της δεκαετίας του '50, η ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας έδωσε τη δυνατότητα εκτόξευσης βαρέων δορυφόρων με επιστημονικό εξοπλισμό βάρους αρκετών τόνων. Το πρώτο πείραμα κοσμικής ακτινοβολίας με χρήση δορυφόρων οργανώθηκε από τη Σοβιετική Ένωση το 1957, ενώ την ίδια χρονιά εκτοξεύτηκε και ο πρώτος Αμερικανικός δορυφόρος Explorer I, με τον οποίο έγινε η ανακάλυψη των ζωνών ακτινοβολίας της Γης. Τα όργανα που

χρησιμοποιήθηκαν την πρώτη φορά ήταν οι απλοί μετρητές Geiger–Müller. Η μελέτη συνεχίστηκε με τη σειρά μικρών δορυφόρων Proton (1965-1968), με κυριότερο όργανο ένα θερμιδόμετρο ιονισμού (Ghia, 2020a,b). Τα συστήματα αυτά εξελίσσονται καθημερινά, με μερικούς από τους σημαντικότερους σύγχρονους δορυφόρους να παρουσιάζονται παρακάτω:

- ACE (Advanced Composition Explorer), αποστολή κυρίως για ηλιακά σωματίδια
- AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), το οποίο έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί ως εξωτερική μονάδα στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό. Στοχεύει κυρίως στην αναζήτηση αντιύλης, αλλά θα πραγματοποιεί και μετρήσεις ακριβείας της σύνθεσης και της ροής των κοσμικών ακτίνων (Σχήμα 1.20).
- ASCA (*Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics*)
- Fermi Gamma-ray Space Telescope
- GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ηλιακών εκλάμψεων και γεωμαγνητικών καταιγίδων.
- NINA (*New Instrument for Nuclear Analysis*), για ανίχνευση κοσμικών ακτίνων χαμηλής ενέργειας.
- PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), το οποίο βρίσκεται στον δορυφόρο Resurs-DK1. Σχεδιάστηκε για να μετρηθούν με ακρίβεια τα φάσματα των φορτισμένων σωματιδίων (συμπεριλαμβανομένων των ελαφρών πυρήνων) των κοσμικών ακτίνων, για ενέργειες που κυμαίνονται από δεκάδες MeV σε αρκετές εκατοντάδες GeV, ενώ έχει βελτιστοποιηθεί για την αναγνώριση του μικρού συστατικού των αντισωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας (Σχήμα 1.20).
- SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), για τη μελέτη του Ήλιου και την καταγραφή σωματιδίων που οφείλονται σε ηλιακά εκρηκτικά γεγονότα.

1.8.2 Επίγειες Διατάξεις

Η έμμεση καταγραφή της κοσμικής ακτινοβολίας απαιτεί τη χρήση διαφόρων ειδών ανιχνευτικών διατάξεων, όπως οπτικούς ανιχνευτές (για τη μέτρηση ακτινοβολίας Cherenkov και φωτός φθορισμού), ραδιοανιχνευτές (για την ανίχνευση ραδιο-εκπομπών) και ανιχνευτές σωματιδίων. Οι τελευταίοι μπορεί να είναι θάλαμοι ιονισμού (Resistive Plate Chambers-RPCs), σπινθηριστές



Σχήμα 1.20: Σχηματική αναπαράσταση των επιμέρους στοιχείων των δορυφόρων AMS (αριστερά) και PAMELA (δεξιά) (Ghia, 2020a,b).

με φωτοπολλαπλασιαστές και ανιχνευτές Cherenkov για ανίχνευση ηλεκτρονίων, φωτονίων και μιονίων, αλλά και θερμιδόμετρα για ανίχνευση μιονίων και αδρονίων. Οι ανιχνευτές αυτοί μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης, υπόγεια ή υποθαλάσσια, και καθένας χρησιμοποιείται μόνος ή σε συνδυασμό για συγκεκριμένες περιοχές του ενεργειακού φάσματος των κοσμικών ακτίνων.

Μερικές από τις σημαντικότερες αυτές διατάξεις είναι οι εξής:

- EAS-TOP πάνω από το εργαστήριο Gran Sasso στην Ιταλία (1990-2000) για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες $10^{14} - 10^{16}$ eV.
- HiRes (*High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector*) για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{18} eV.
- ICECUBE, πείραμα του CERN στην Ανταρκτική για την ανίχνευση κοσμικών νετρίνων (Σχήμα 1.21)..
- ICETOP, που είναι τοποθετημένο πάνω από το ICECUBE για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες $10^{14} - 10^{17}$ eV.
- KASCADE (*KArlsruhe Shower Core and Array DEtector*) και KASCADE-GRANDE, για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες $10^{14} - 10^{18}$ eV.
- MILAGRO (*Multiple Institution Los Alamos Gamma Ray Observatory*), το οποίο αποτελεί υδάτινο πείραμα με ανιχνευτές Cherenkov για φωτόνια και κοσμικές ακτίνες υψηλών ενεργειών.

- Παρατηρητήριο Pierre Auger στην Αργεντινή, για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{18} eV (Σχήμα 1.21).
- Telescope Array, το οποίο αποτελεί πείραμα παγκόσμιας συνεργασίας στην έρημο της Utah (ΗΠΑ), ειδικά σχεδιασμένο για την παρατήρηση των ατμοσφαιρικών καταγισμών από κοσμική ακτινοβολία εξαιρετικά υψηλής ενέργειας.
- Tibet AS-gamma experiment, για την ανίχνευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες 10^{13} – 10^{15} eV.



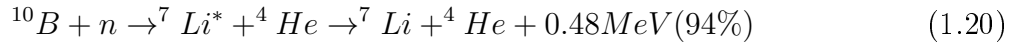
Σχήμα 1.21: Παρατηρητήριο Νετρίνων ICECUBE (αριστερά) και το Παρατηρητήριο Pierre Auger (δεξιά) (Πηγή: <https://icecube.wisc.edu/> και <https://www.auger.org/>).

1.8.3 Μετρητές Νετρονίων

Οι μετρητές νετρονίων αποτελούν την πιο διαδεδομένη επίγεια ανιχνευτική διάταξη για την καταγραφή της νουκλεονικής συνιστώσας της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και αποτελούν ίσως τον πιο αποτελεσματικό τρόπο καταγραφής της κοσμικής ακτινοβολίας σε όλη την περιοχή μαγνητικών δυσκαμψιών του πρωτογενούς κοσμικού φάσματος. Ο πρώτος μετρητής νετρονίων τύπου IGY κατασκευάστηκε το 1958 από τον J. A. Simpson (Simpson, 1958, 2000). Η εξέλιξη αυτού ήρθε λίγα χρόνια μετά, όταν το 1964 ο H. Carmichael κατασκεύασε τον καθιερωμένο πλέον SuperMonitor NM-64 (Carmichael, 1964). Ο ρυθμός καταμέτρησης του NM-64 είναι κατά 3.3 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του IGY στην ίδια οριζόντια επιφάνεια (Hatton and Carmichael, 1964).

Η αρχιτεκτονική αυτών των δύο μετρητών είναι παρόμοια. Έτσι, ένας μετρητής νετρονίων αποτελείται από έναν αναλογικό θάλαμο αερίου (gas-filled proportional counter), ο οποίος με τη σειρά του περιβάλλεται από τον επιβραδυντή (moderator), τον παραγωγό (producer) τον ανακλαστήρα (reflector), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.22. Ο θάλαμος αερίου περιέχει αέριο

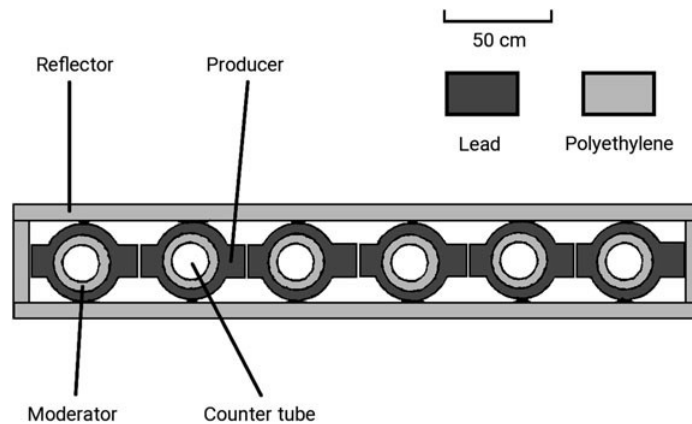
BF_3 εμπλουτισμένο με ^{10}B σε ποσοστό 96%, σε πίεση 0.25 atm. Τα δευτερογενή νετρόνια της νουκλεονικής συνιστώσας απορροφώνται από το μετρητή και μέσω μιας νέας σειράς καταγίγισμών μέσα στον ανιχνευτή (φαινόμενο ‘χιονοστιβάδας’) δημιουργούνται δευτερογενή νετρόνια, ο αριθμός των οποίων βρίσκονται σε πλήρη αναλογία με τα εισερχόμενα γεγονότα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση του παλμού που παρατηρείται. Τα υψηλής ενέργειας νετρόνια, ύστερα από μερικές συγκρούσεις, ελαττώνουν την ταχύτητά τους, μετατρέπονται σε θερμικά με ενέργειες περίπου 0.025 eV, και τελικά καταγράφονται από το μετρητή. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στις εξής αντιδράσεις (Hatton, 1971):



Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό B είναι εμπλουτισμένο κατά 80% σε ^{11}B και μόλις 20% σε ^{10}B . Παρόλ’ αυτά, το ^{10}B έχει πολύ μεγαλύτερη ενεργό διατομή. Έτσι, ο εμπλουτισμός του ανιχνευτή με ^{10}B συντελεί σημαντικά στην αύξηση της απόδοσής του. Όπως φαίνεται και από τις αντιδράσεις (1.20), (1.21), καθώς το νετρόνιο αντιδρά με το ^{10}B παράγονται ενεργητικά ιόντα 7Li και 4He . Το Li παράγεται στο μεγαλύτερο ποσοστό σε διεγερμένη κατάσταση και στη συνέχεια αποδιεγείρεται εκλύοντας ενέργεια 0.48MeV στο περιβάλλον. Τα ιόντα αυτά απορροφούν ηλεκτρόνια από τα ουδέτερα άτομα του μετρητή. Το φορτίο που παράγεται καταγράφεται από έναν ενισχυτή κι έναν διευκιρινητή, κι έτσι πραγματοποιείται μία μέτρηση. Το πλήθος των αναλογικών απαριθμητών που χρησιμοποιούνται δεν είναι καθορισμένο.

Ο επιβραδυντής περιβάλλει τον αναλογικό απαριθμητή και μέσω του φαινομένου του θερμαλισμού (thermalisation), μειώνει την ταχύτητα των νετρονίων και τα μετατρέπει σε θερμικά, χωρίς να απαιτείται μεγάλος αριθμός συγκρούσεων. Είναι κατασκευασμένος από υλικό χαμηλού μοριακού βάρους και χαμηλού ατομικού αριθμού. Στην περίπτωση του Super NM-64 χρησιμοποιείται πολυαιθυλένιο με πάχος 2cm ενώ στον ανιχνευτή τύπου IGY χρησιμοποιείται παραφίνη με πάχος 3.7cm. Για να έχουμε αυξημένο πλήθος νετρονίων που φτάνει στον επιβραδυντή, και συνεπώς και στον απαριθμητή, είναι απαραίτητος ένας παραγωγός σωματιδίων. Ο παραγωγός εκμεταλλεύεται το φαινόμενο του θρυμματισμού (spallation), όπου υπάρχει παραγωγή πολλών δευτερογενών σωματιδίων, κυρίως νετρονίων, όταν υποατομικά σωματίδια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού (Plainaki, 2007). Και στους δύο τύπους ανιχνευτών χρησιμοποιείται ως υλικό μόλυβδος υψηλής καθαρότητας 99%, το οποίο έχει υψηλό μοριακό βάρος και υψηλό ατομικό αριθμό, και συνεπώς μεγάλους πυρήνες - στόχους που διευκολύνουν το βομβαρδισμό. Τέλος,

όλο το σύστημα τοποθετείται μέσα σε ένα ορθογώνιο κουτί, κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό με τον επιβραδυντή, τον ανακλαστήρα. Ο ανακλαστήρας απορροφά και ανακλά τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας από το περιβάλλον, αφού λόγω του χαμηλού ατομικού αριθμού του υλικού, πραγματοποιούνται ελαστικές σκεδάσεις που μειώνουν άμεσα την ενέργεια των ανεπιθύμητων σωματιδίων. Οι πιο καινούριοι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούν πλέον αέριο ^3He , έναντι του BF_3 , χωρίς να μεταβάλλεται η αρχή λειτουργίας τους (Stoker et al., 2000).



Σχήμα 1.22: Σχηματική αναπαράσταση ενός μετρητή νετρονίων τύπου 6NM-64 (Bütikofer, 2018).

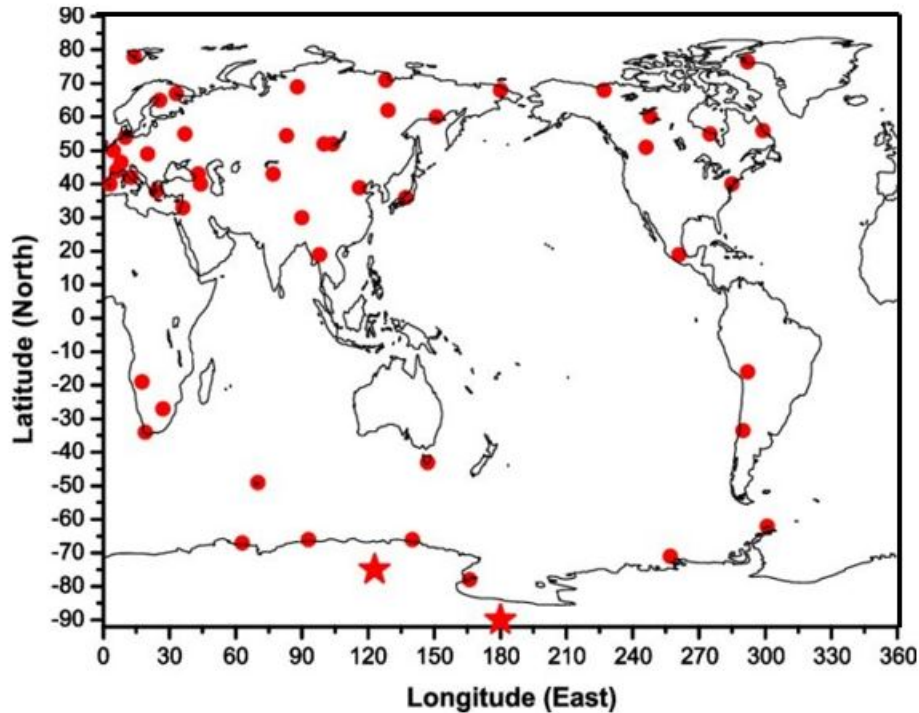
Τα πλεονεκτήματα των μετρητών νετρονίων είναι τα ακόλουθα:

- Έχουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια, η οποία επιτρέπει την καταγραφή κοσμικών σωματιδίων υψηλών ενεργειών, αλλά και πρακτικά την καταγραφή του μεγαλύτερου τμήματος του φάσματος της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς καταγράφουν τη ροή των κοσμικών ακτίνων που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης. Η ενεργειακή αυτή περιοχή δεν καταγράφεται από δορυφόρους, οι οποίοι ξεκινούν να καταγράφουν περίπου από την τιμή των 500 MeV /νουκλεόνιο.
- Έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και βρίσκονται τοποθετημένοι στο έδαφος. Αυτό τους καθιστά εύκολα προσβάσιμους, δίνοντας τη δυνατότητα οικονομικής συντήρησης ή αναβάθμισης. Ενδεικτικά το αέριο σε ένα μετρητή νετρονίων επαρκεί για συνεχόμενη λειτουργία άνω των 100 ετών.
- Είναι ιδιαίτερα σταθεροί στις μετρήσεις τους, λειτουργώντας για μεγάλα χρονικά διαστήματα παρέχοντας συνεχόμενες χρονοσειρές δεδομένων, χωρίς ιδιαίτερες διακοπές. Αξιίζει να σημειωθεί πως η βάση δεδομένων τους σήμερα καλύπτει μία χρονική περίοδο άνω των 60 χρόνων.

- Έχουν υψηλό ρυθμό καταγραφής κοσμικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλοι για τη μακρόχρονη μελέτη των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (π.χ. 11ετής κύκλος) αλλά και για τη μελέτη έκτακτων ηλιακών φαινομένων (π.χ. GLEs).
- Αποτελούν ένα παγκόσμιο εκτεταμένο δίκτυο. Οι μετρητές νετρονίων είναι τοποθετημένοι σε διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος τιμών κατώφλιου μαγνητικής δυσκαμψίας και ασυμπτωτικών διευθύνσεων άφιξης των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων, λειτουργώντας έτσι ως ένα παγκόσμιο δίκτυο καταγραφής των φαινομένων της κοσμικής ακτινοβολίας.

Κάθε σταθμός μέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας R_c , με αποτέλεσμα να μπορεί να καταγράφει σωματίδια που προέρχονται από ένα περιορισμένο τμήμα της ουράνιας σφαίρας, δηλαδή ενός τμήματος του πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος στο όριο της ατμόσφαιρας (Mavromichalaki, 2005). Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων. Σήμερα το δίκτυο αυτό αριθμεί πάνω από 120 μετρητές νετρονίων, με διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες και κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας, από 0 GV στις πολικές περιοχές (Σκανδιναβία, Σιβηρία, Βόρεια Αμερική, Ανταρκτική) έως 17 GV στον Ισημερινό (Νοτιοανατολική Ασία). Το πλήρες σύνολο δεδομένων όλων των δεδομένων μετρητών νετρονίων συλλέγεται στο World Data Center on Cosmic Rays (WDC-CR) (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDC-CR/>). Ένα τέτοιο παγκόσμιο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του ενεργειακού φάσματος των κοσμικών ακτίνων, τον προσδιορισμό της ροής ηλιακών νετρονίων, τη μελέτη τόσο των ισοτροπικών όσο και των ανισοτροπικών μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς και για τη μελέτη και πρόβλεψη φαινομένων Διαστημικού Καιρού. Πιο συγκεκριμένα, οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη (χαμηλό κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας) είναι ιδανικοί για τη μελέτη επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs), ενώ οι σταθμοί που βρίσκονται σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, όπως για παράδειγμα ο Σταθμός της Αθήνας, για τη μελέτη μαγνητοσφαιρικών γεγονότων.

Μέχρι το 1997, τα δεδομένα από τους μετρητές νετρονίων δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα, ενώ πολλές φορές η επεξεργασία τους μπορούσε να ξεπεράσει τον ένα χρόνο. Ως αποτέλεσμα, δεν ήταν δυνατή η άμεση μελέτη και πρόβλεψη των διάφορων φαινομένων και χαρακτηριστικών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Η λύση στο πρόβλημα αυτό ήρθε με την εγκατάσταση σύγχρονων μετρητών νετρονίων με εξελιγμένα υπολογιστικά συστήματα, τα οποία έδωσαν τη δυνατότητα λειτουργίας σε ‘πραγματικό χρόνο’ (“real-time”). Αυτό έδωσε τη δυνατότητα άμεσης επεξεργασίας, διόρθωσης και διάθεσης των δεδομένων στην επιστημονική κοινότητα. Η λειτουργία ‘πραγματικού χρόνου’ δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα, παρά μόνο σε ένα μέρος του



Σχήμα 1.23: Τρέχουσα κατάσταση του Παγκόσμιου Δικτύου Μετρητών Νετρονίων (Mishev et al., 2017). Με τον κύκλο απεικονίζονται οι μετρητές νετρονίων, ενώ με αστέρι οι δύο πολικοί σταθμοί με μεγάλο υψόμετρο (DOME C / SOPO).

συνόλου των μετρητών νετρονίων παγκοσμίως (περίπου 35 σήμερα). Η ανάγκη για άμεση διάθεση των δεδομένων ενός μετρητή και απευθείας σύγκριση με δεδομένα από τους υπόλοιπους μετρητές, οδήγησε στη δημιουργία μία υψηλής ανάλυσης βάσης δεδομένων μετρητών νετρονίων “Neutron Monitor Database – NMDB” (<http://www01.nmdb.eu/>), όπου συλλέγονται δεδομένα από ένα μεγάλο μέρος των μετρητών νετρονίων (περίπου 50) (Mavromichalaki et al., 1993).

1.8.4 Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ

Ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Athens Neutron Monitor Station - A.Ne.Mo.S.) ξεκίνησε τη λειτουργία του από το 1970 με έναν μετρητή τύπου 3NM-64, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Α. Αποστολάκη. Από το 2001, υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Ε. Μαυρομιχαλάκη, πραγματοποιήθηκε αναβάθμιση και εκσυγχρονισμός του συστήματος σε 6NM-64 (6 αναλογικοί απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Neutron Counter) σε λειτουργία ‘πραγματικού χρόνου’, όπως φαίνεται και στο σχήμα

1.24.

Η εγκατάσταση του μετρητή πραγματοποιήθηκε σε χώρο ειδικά διαμορφωμένο και ενισχυμένο ώστε να αντέξει το τεράστιο βάρος του συστήματος, που φτάνει περίπου τους 10 τόνους, στην ταράτσα του κτιρίου του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ στην Πανεπιστημιούπολη Ζωγράφου. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού είναι $37^{\circ}58' \text{ N} - 23^{\circ}47' \text{ E}$ και υψόμετρο μόλις 260 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς βρίσκεται σε μεσαίο γεωγραφικό πλάτος καθορίζεται από ένα σχετικά υψηλό κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας $R_c = 8.53 \text{ GV}$, το οποίο τον καθιστά ιδανικό για τη μελέτη μαγνητοσφαιρικών γεγονότων (όπως για παράδειγμα το Νοέμβριο του 2003), την εκτίμηση του ενεργειακού ορίου των σωματιδίων σε μεγάλα πρωτονικά γεγονότα, καθώς και τη διόρθωση των δεδομένων άλλων σταθμών λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων (π.χ. χιόνι). Είναι ο μοναδικός σταθμός παγκοσμίως που παρέχει ιδιαίτερα υψηλής ανάλυσης δεδομένα με resolution έως και 1 sec.



Σχήμα 1.24: Ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, όπου διακρίνονται οι 6 αναλογικοί απαριθμητές.

Πρόκειται μέχρι σήμερα για το μοναδικό σταθμό στην περιοχή των Βαλκανίων και την ανατολική Μεσόγειο. Αποτελεί ένα από τα ιδρυτικά μέλη του NMDB και έναν από τους πρώτους σταθμούς παγκοσμίως (μόλις τέταρτος) που μπήκαν σε λειτουργία 'πραγματικού χρόνου' (Dorman et al., 2004; Mariatos et al., 2005; Mavromichalaki et al., 2005b). Η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας έχει αναπτύξει πλήθος αλγορίθμων, εργαλείων και υπηρεσιών για τη μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας και την έγκαιρη και έγκυρη πρόβλεψη φαινομένων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία είναι διαθέσιμα μέσω της ιστοσελίδας του σταθμού (<http://cosray.phys.uoa.gr/>).

Επίσης, συμμετέχει ως expert group στο European Space Agency (ESA) Space Situational

Awareness Space Weather Service Centre Network, όπου παρέχει σε καθημερινή βάση υπηρεσίες και εφαρμογές, όπως το GLE-Alert (Mavromichalaki et al., 2007; Souvatzoglou et al., 2014), το Multi-Station και το DYASTIMA (Paschalis et al., 2014). Παράλληλα, εκδίδει καθημερινά Δελτίο Πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού, ενώ πρόσφατα, υπεγράφη πρωτόκολλο συνεργασίας με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ).

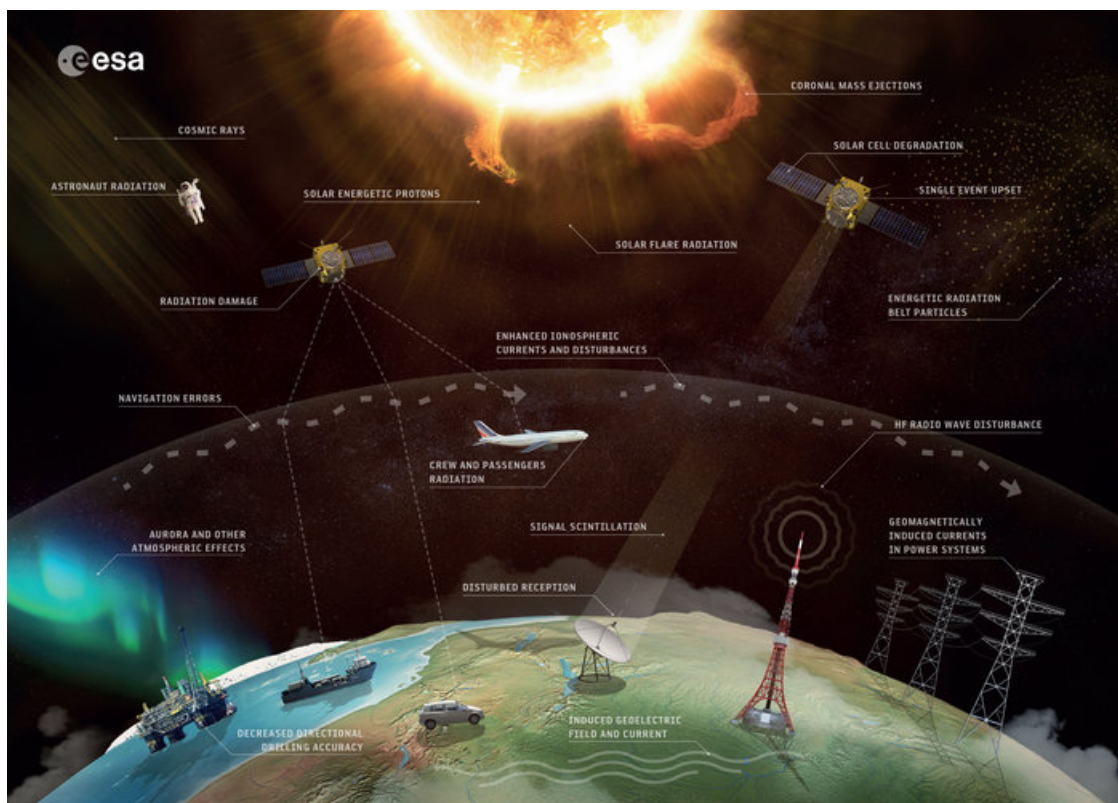
1.9 Διαστημικός Καιρός και Γεωδιάστημα

Ως γεωδιάστημα μπορεί να οριστεί η περιοχή του εξώτερου χώρου κοντά στη Γη. Πιο συγκεκριμένα, αυτό περιλαμβάνει την ανώτερη ατμόσφαιρα, τη μεσόσφαιρα, τη θερμόσφαιρα, την ιονόσφαιρα έως και τη μαγνητόσφαιρα της Γης και εκτείνεται έως την κορώνα, την φωτόσφαιρα και την ηλιακή χρωμόσφαιρα. Ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια χαμηλής πυκνότητας, μαγνητικά πεδία και το περιβάλλον ακτινοβολίας από τον Ήλιο έως την ατμόσφαιρα της Γης είναι τα στοιχεία που συνθέτουν το γεωδιάστημα. Πρόκειται ουσιαστικά για τον χώρο εκείνο που αναπτύσσεται το σύνολο των σχέσεων και δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ Ηλίου και Γης (solar-terrestrial interactions). Το γεωδιάστημα επηρεάζεται άμεσα από τις μεταβολές του Διαστημικού Καιρού.

Ο όρος Διαστημικός Καιρός αναφέρεται στις συνθήκες που επικρατούν στον ήλιο, καθώς και στη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα της Γης, λόγω φαινομένων ηλιακής και γαλαξιακής προέλευσης (Baker, 1998, 2002; Bothmer and Daglis, 2007; Echer et al., 2006). Τα φαινόμενα αυτά είναι σε θέση να μεταβάλλουν τις συνθήκες που επικρατούν στο γεωδιάστημα και συνεπώς να επηρεάσουν την απόδοση και την αξιοπιστία των διαστημικών και επίγειων τεχνολογικών συστημάτων αλλά και να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή ή υγεία, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.25. Όλα αυτά δημιουργούν την ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των φαινομένων αυτών αλλά και για έγκαιρη και έγκυρη πρόβλεψη των μεταβολών του Διαστημικού Καιρού, με τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού να είναι ίσως το πιο διεπιστημονικό πεδίο της εποχής αυτής (Bothmer and Daglis, 2007).

Οι κυριότερες μεταβολές και επιδράσεις του Διαστημικού Καιρού οφείλονται στον Ήλιο, με μία μικρότερη επιρροή από τις γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες εκτός του ηλιακού συστήματος (Hanslmeier, 2010; Schwenn, 2002). Τα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τις μεταβολές του Διαστημικού Καιρού είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Coronal Mass Ejections - CMEs). Απόρροια των φαινομένων αυτών είναι οι:

- **Διακοπές των Ραδιοεπικοινωνιών** (Radio Blackouts), που οφείλονται στις ηλιακές εκλάμψεις,



Σχήμα 1.25: Η επίδραση του Διαστημικού Καιρού στο γεωδιάστημα (<https://swe.ssa.esa.int/>).

- **Ηλιακές Καταιγίδες (Solar Storms)**, που οφείλονται στα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια που επιταχύνονται από τις ηλιακές εκλάμψεις,
- **Γεωμαγνητικές Καταιγίδες (Geomagnetic Storms)**, που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των τλ^αΜΕς με τη μαγνητόσφαιρα της Γης.

Σύμφωνα με το National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) των ΗΠΑ κάθε είδος από τις παραπάνω επιδράσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 5 επιμέρους κατηγορίες, με βάση την ένταση και τη σφοδρότητα των επιπτώσεων. Η κατηγοριοποίηση αυτή δίνεται παρακάτω στα Σχήματα 1.26, 1.27 και 1.28.

Άλλα φαινόμενα περιλαμβάνουν την ενεργοποίηση των ζωνών ακτινοβολίας Van Allen, τις ιονοσφαιρικές διαταραχές, τις εξάρσεις ραδιοσημάτων μεταξύ δορυφόρου και εδάφους, το σέλας και τα επαγόμενα γεωμαγνητικά ρεύματα στην επιφάνεια της Γης.

Ο όρος Διαστημικός Καιρός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν έγινε πλέον εμφανές ότι ο αντίκτυπος του διαστημικού περιβάλλοντος στα τεχνολογικά και βιολογικά συστήματα απαιτούσε ένα πιο συντονισμένο πλαίσιο έρευνας και

Scale	Description	Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
R 5	Extreme	HF Radio: Complete HF (high frequency) radio blackout on the entire sunlit side of the Earth lasting for a number of hours. This results in no HF radio contact with mariners and en route aviators in this sector. Navigation: Low-frequency navigation signals used by maritime and general aviation systems experience outages on the sunlit side of the Earth for many hours, causing loss in positioning. Increased satellite navigation errors in positioning for several hours on the sunlit side of Earth, which may spread into the night side.	X20 (2×10^{-3})	Less than 1 per cycle
R 4	Severe	HF Radio: HF radio communication blackout on most of the sunlit side of Earth for one to two hours. HF radio contact lost during this time. Navigation: Outages of low-frequency navigation signals cause increased error in positioning for one to two hours. Minor disruptions of satellite navigation possible on the sunlit side of Earth.	X10 (10^{-3})	8 per cycle (8 days per cycle)
R 3	Strong	HF Radio: Wide area blackout of HF radio communication, loss of radio contact for about an hour on sunlit side of Earth. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for about an hour.	X1 (10^{-4})	175 per cycle (140 days per cycle)
R 2	Moderate	HF Radio: Limited blackout of HF radio communication on sunlit side, loss of radio contact for tens of minutes. Navigation: Degradation of low-frequency navigation signals for tens of minutes.	M5 (5×10^{-5})	350 per cycle (300 days per cycle)
R 1	Minor	HF Radio: Weak or minor degradation of HF radio communication on sunlit side, occasional loss of radio contact. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for brief intervals.	M1 (10^{-5})	2000 per cycle (950 days per cycle)

Σχήμα 1.26: Κατηγοριοποίηση των διακοπών των ραδιοεπικοινωνιών και επιπτώσεις τους στα τεχνολογικά συστήματα (Πηγή: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

εφαρμογής, με πρώτη υλοποίηση από το National Space Weather Program των ΗΠΑ το 2000. Από τότε πολλά κέντρα και οργανισμοί ασχολούνται με τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού (Mavromichalaki et al., 2006). Ενδεικτικά μπορούμε να αναφερθούμε σε κάποιες υπηρεσίες, όπως είναι το GLE Alert και το FLARECAST. Το GLE Alert, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, αποτελεί ένα σύστημα ειδοποίησης για GLEs και βασίζεται σε δεδομένα από μετρητές νετρονίων (Souvatzoglou et al., 2014). Το FLARECAST αντίστοιχα αποτελεί ένα σύστημα πρόβλεψης ηλιακών εκλάμψεων που βασίζεται σε δεδομένα του ηλιακού κύκλου 24 από το Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) στην αποστολή Solar Dynamics Observatory (SDO) (Florios et al., 2018). Η πρόβλεψη των ηλιακών εκλάμψεων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς, οι ισχυρότερες από αυτές (κατηγορίες M και X) σχετίζονται σχεδόν άμεσα με τις CMEs, που αποτελούν κύριους παράγοντες για τη διαμόρφωση του Διαστημικού Καιρού (Georgoulis and Rust, 2007). Ιδιαίτερη μνεία μπορεί να γίνει και στο Κέντρο Πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ (spaceweather.phys.uoa.gr), το οποίο εκδίδει καθημερινά Δελτίο Πρόγνωσης Διαστημικού Καιρού, το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή δραστηριότητα, τη γεωμαγνητική δραστηριότητα του ηλιακού ανέμου, τα SEPs και τις στεμματικές οπές, και κάνει εκτίμηση του γεωμαγνητικού δείκτη A_p (Paouris et al., 2021).

Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε καθώς πλέον πολλά από τα τεχνολογικά συστήματα και εφαρμογές με ζωτική σημασία για την εύρυθμη λειτουργία των ανθρωπίνων κοινωνιών επηρεάζονται από το Διαστημικό Καιρό (Daglis, 2005). Διάφορα στρατιωτικά και εμπορικά συστήματα, δορυφόροι επικοινωνιών, δορυφορικά συστήματα τηλεπισκόπησης, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και οι εναέριες μεταφορές είναι μερικοί μόνο από τους τομείς που εξαρτώνται άμεσα από την καλύτερη κατανόηση και πρόβλεψη του Διαστημικού Καιρού.

Scale	Description	Effect	Physical measure (Flux level of ≥ 10 MeV particles)	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
S 5	Extreme	Biological: Unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity); passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: Satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources; permanent damage to solar panels possible. Other systems: Complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.	10^5	Fewer than 1 per cycle
S 4	Severe	Biological: Unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: May experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded. Other systems: Blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.	10^4	3 per cycle
S 3	Strong	Biological: Radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk. Satellite operations: Single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely. Other systems: Degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.	10^3	10 per cycle
S 2	Moderate	Biological: Passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk. Satellite operations: Infrequent single-event upsets possible. Other systems: Small effects on HF propagation through the polar regions and navigation at polar cap locations possibly affected.	10^2	25 per cycle
S 1	Minor	Biological: None. Satellite operations: None. Other systems: Minor impacts on HF radio in the polar regions.	10	50 per cycle

Σχήμα 1.27: Κατηγοριοποίηση των ηλιακών καταιγίδων και επιπτώσεις τους στην τεχνολογία και στον άνθρωπο (Πηγή: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

1.10 Επιδράσεις Διαστημικού Καιρού

Κατά την τελευταία δεκαετία, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε όλο τον κόσμο έχουν αναγνωρίσει ότι ο Διαστημικός Καιρός είναι ένας φυσικός κίνδυνος που αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τις σύγχρονες κοινωνίες. Ο Διαστημικός καιρός δεν επηρεάζει απλώς αντικείμενα ή ανθρώπους μόνο στο διάστημα, καθώς οι επιπτώσεις του μπορούν να γίνουν αισθητές ακόμη και στην επιφάνεια της Γης (Daglis, 2005; Pulkkinen, 2007).

Χαρακτηριστικά, μπορούν να αναφερθούν μερικά σπουδαία σημασίας γεγονότα Διαστημικού Καιρού που έχουν επηρεάσει τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

• Γεγονός Carrington του 1859

Το πρωινό της 1ης Σεπτεμβρίου 1859 ο ερασιτέχνης αστρονόμος Richard Carrington παρατήρησε δύο ιδιαίτερα φωτεινά σημεία στην επιφάνεια του Ήλιου, που αντιστοιχούσαν στην έναρξη της μεγαλύτερης διαστημικής καταιγίδας που έχει καταγραφεί ποτέ. Μέσα σε μόλις λίγα λεπτά, το έντονο αυτό φως εξαφανίστηκε, όμως τα αποτελέσματα της εκδήλωσης αυτής έγιναν αισθητά σε όλη τη Γη μόλις μετά από λίγες ώρες. Ο Carrington ουσιαστικά είχε παρατηρήσει μια τεράστια ηλιακή έκλαμψη και μία εξίσου μεγάλη στεμματική εκπομπή μάζας, που είχε ως αποτέλεσμα μια γεωμαγνητική καταιγίδα που δημιούργησε επαγωγικά ρεύματα σε καλώδια τηλεγραφίας σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ισχύς της καταιγίδας δεν καταγράφηκε, αλλά πιθανότατα αποτελεί την ισχυρότερη των

Scale	Description	Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
G 5	Extreme	Power systems: Widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage. Spacecraft operations: May experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites. Other systems: Pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).	Kp = 9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	Power systems: Possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid. Spacecraft operations: May experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).	Kp = 8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
G 3	Strong	Power systems: Voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices. Spacecraft operations: Surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems. Other systems: Intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).	Kp = 7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	Power systems: High-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage. Spacecraft operations: Corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions. Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).	Kp = 6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	Power systems: Weak power grid fluctuations can occur. Spacecraft operations: Minor impact on satellite operations possible. Other systems: Migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

Σχήμα 1.28: Κατηγοριοποίηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων και επιπτώσεις τους στην τεχνολογία και στον άνθρωπο (Πηγή: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

τελευταίων 150 ετών (Cliver, 2006). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ως ένα λογικό παράδειγμα χειρότερης περίπτωσης (“worst case scenario”) για τη μελέτη των επιπτώσεων του Διαστημικού Καιρού. Αναμένεται ότι αν μια τέτοια καταιγίδα συνέβαινε σήμερα θα είχε σημαντικό αντίκτυπο στην αεροπορία, ενώ υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι έχουν υπάρξει καταιγίδες έως και δέκα φορές ισχυρότερες.

- **Γεωμαγνητική καταιγίδα του 1921**

Η γεωμαγνητική καταιγίδα αυτή εκτιμάται ότι είναι συγκρίσιμη σε μέγεθος με το γεγονός Carrington. Σέλας παρατηρήθηκε κοντά στον ισημερινό, πιο συγκεκριμένα στη Σαμόα (Silverman and Cliver, 2001), ενώ τα γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα προκάλεσαν πυρκαγιές σε διάφορους τηλεγραφικούς σταθμούς στη Σουηδία (Boteler et al., 1998).

- **Σειρά Ηλιακών Καταιγίδων του 1972**

Τον Αύγουστο του 1972, έλαβε χώρα μία σειρά ιδιαίτερα ισχυρών ηλιακών καταιγίδων, οι οποίες προκάλεσαν εκτεταμένες διαταραχές στα δίκτυα ηλεκτρισμού και επικοινωνίας σε μεγάλα τμήματα της Βόρειας Αμερικής, καθώς και διακοπές σε δορυφόρους. Επιπλέον, η καταιγίδα αυτή, προκάλεσε την τυχαία έκρηξη πολλών ναυτικών ναρκών των ΗΠΑ κοντά στο Haiphong στο Βόρειο Βιετνάμ, στις 4 Αυγούστου 1972. Η καταιγίδα όμως αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία και για έναν ακόμα λόγο, καθώς έλαβε χώρα ανάμεσα σε δύο διαστημικές αποστολές Apollo. Πιο συγκεκριμένα, ένα ισχυρό γεγονός ηλιακών

ενεργητικών σωματιδίων έλαβε χώρα ενδιάμεσα της ασφαλούς επιστροφής στη γη του πλήρωματος Apollo 16 και της εκτόξευσης του τλΑπολλο 17. Αν το γεγονός αυτό έπληττε ένα πλήρωμα καθ' οδόν προς τη Σελήνη ή ενώ εργαζόταν στην σεληνιακή επιφάνεια, είναι πολύ πιθανό ότι οι αστροναύτες θα δέχονταν μία δόση ακτινοβολίας που θα μπορούσε να είναι θανάσιμη μέσα σε λίγες μόνο ώρες.

- **Γεωμαγνητική Καταιγίδα του 1989**

Τον Μάρτιο του 1989, η τρίτη ισχυρότερη γεωμαγνητική καταιγίδα που έχει καταγραφεί έπληξε τη Γη. Σε λιγότερο από ένα λεπτό, το επαγωγικό ρεύμα στις γραμμές μετάδοσης προκάλεσε υπερφόρτωση των συστημάτων ασφαλείας με αποτέλεσμα να κλείσουν ολόκληρα τμήματα του δικτύου τροφοδοσίας του Κεμπέκ. Ένα φαινόμενο καταιγισμού προκάλεσε τελικά την ολική κατάρρευση του δικτύου και βύθισε την περιοχή στο σκοτάδι, με την ηλεκτρική ενέργεια να μην είναι διαθέσιμη για εννέα ώρες. Η αποκατάσταση του προβλήματος ήταν επίσης δυσχερής καθώς ακόμα και ο εφεδρικός εξοπλισμός είχε επηρεαστεί από την καταιγίδα (Erinmez et al., 2002). Παράλληλα, προκλήθηκε ζημιά σε δύο μετασχηματιστές στο Ηνωμένο Βασίλειο.

- **Ηλιακές Καταιγίδες Halloween του 2003**

Μετά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας το έτος 2001, παρατηρήθηκε έξαρση της ηλιακής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της καθοδικής φάσης του ηλιακού κύκλου, κατά το έτος 2003 (Gopalswamy et al., 2005). Μία μεγάλη και πολύπλοκη ομάδα ηλιακών κηλίδων προκάλεσε μία σειρά εκλάμψεων και στεμματικών εκπομπών μάζας, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί πλήθος γεωμαγνητικών καταιγίδων (Doherty et al., 2004). Αυτές προκάλεσαν διακοπές στα συστήματα επικοινωνίας υψηλών συχνοτήτων (HF), διακυμάνσεις στα συστήματα παροχής ενέργειας και μικρές έως σοβαρές επιπτώσεις στα δορυφορικά συστήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι δύο δορυφόροι Inmarsat που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία, όπου στον έναν χρειάστηκε χειροκίνητη παρέμβαση για τη διόρθωση της τροχιάς του ενώ ο άλλος βγήκε εκτός σύνδεσης λόγω βλάβης στην κεντρική μονάδα του επεξεργαστή (CPU). Αυτοί είναι μόλις δύο από τους σαράντα επτά δορυφόρους που κλήθηκαν να διακόψουν την υπηρεσία τους από μερικές ώρες έως ημέρες. Πολλοί χρήστες του Global Positioning Satellite (GPS) παρατήρησαν σφάλματα, εκ των οποίων ορισμένοι ακύρωσαν τις λειτουργίες τους. Ακόμα, στις 29 Οκτωβρίου 2003 για ένα χρονικό διάστημα 11 ωρών, υπήρχαν ιδιαίτερα έντονες διαταραχές στην ιονόσφαιρα με αποτέλεσμα το US Wide Area Augmentation System (WAAS) να επηρεαστεί και να μην είναι δυνατή η χρήση του προσεγγίσεις ακριβείας. Ακόμα, μία διακοπή ρεύματος διάρκειας

90 λεπτών επηρέασε πάνω από 50.000 άτομα στη Σουηδία.

- **Μαγνητοσφαιρικό Γεγονός Αθήνας του 2003**

Στις 20 Νοεμβρίου 2003 καταγράφηκε από το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων μία ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα. Η αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε κάποια γεωγραφικά πλάτη άγγιξε το 6% με 8%, που φαίνεται να είναι και η μεγαλύτερη αύξηση που έχει παρατηρηθεί ποτέ σε γεωμαγνητικό γεγονός. Πιο συγκεκριμένα, αυτό οδήγησε σε μεγάλες μεταβολές σε κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας 7 GV με 8 GV, που αντιστοιχεί σε ασυνήθιστα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σέλαος στον ουρανό της Αθήνας (Belov et al., 2005a).

- **Ραδιοέξαρση του 2006**

Το 2006, σε μια περίοδο χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας, η Γη εκτέθηκε στη μεγαλύτερη έκρηξη ραδιοκυμάτων που έχει καταγραφεί ποτέ. Αυτό αποτέλεσε και το πρώτο καταγεγραμμένο συμβάν έκρηξης ραδιοκυμάτων που επηρέασε σημαντικά τη λειτουργία των GPS. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, η πλοήγηση GPS δεν ήταν διαθέσιμη για περίπου 30 λεπτά, με αποτέλεσμα ορισμένα αεροσκάφη να αναφέρουν προβλήματα στην πλοήγηση και τον ακριβή καθορισμό της θέσης τους (loss of lock).

- **Γεωμαγνητική Καταιγίδα St. Patrick's day του 2015**

Η γεωμαγνητική καταιγίδα στις 17 Μαρτίου 2015 είναι η πρώτη υπερ-καταιγίδα του 24ου ηλιακού κύκλου. Προκάλεσε ένα ιδιαίτερα εντυπωσιακό σέλας, το οποίο ήταν ορατό όχι μόνο κοντά στον Αρκτικό Κύκλο, αλλά και σε νοτιότερα σημεία της Ευρώπης και της Αμερικής, όπως την Ουαλία, την Ολλανδία, τη Γερμανία και το Κολοράντο (Wu et al., 2016).

1.10.1 Επίδραση σε τεχνολογικά συστήματα

Τα φαινόμενα Διαστημικού Καιρού επιδρούν με ποικίλους τρόπους στην τεχνολογία. Τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο της γης προκαλώντας μαγνητικές διαταραχές και αυξημένο ιονισμό στην ιονόσφαιρα, από 100 έως 1000 km πάνω από την επιφάνεια της Γης (Daglis, 2005; Lanzerotti, 2001).

Τα συστήματα των δορυφόρων, και πιο συγκεκριμένα τα ευαίσθητα μικροηλεκτρονικά τους, υφίστανται τις περισσότερες επιρροές από ενεργητικά σωματίδια. Τα ενεργητικά ηλεκτρόνια που είναι παγιδευμένα στην εξωτερική ζώνη ακτινοβολίας προκαλούν ηλεκτροστατική φόρτιση και εκφόρτιση, η οποία μπορεί να επιφέρει βλάβη στον ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό και τους ηλιακούς συλλέκτες. Τα SEPs με τη σειρά τους μπορεί να προκαλέσουν μείωση της

απόδοσης των συσκευών ή ακόμα και καταστροφή τους μέσω ιονισμού ionization, μετατοπίσεων displacement και μεμονωμένων επιδράσεων Single Event Effects - SEEs και λόγω μεταφοράς ενέργειας και ορμής από τα ενεργητικά σωματίδια στα άτομα-υλικά του στόχου. Όλα αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη λειτουργία ή βλάβες στον εξοπλισμό, θέτοντας έτσι τον δορυφόρο εκτός λειτουργίας.

Η απόδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μπορεί να επηρεαστεί από διακοπές στα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (HF) λόγω ηλιακών εκλάμψεων είτε λόγω γεωμαγνητικών καταιγίδων, οι οποίες επηρεάζουν έντονα την ιονόσφαιρα. Τα HF χρησιμοποιούνται επίσης από την αεροπορία και τη ναυτιλία, καθώς και από τον στρατό. Τα σύγχρονα συστήματα HF έχουν σχεδιαστεί για να είναι ανθεκτικά, αλλά τα παλιά συστήματα ενδέχεται να παρουσιάζουν διακοπές λειτουργίας. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται κυρίως οι επικοινωνίες στις πολικές πτήσεις. Ο Διαστημικός Καιρός μπορεί να επηρεάσει επίσης και τη λειτουργία των συστημάτων GPS και GNSS, λόγω διαταραχών στην ιονόσφαιρα από τον αυξημένο ιονισμό με διακοπή των συστημάτων επικοινωνίας ή πλοήγησης.

Τα γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα (Geomagnetically Induced Currents - GICs), που σχετίζονται με γεωμαγνητικές καταιγίδες, ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στις φυσικές υποδομές όπως μετασχηματιστές και ηλεκτροφόρα καλώδια, να προκαλέσουν μεταβολές τάσης που μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπές ρεύματος και να διαβρώσουν τους αγωγούς ενέργειας, ενώ ιδιαίτερα ευαίσθητα είναι και τα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Η επίδραση των φαινομένων Διαστημικού Καιρού στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού και στην παγκόσμια οικονομία αποτελεί αντικείμενο μελέτης. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, αν ένα γεγονός παρόμοιο με αυτό στο Κεμπέκ το 1989, λάμβανε χώρα σήμερα, οι παγκόσμιες οικονομικές επιπτώσεις θα κυμαίνονταν από 2.4 – 3.4 δισεκατομμύρια δολάρια (Eastwood et al., 2017).

1.10.2 Επίδραση σε βιολογικά συστήματα

Οι συνθήκες του Διαστημικού Καιρού μπορεί να αποτελούν κίνδυνο για τον άνθρωπο στο διάστημα. Οι αστροναύτες προστατεύονται συνήθως με τη μεγάλη θωράκιση που υπάρχει στους διαστημικούς σταθμούς. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια αποστολών εκτός του σταθμού εκτίθενται στους ίδιους κινδύνους με έναν δορυφόρο. Μία αυξημένη ροή ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής καταιγίδας, μπορεί να επιφέρει θάνασιμες δόσεις ακτινοβολίας στα πληρώματα των διαστημικών σκαφών και γι'αυτό το λόγο οι αστροναύτες πρέπει να παραμείνουν προστατευμένοι εντός του διαστημικού σταθμού για να αποφύγουν την έκθεση.

Επιπροσθέτως, οι επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου δεν σταματούν στο διάστημα, αλλά επεκτείνονται και στα συνήθη υψόμετρα που πραγματοποιούνται οι αεροπορικές πτήσεις, Οι

ηλιακές καταιγίδες ενισχύουν το περιβάλλον ακτινοβολίας που δημιουργείται από τις κοσμικές ακτίνες στα υψόμετρα πτήσης των εμπορικών αεροπλάνων, αν και είναι σχετικά απίθανο, να γίνει υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων δόσης. Παρόλ' αυτά σε περίπτωση κάποιου πολύ ισχυρού γεγονότος, μπορεί να απαιτείται μείωση του χρόνου πτήσης σε μεγάλο υψόμετρο ή αλλαγή της πορείας της πτήσης προς χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, τα οποία θα είχαν μεγάλη εμπορική και επιχειρησιακή επίπτωση, με καθυστερήσεις και αυξημένη χρήση καυσίμων. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization - ICAO) συνιστά στους υπεύθυνους φορείς την ανάπτυξη επιχειρησιακών διαδικασιών για τη διαχείριση πτήσεων σε περιοχές όπου επηρεάζονται από γεγονότα Διαστημικού Καιρού, όπως είναι οι πολιτικές περιοχές, με κατάλληλο προγραμματισμό πτήσεων των εκ των προτέρων βάσει των προβλέψεων. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η έγκαιρη και έγκυρη πρόγνωση των φαινομένων Διαστημικού Καιρού, ειδικότερα των GLEs (Mavromichalaki et al., 2006; Souvatzoglou et al., 2014).

Για αυτόν τον λόγο, σε αντιστοιχία με τις κλίμακες που χρησιμοποιούνται για τις ηλιακές καταιγίδες, προτείνεται η εισαγωγή ενός νέου δείκτη Διαστημικού Καιρού D για προειδοποιήσεις για αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.29. Αυτός ο δείκτης βασίζεται στους ρυθμούς δόσης που παράγονται από ηλιακά πρωτόνια στα αεροπορικά υψόμετρα κατά τη διάρκεια ηλιακών καταιγίδων και αποτελεί σχετική παράμετρο για την εκτίμηση της συμβολής τους στην αντίστοιχη έκθεση σε ακτινοβολία. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του δείκτη D είναι ότι βασίζεται στο ρυθμό δόσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην ατμόσφαιρα της Γης, δηλαδή εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο πτήσης. Αυτό επιτρέπει τη χρήση του για τοπικές προειδοποιήσεις (Meier et al., 2020; Meier and Daniel Matthia, 2014). Το επίπεδο $D3$ χαρακτηρίζει ένα συμβάν μέτριας διαστημικής ακτινοβολίας και μπορεί να θεωρηθεί ως το πρώτο επίπεδο για την εφαρμογή τεχνικών μετριασμού, ιδίως για ενδεχόμενα Φαινόμενα Διαστημικού Καιρού μεγάλης διάρκειας και για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Στο επίπεδο αυτό, δεν έχει γίνει υπέρβαση του μηνιαίου ορίου για τις εγκύους, κάτι που μπορεί να συμβεί μετά από έκθεση στο επίπεδο $D5$ για περισσότερες από τρεις ώρες (Meier et al., 2020).

Άλλες επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού στην ανθρώπινη υγεία αφορούν ισχαιμικά επεισόδια και καρδιοαγγειακές παθήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι μειώσεις Forbush είναι οι πιο ευαίσθητοι δείκτες για τη σχέση μεταξύ των γεωμαγνητικών διαταραχών και διαφόρων παραμέτρων υγείας, όπως είναι ο αριθμός των περιστατικών ισχαιμικών και εγκεφαλικών εγκεφαλικών επεισοδίων, των εμφραγμάτων μυοκαρδίου και των τροχαίων ατυχημάτων (Mavromichalaki et al., 2012; Papaïliou et al., 2002). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί πως τα εμφράγματα του μυοκαρδίου και οι καρδιακές αρρυθμίες έχουν σχέση με τον 11ετή ηλιακό κύκλο, ενώ παρατηρείται αύξηση

Scale	Classification	Dose Rate Interval [$\mu\text{Sv/h}$]	Additional Exposure
D 0	Quiet	$\dot{E}_{sol} < 5$	Variation of the natural background at cruising altitudes
D 1	Nominal	$5 \leq \dot{E}_{sol} < 10$	Natural background at high latitudes up to FL400
D 2	Minor	$10 \leq \dot{E}_{sol} < 20$	Natural background at high latitudes between about FL400 and FL600
D 3	Moderate	$20 \leq \dot{E}_{sol} < 40$	Average dose rate inside the ISS, threshold for FAA radiation alert
D 4	Strong	$40 \leq \dot{E}_{sol} < 80$	Average dose rate during an Extra-Vehicular Activity (EVA) on the ISS
D 5	Severe	$80 \leq \dot{E}_{sol} < 160$	FAA recommended monthly limit for pregnant women likely to be exceeded on a long-haul flight

Σχήμα 1.29: Κλίμακα Διαστημικού Καιρού D για χρήση στην αεροπορία (Meier et al., 2020).

και κατά τη φάση ανάκαμψης ορισμένων έντονων γεωμαγνητικών καταιγίδων (Galata et al., 2017). Ακόμα βέβαια χρειάζεται περισσότερη έρευνα για πιο εμπειριστατωμένα αποτελέσματα.

Παρόλα αυτά η έκθεση στην ιονίζουσα διαστημική ακτινοβολία διαδραματίζει το σπουδαιότερο ρόλο όσον αφορά τις επιπτώσεις του Διαστημικού Καιρού στην ανθρώπινη υγεία. Στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής αυτής γίνεται αναλυτική επισκόπηση του τρόπου επίδρασης της διαστημικής ακτινοβολίας και του συνόλου των επιπτώσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας σε πληρώματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών. Κύριος στόχος της εργασίας αυτής είναι η πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα.

2 Ακτινοβολίες

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα είδη και οι πηγές της ακτινοβολίας, καθώς και οι τρόποι αλληλεπίδρασης αυτής με την ύλη. Γίνεται ορισμός όλων των μεγεθών δοσιμετρίας, που είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της έκθεσης σε ακτινοβολία, και πιο συγκεκριμένα σε κοσμική ακτινοβολία. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής περιγραφή των επιπτώσεων της κοσμικής ακτινοβολίας στην υγεία των πληρωμάτων αεροσκαφών, επιβατών και αστροναυτών. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι αρχές και τα πρωτόκολλα ακτινοπροστασίας σχετικά με την κοσμική ακτινοβολία. Τέλος, τονίζεται η χρησιμότητα ύπαρξης υπολογιστικών μοντέλων και εφαρμογών για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών για πληρώματα αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών, παρουσιάζοντας τα πιο βασικά εξ αυτών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ένα τέτοιο εργαλείο, με το όνομα DYASTIMA-R, προτείνεται στα πλαίσια της διατριβής αυτής.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η σύγχρονη κατανόηση της ακτινοβολίας ξεκίνησε με τον Wilhelm Röntgen το 1895. Κατά τη διαδικασία διεξαγωγής διαφόρων πειραμάτων εφαρμογής ρευμάτων σε σωλήνες κενού, ανακάλυψε ότι, παρά την κάλυψη τους με πλάκες για να μπλοκάρει το φως, φάνηκε να διεισδύουν ακτίνες που αντιδρούσαν με ένα διάλυμα βαρίου σε μια πλάκα που είχε τοποθετήσει κοντά. Ύστερα από αρκετά πειράματα με τις νέες ακτίνες, συμπεριλαμβανομένης της λήψης της πρώτης ‘φωτογραφίας’ του χεριού της γυναίκας του, τις ονόμασε ακτίνες X, για να προσδώσει το άγνωστο της φύσης τους, μία ονομασία που έχει παραμείνει μέχρι σήμερα (Röntgen, 1896). Για την ανακάλυψη αυτή τιμήθηκε με το πρώτο στην ιστορία βραβείο Nobel Φυσικής το 1901. Έτσι, οι διεισδυτικές ιδιότητες των ακτίνων X άρχισαν να αξιοποιούνται για ιατρικούς σκοπούς, χωρίς να υπάρχει υποψία ότι τέτοιας μορφής ακτινοβολία ενδέχεται να έχει επιβλαβή αποτελέσματα.

Την ανακάλυψη αυτή, ακολούθησε η παρατήρηση του Henri Becquerel το 1896 ότι τα ορυκτά ουρανίου εκπέμουν συνεχώς και με φυσικό τρόπο ακτινοβολία, παρόμοια με τις ακτίνες X (Becquerel, 1896). Αν και αρχικά πίστευε ότι οι ακτίνες αυτές εκλύθηκαν από τα ορυκτά φωσφορίζοντος ουρανίου μετά από παρατεταμένη έκθεσή τους στον ήλιο, τελικά εγκατέλειψε αυτήν την υπόθεση. Το φαινόμενο εκπομπής ακτινοβολίας χωρίς εξωτερικό αίτιο συγκλόνισε τις επικρατούσες αντιλήψεις στον κόσμο της φυσικής, καθώς ερχόταν φαινομενικά σε ρήξη με την αρχή διατήρησης ενέργειας, γεγονός που φυσικά αποδείχθηκε πως δεν ισχύει.

Παρόλο που ο Henri Becquerel ανακάλυψε το φαινόμενο, ήταν η διδακτορική του φοιτήτρια Marie Skłodowska Curie που του έδωσε το όνομα ‘ραδιενέργεια’. Θα συνεχίσει να κάνει πρωτοποριακό έργο με ραδιενεργά υλικά, συμπεριλαμβανομένης της ανακάλυψης των ραδιενεργών

στοιχείων θόριο, πολώνιο και ράδιο. Της απονεμήθηκε το βραβείο Nobel δύο φορές, μαζί με την Becquerel και τον σύζυγό της Pierre Curie στη Φυσική το 1903 για το έργο τους στη ραδιενέργεια, και πάλι λίγα χρόνια αργότερα, το 1911, στη Χημεία για την ανακάλυψη του ραδίου και του πολωνίου, αποτελώντας έτσι τη μοναδική γυναίκα που τιμήθηκε δύο φορές με τη διάκριση αυτή στην επιστημονική κοινότητα (Curie and Sklodowska Curie, 1898; Sklodowska Curie, 1911). Διετέλεσε επίσης πρωτοποριακό έργο στο πεδίο της ραδιολογίας και της ακτινολογίας, αναπτύσσοντας κινητές μονάδες ακτίνων X για τα πεδία μάχης του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Πέθανε τον Ιουλίο του 1934 από λευχαιμία, που πιστεύεται ότι προκλήθηκε από την εκτεταμένη έκθεσή της στα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας που εμπλέκονται στην έρευνά της.



Σχήμα 2.1: Marie Skłodowska Curie (Πηγή: www.atomicarchive.com/).

Οι Thomas Edison, William J. Morton και Nikola Tesla ήταν από τους πρώτους που ανέφεραν πιθανές ανεπιθύμητες ενέργειες όταν ανακάλυψαν ερεθισμούς των ματιών μετά από πειραματισμό με ακτινογραφίες και φθορίζουσες ουσίες. Μάλιστα, ο βοηθός του Edison από όγκο, ως αποτέλεσμα υπερβολικής έκθεσης στις ακτίνες X. Κατά τις επόμενες δεκαετίες, πολλοί ερευνητές και ιατροί που έκαναν χρήση λυχνίων ακτίνων X εμφάνισαν εγκαύματα ακτινοβολίας ή καρκίνο, με πολλούς από αυτούς να πεθαίνουν τελικά ως αποτέλεσμα της έκθεσής τους σε ακτινοβολία (Reed, 2001). Αυτές οι ατυχείς πρώτες εμπειρίες οδήγησαν τελικά στην επίγνωση των κινδύνων από την ακτινοβολία για τους εργαζόμενους στον τομέα ακτινοβολιών

και οδήγησαν την ανάπτυξη της ραδιοβιολογίας, ενός νέου κλάδου της επιστήμης με σκοπό την ακτινοπροστασία (Inkret et al., 1995).

Το 1933 ο Ernest O. Lawrence και οι συνεργάτες του ολοκλήρωσαν το πρώτο κύκλοτρο. Παρατήρησαν ότι τα νετρόνια που παράγονταν ήταν περίπου 2.5 φορές πιο αποτελεσματικά στη θανάτωση αρουραίων σε σχέση με τις ακτίνες X. Το 1938, ανακαλύφθηκε το φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης από τους φυσικούς L. Meitner, και O. R. Frisch και τους χημικούς O. Hahn και F. Strassmann ταυτόχρονα (Hahn and Strassmann, 1939; Meitner and Frisch, 1939), ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 1942, ο βραβευμένος με Nobel Enrico Fermi και η ομάδα του πετυχαίνουν την πρώτη ελεγχόμενη αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση (Fermi, 1940) στον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα που κατασκευάστηκε (Chicago Pile-1).

Αυτό αποτέλεσε και την αρχή του Manhattan Project, όπου, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αναπτύχθηκε η ατομική βόμβα, το πρώτο πυρηνικό όπλο. Στα εργαστήρια του Los Alamos, υπό την επίβλεψη του πυρηνικού φυσικού Robert Oppenheimer, πλήθος διακεκριμένων επιστημόνων (ανάμεσά τους οι E. Fermi, H. Bethe, R. Feynman, E. Lawrence, K. Fuchs, L. Szilard), βασιζόμενοι στο φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης, δημιούργησαν για τις 'Συμμαχικές Δυνάμεις' την πρώτη ατομική βόμβα (Gosling, 1999). Στις 6 και στις 9 Αυγούστου του 1945, δύο από αυτές τις βόμβες σκορπούν τον τρόμο στη Hiroshima και το Nagasaki της Ιαπωνίας, σημαίνοντας πρακτικά και τη λήξη του πολέμου. Οι βομβαρδισμοί σκότωσαν περισσότερα από 200.000 άτομα, ενώ άφησαν περισσότερους από 600.000 επιζώντες με σοβαρά προβλήματα από την έκθεση στα τεράστια ποσά ακτινοβολίας. Πολλοί από τους επιζήσαντες υπήρξαν αντικείμενα μελέτης των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της ακτινοβολίας.

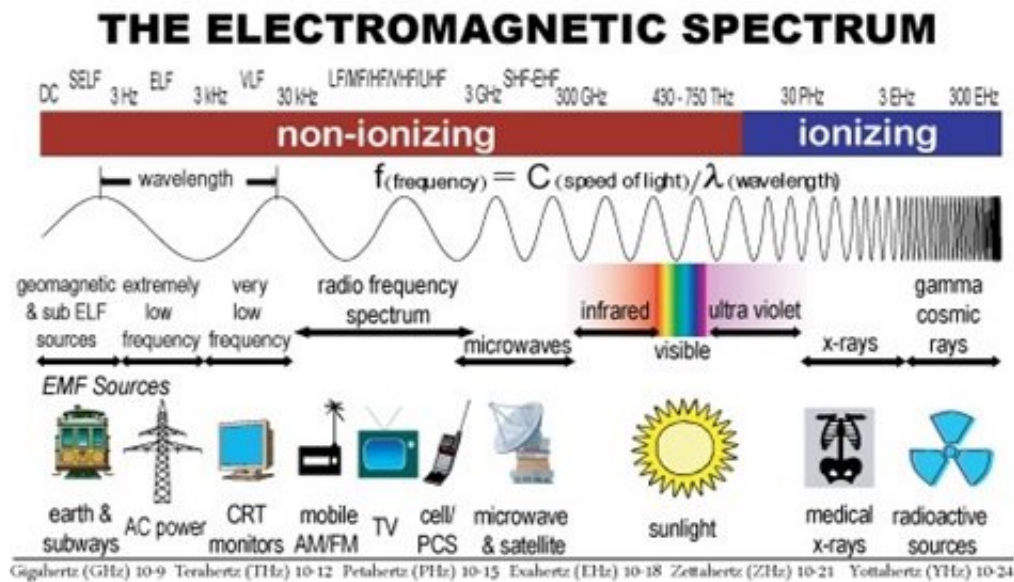
Ταυτόχρονα, η ολοένα αυξανόμενη ανάπτυξη και χρήση των πυρηνικών αντιδραστήρων για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και η χρήση ακτινοβολιών στον χώρο της υγείας έδωσε έναυσμα για την ανάπτυξη του κλάδου της Υγαιοφυσικής. Αυτό ενισχύθηκε και από την ανακάλυψη κι άλλων πηγών ακτινοβολίας μέσω της διαστημικής έρευνας, όπως οι ζώνες ακτινοβολίας Van Allen και τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Η ανθρώπινη έκθεση σε ακτινοβολία έχει αλλάξει γενικότερα σε μεγάλο βαθμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τον τελευταίο αιώνα. Ακόμα, όμως, και οι αεροπορικές πτήσεις έχουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη έκθεση, οποία αυξάνεται με την όλο και πιο προηγμένη τεχνολογία των αεροσκαφών που επιτρέπουν πτήσεις σε όλο και υψηλότερα υψόμετρα, όπου μειώνεται η θωράκιση από την ατμόσφαιρα της Γης. Λιγότερο προφανής είναι ο μεταβαλλόμενος χαρακτήρας των ακτινοβολιών σε μεγαλύτερα υψόμετρα, βάζοντας έτσι ένα όριο, έστω και προσωρινό, στις ανθρώπινες δραστηριότητες στο διάστημα (Wilson, 2000).

Σήμερα, μετά από δύο ήδη ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες (Chernobyl, 1986 και

Fukushima, 2011), την πρόοδο της ιατρικής απεικόνισης και της ακτινοθεραπείας, την αυξανόμενη χρήση των αερομεταφορών και τις διαστημικές αποστολές με στόχο τον Άρη, η μελέτη των επιπτώσεων της ακτινοβολίας και η τήρηση των πρωτοκόλλων ακτινοπροστασίας είναι ίσως πιο επίκαιρη και απαραίτητη από ποτέ. Για το λόγο αυτό, στόχος της παρούσας διατριβής είναι η αξιολόγηση του κινδύνου των πληρωμάτων αεροσκαφών και των επιβατών εξαιτίας της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία.

2.2 Είδη Ακτινοβολιών

Η ακτινοβολία μπορεί να διακριθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την ενέργεια των σωματιδίων από τα οποία απαρτίζεται: σε ιονίζουσα και σε μη ιονίζουσα ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Φάσμα ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας (Yong et al., 2015a).

Ιονίζουσα είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει μεγάλη ενέργεια ($> 10 \text{ eV}$), ώστε διεισδύοντας μέσα στην ύλη, να προκαλεί ιονισμό και να διασπάει τους χημικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πληθώρα επιπτώσεων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες μπορούν να ιονίσουν την ύλη είτε άμεσα, εάν πρόκειται για ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια και σωματίδια α , είτε έμμεσα, αν η διαδικασία αφορά σωματίδια χωρίς φορτίο, όπως νετρόνια και φωτόνια (γ ή X). Κυριότερες ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι η ακτινοβολία- α , η ακτινοβολία- β , οι ακτίνες- X και οι ακτίνες- γ (ΕΕΑΕ). Η κοσμική ακτινοβολία αποτελεί επίσης ιονίζουσα ακτινοβολία.

Αντίθετα, η μη ιονίζουσα ακτινοβολία (αλλιώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) μεταφέρει ένα σχετικά μικρό ποσό ενέργειας, με αποτέλεσμα να μην προκαλεί ιονισμό της ύλης. Παρόλ' αυτά μπορεί να προκαλέσει χημικές, ηλεκτρικές και θερμικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (ΕΕΑΕ). Προκύπτει από ταλαντώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που διαδίδονται στο χώρο υπό τη μορφή κύματος. Οι μη ιονίζουσες ακτινοβολίες περιλαμβάνουν τις υπέρυθρες, το ορατό φως, την υπεριώδη ακτινοβολία, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής και εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF, VLF), καθώς και στα στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (όπως για παράδειγμα το μαγνητικό πεδίο της γης).

Ένα τμήμα του φάσματος της υπεριώδους ακτινοβολίας (UVA, UVB, UVC) έχει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει ιονισμό, ενώ το υπόλοιπο φάσμα έχει χαμηλότερη ενέργεια, οπότε δεν ιονίζει την ύλη αλλά μπορεί να προκαλέσει φωτοχημικές αντιδράσεις. Έτσι, η υπεριώδης ακτινοβολία βρίσκεται στο όριο μεταξύ ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας.

2.3 Πηγές Ακτινοβολιών

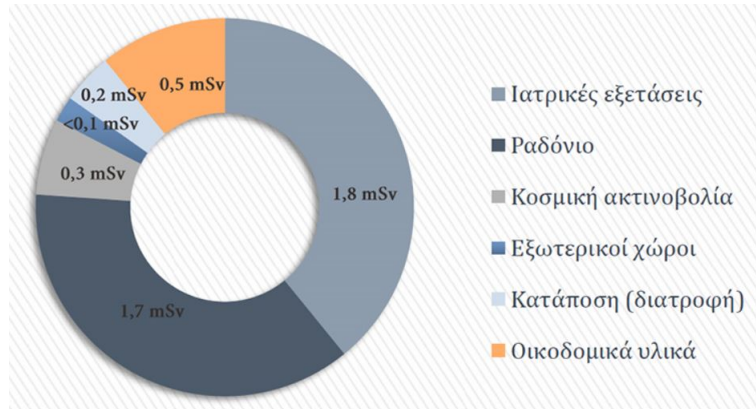
Η έκθεση σε ακτινοβολία (ιονίζουσα και μη ιονίζουσα) είναι καθημερινή. Οι πηγές ακτινοβολίας μπορεί να είναι είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς. Καθώς η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην ιονίζουσα ακτινοβολία, θα πραγματοποιηθεί αρχικά μία συνοπτική αναφορά στις πηγές μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, και μία πιο αναλυτική περιγραφή των πηγών ιονίζουσας ακτινοβολίας.

Γύρω μας υπάρχουν πολλές πηγές μη ιονίζουσας ακτινοβολίας. Αυτές περιλαμβάνουν φούρνους μικροκυμάτων, συστήματα εντοπισμού θέσης, κινητά και ασύρματα τηλέφωνα, τηλεοπτικούς και ραδιοφωνικούς σταθμούς, σταθμούς και γραμμές μετάδοσης ενέργειας, οικιακές καλωδιώσεις και ηλεκτρικές συσκευές. Κύρια πηγή φυσικής μη ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι ο Ήλιος, ο οποίος εκπέμπει σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, με την υπεριώδη ακτινοβολία να αποτελεί καρκινογόνο παράγοντα για τον άνθρωπο (Tsitomeneas, 2011).

Σχετικά με τις πηγές ιονίζουσας ακτινοβολίας, οι κυριότερες πηγές φυσικής ακτινοβολίας είναι η κοσμική ακτινοβολία, η ακτινοβολία του εδάφους της Γης (κυρίως πετρώματα όπως ο γρανίτης), το ραδόνιο και τα ραδιονουκλίδια μέσα στις τροφές (π.χ. ^{40}Ca). Η πλειοψηφία της ακτινοβολίας υποβάθρου προέρχεται από ραδόνιο, ένα αέριο που εμφανίζεται φυσικά ως έμμεσο προϊόν αποσύνθεσης των μεταλλευμάτων ουρανίου στην επιφάνεια της Γης (Angelopoulos and Sakelliou, 1994). Οι φυσικές επίγειες πηγές εκθέτουν τον καθένα μας σε μια συνολική μέση δόση ακτινοβολίας υποβάθρου της τάξης των 2.4 mSv ανά έτος, αν και υπάρχει σημαντική διακύμανση ανάλογα με τον τόπο κατοικίας και τις ιδιαίτερες συνθήκες για κάθε άτομο ξεχωριστά, με τη μέση ετήσια δόση να φτάνει μέχρι τα 3.01 mSv (Di Trollo et al., 2015).

Οι τεχνητές πηγές ακτινοβολίας συνδέονται με την εργασιακή έκθεση (π.χ. εργασία σε

νοσοκομεία, βιομηχανίες, εξορύξεις, πυρηνικούς αντιδραστήρες), με πληθώρα ιατρικών πρακτικών διάγνωσης και θεραπείας (π.χ. ακτινογραφία, αξονική τομογραφία, ακτινοθεραπεία), με τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων που προέρχονται από χρήση ιονίζουσας ακτινοβολίας (π.χ. νοσοκομεία, βιομηχανίες, πυρηνικοί αντιδραστήρες) αλλά και από τη ραδιενεργή μόλυνση εξαιτίας κάποιου ατυχήματος (π.χ. Chernobyl) (IAEA, 2004; Tsitomeneas, 2011).



Σχήμα 2.3: Ολιστική εκτίμηση της μέσης ετήσιας δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ο κάτοικος της Ελλάδας από φυσικές και τεχνητές πηγές ακτινοβολίας (ΕΕΑΕ, 2015).

2.4 Αλληλεπίδραση Ακτινοβολίας και Ύλης

Στη φυσική, ως ακτινοβολία ορίζεται η εκπομπή ή μετάδοση ενέργειας με τη μορφή σωματιδίων ή κυμάτων μέσα σε ένα υλικό μέσο ή στο διάστημα. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να είναι σωματιδιακή (ακτινοβολίες α , β , γ καθώς και ακτινοβολία πρωτονίων και νετρονίων), ηλεκτρομαγνητική (ραδιοκύματα, υπέρυθρες, ορατό φως, υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X, ακτίνες γ), ακουστική (ηπέρηχοι, σεισμικά κύματα) και βαρυτική (βαρυτικά κύματα).

Η κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για τη μελέτη των διαφόρων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη λόγω κοσμικής ακτινοβολίας, όσο και για μελέτες στα πλαίσια της ραδιοβιολογίας, τη θωράκισης από την ακτινοβολία, την ανίχνευση ακτινοβολίας και σχεδόν κάθε πρακτικής εφαρμογής ακτινοπροστασίας. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότεροι μηχανισμοί με τους οποίους η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (photoelectric effect), αποτελεί μία διαδικασία κατά την οποία ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια εκπέμπονται από ή μέσα σε ένα υλικό, όταν αυτό απορροφά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Serway and Jewett, 2014). Συχνά ορίζεται ως εκπομπή ηλεκτρονίων από μια μεταλλική πλάκα όταν προσπίπτει πάνω της φως. Γενικά, η ακτινοβολούμενη

ενέργεια μπορεί να είναι υπέρυθη, ορατή ή υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X ή ακτίνες γ, το υλικό μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο, ενώ τα σωματίδια που εκπέμπονται μπορεί να είναι ιόντα ή ηλεκτρόνια.

Στο φαινόμενο Compton (Compton scattering), μεμονωμένα φωτόνια συγκρούονται με μεμονωμένα ηλεκτρόνια που είναι ελεύθερα ή ασθενώς συνδεδεμένα στα άτομα του υλικού (Choppin et al., 2002). Τα φωτόνια αυτά μεταφέρουν μέρος της ενέργειας και της ορμής τους στα ανακρουόμενα ηλεκτρόνια. Τη στιγμή της σύγκρουσης, παράγονται νέα φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας και ορμής, αλλά μεγαλύτερου μήκους κύματος, που σκεδάζονται σε διάφορες γωνίες, ανάλογα με το ποσό ενέργειας που χάνεται προς τα ηλεκτρόνια.

Το φαινόμενο της δίδυμης γένεσης (pair production) λαμβάνει χώρα η παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου μέσω ενός παλμού ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ταξιδεύει μέσα στην ύλη, συνήθως κοντά σε έναν ατομικό πυρήνα (Choppin et al., 2002). Αποτελεί μια άμεση μετατροπή της ακτινοβολίας σε ύλη και είναι ένας από τους κύριους τρόπους με τους οποίους οι ακτίνες γ υψηλής ενέργειας απορροφώνται στην ύλη. Για να είναι δυνατή η παραγωγή ζεύγους, η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να είναι τουλάχιστον ισοδύναμη με τη μάζα δύο ηλεκτρονίων (1.02 MeV). Η ενέργεια των φωτονίων που υπερβαίνει το ποσό αυτό, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου.

Η εξαύλωση (annihilation) αποτελεί πρακτικά την αντίστροφη διαδικασία της δίδυμης γένεσης. Πρόκειται για μία αντίδραση κατά την οποία ένα σωματίδιο και το αντισωματίό του συγκρούονται και εξαφανίζονται απελευθερώνοντας ενέργεια (Choppin et al., 2002). Η πιο συνηθισμένη τέτοια αντίδραση στη Γη συμβαίνει μεταξύ ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου. Ένα ποζιτρόνιο, το οποίο μπορεί να προέρχεται από ραδιενεργή διάσπαση από τις αλληλεπιδράσεις των κοσμικών ακτίνων με την ύλη, ενώνεται με ένα ηλεκτρόνιο και σχηματίζει ένα ασταθές άτομο, το pozitronium. Το άτομο αυτό μετά από λίγη ώρα εξαφανίζεται και εκπέμπονται δύο φωτόνια.

Το φαινόμενο της ελαστικής σκέδασης (elastic scattering) αφορά συγκρούσεις σωματιδίων όπου τα σωματίδια ή η εσωτερική κατάσταση των συγκρουόμενων σωματιδίων παραμένουν αμετάβλητα (Cottingham and Greenwood, 2004). Σε αυτήν τη διαδικασία, η κινητική ενέργεια ενός σωματιδίου διατηρείται στο σύστημα του κέντρου μάζας, αλλά μεταβάλλεται η διεύθυνση διάδοσής του, μέσω αλληλεπίδρασης με άλλα σωματίδια ή / και δυναμικά. Όταν το προσπίπτον σωματίδιο διαχέεται στο δυναμικό Coulomb ενός ατόμου ή μορίου (π.χ. ένα σωματίδιο α ή ένα ηλεκτρόνιο), τότε η ελαστική αυτή σκέδαση λέγεται σκέδαση Rutherford. Αν το προσπίπτον σωματίδιο είναι φωτόνιο που διεισδύει σε ένα μέσο με σωματίδια μεγέθους μικρότερου από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτονίου, κάνουμε λόγο για σκέδαση Rayleigh, ενώ αν το

φωτόνιο αλληλεπιδρά με ελεύθερα φορτισμένα σωματίδια (π.χ. ηλεκτρόνια), έχουμε τη σκέδαση Thomson.

Σε αναλογία, η ανελαστική σκέδαση (inelastic scattering) λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει αλληλεπίδραση κατά την οποία δεν διατηρείται η κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος πρωτογενούς σωματιδίου. Έτσι, η κινητική ενέργεια του σωματιδίου αυτού μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί (Cottingham and Greenwood, 2004). Το φαινόμενο Compton αποτελεί μία κλασική περίπτωση ανελαστικής σκέδασης. Τα νετρόνια υφίστανται πολλούς τύπους σκέδασης, συμπεριλαμβανομένης τόσο της ελαστικής όσο και της ανελαστικής σκέδασης, με το είδος της σκέδασης να εξαρτάται από την ταχύτητα του νετρονίου (γρήγορα ή θερμικά νετρόνια). Όταν το προσπίπτον σωματίδιο είναι ηλεκτρόνιο, τότε η πιθανότητα ελαστικής σκέδασης, ανάλογα με την ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου, είναι συνήθως μεγαλύτερη από εκείνη της ανελαστικής σκέδασης.

Η διάσπαση (decay) αποτελεί μία τυχαία διαδικασία κατά την οποία ένας πυρήνας χάνει ενέργεια εκπέμποντας ακτινοβολία, συνήθως με τη μορφή σωματίων- α (διάσπαση α), ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων (διάσπαση β) ή ακτίνων γ (αποδιέγερση). Η ενέργεια του πυρήνα μειώνεται, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο σταθερός (Marion, 1981).

Ως ιονισμός (ionization) νοείται οποιαδήποτε διαδικασία κατά την οποία ηλεκτρικά ουδέτερα άτομα ή μόρια μετατρέπονται σε ιόντα. Μπορεί να προκύψει από την απώλεια ενός ηλεκτρονίου μετά από συγκρούσεις με υποατομικά σωματίδια ή συγκρούσεις με άλλα άτομα, μόρια και ιόντα, αλλά και μέσω της αλληλεπίδρασης με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο ιονισμός αποτελεί έναν από τους κύριους τρόπους με τους οποίους η ακτινοβολία μεταφέρει την ενέργειά της στην ύλη (π.χ. φορτισμένα σωματίδια και ακτίνες X). Η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία αποτελεί την κύρια πηγή ιονισμού στην τροπόσφαιρα της Γης (Usoskin et al., 2008). Τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια προκαλούν ιονισμό στην ατμόσφαιρα, ειδικά στις πολικές περιοχές.

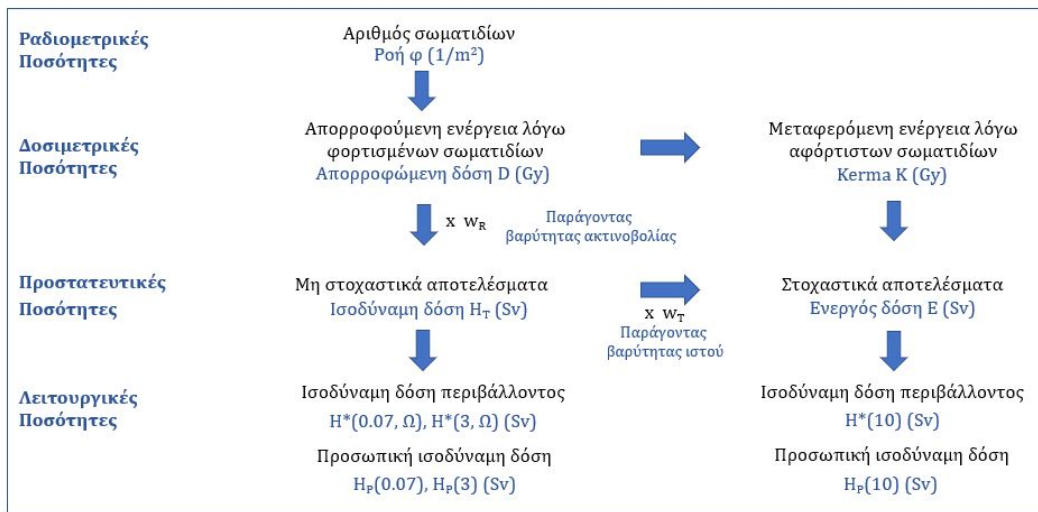
Η ακτινοβολία πέδης (Bremsstrahlung) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία παράγεται από μια ξαφνική επιβράδυνση ή απόκλιση φορτισμένων σωματιδίων που διέρχονται από την ύλη κοντά σε ισχυρά ηλεκτρικά πεδία ατομικών πυρήνων (Choppin et al., 2002). Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ πιο έντονο για τα ηλεκτρόνια, καθώς είναι πολύ πιο ελαφριά, οπότε υπόκεινται σε μεγαλύτερες επιταχύνσεις. Η ακτινοβολία πέδης είναι μια από τις διαδικασίες με τις οποίες οι κοσμικές ακτίνες χάνουν μέρος της ενέργειάς τους μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης. Αντίστοιχα, οι ηλιακές ακτίνες X αποδίδονται στην ακτινοβολία πέδης που παράγεται από γρήγορα ηλεκτρόνια που διέρχονται από την ύλη στη χρωμόσφαιρα του Ήλιου.

Η ακτινοβολία Cherenkov (Cherenkov radiation) αποτελεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από φορτισμένα σωματίδια όταν αυτά διέρχονται από ένα οπτικά διαφανές μέσο

με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός σε αυτό το μέσο (Choppin et al., 2002).

2.5 Μεγέθη Δοσιμετρίας και Ακτινοπροστασίας

Για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση της ιονίζουσας ακτινοβολίας είναι απαραίτητος ο ορισμός συγκεκριμένων μεγεθών. Υπεύθυνες για αυτό είναι η Διεθνής Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU), καθώς και η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (International Commission on Radiological Protection, ICRP), ενώ ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση της έκθεσης είναι και το Εθνικό Συμβούλιο Ακτινοπροστασίας και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP).



Σχήμα 2.4: Σύνοψη των μεγεθών που χρησιμοποιούνται στη δοσιμετρία.

2.5.1 Ραδιομετρικά Μεγέθη

Τα ραδιομετρικά μεγέθη αποτελούν φυσικές μετρήσιμες ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση του πεδίου ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τα πιο σημαντικά είναι η ενεργότητα και η ροή, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

- **Ενεργότητα A**

Ως ενεργότητα (Activity) A μίας ποσότητας ραδιονουκλιδίου το οποίο βρίσκεται σε δεδομένη ενεργειακή στάθμη ορίζεται το πηλίκο της μέσης τιμής του αριθμού των αυθόρμητων ραδιενεργών διασπάσεων dN , μέσα σε ένα χρονικό διάστημα dt :

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.1)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Becquerel ($1 Bq = sec^{-1}$) ή το Curie, το οποίο αντιστοιχεί στην ενεργότητα ενός γραμμαρίου ^{226}Ra ($1 Ci = 37 GBq$).

- **Ροή σωματιδίων Φ**

Ως ροή (Fluence) Φ ορίζεται το πηλίκο του αριθμού σωματιδίων που προσπίπτουν σε μία στοιχειώδη επιφάνεια σφαίρας da προς την επιφάνεια αυτή:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2.2)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το $1m^{-2}$.

2.5.2 Δοσιμετρικά Μεγέθη

Τα δοσιμετρικά μεγέθη αφορούν μετρήσιμες φυσικές ποσότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της ενέργειας που απορροφάται σε ένα σημείο λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας. Τα κυριότερα είναι η απορροφούμενη δόση και το KERMA, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

- **Απορροφούμενη Δόση D**

Η απορροφούμενη δόση (Absorbed Dose) D είναι το πηλίκο της μέσης ενέργειας dE που απορροφάται τοπικά σε έναν στοιχειώδη όγκο λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας προς τη μάζα dm περιέχεται στον όγκο αυτό:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.3)$$

Μονάδες μέτρησης είναι το Gray ($1 Gy = 1 J/kg$) και το rad ($1 rad = 0.01 Gy$). Η απορροφούμενη δόση μπορεί να οριστεί για όλα τα είδη ακτινοβολίας, ανεξάρτητα από το αν η ακτινοβολία είναι άμεσα ή έμμεσα ιονίζουσα, και για οποιαδήποτε γεωμετρία ακτινοβολήσης. Αποτελεί μια καθαρά φυσική ποσότητα που δεν λαμβάνει υπόψη τις βιολογικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας, ούτε τη μικροσκοπική κατανομή ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής της ακτινοβολήσης.

Η μέση απορροφούμενη δόση $D_{T,R}$ σε ένα όργανο ή ιστό λόγω ακτινοβολίας τύπου R δίνεται από τη σχέση:

$$D_{T,R} = \frac{E_{T,R}}{m_T} \quad (2.4)$$

όπου $E_{T,R}$ η ολική ενέργεια που απορροφάται από το όργανο ή ιστό και m_T η μάζα του οργάνου ή ιστού αντίστοιχα.

- **KERMA K**

Με τον όρο KERMA (Kinetic Energy Release in Mass) K αναφερόμαστε στις έμμεσα ιονίζουσες ακτινοβολίες, κυρίως φωτόνια και νετρόνια. Ορίζεται ως το πηλίκο της κινητικής ενέργειας dE_K που μεταφέρεται σε δευτερογενή φορτισμένα σωματίδια από μη φορτισμένα σωματίδια σε έναν συγκεκριμένο όγκο προς τη στοιχειώδη μάζα dm του όγκου αυτού:

$$K = \frac{dE_K}{dm} \quad (2.5)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Gray, ενώ παλιότερα γινόταν χρήση του rad. Σαν μέγεθος σχετίζεται άμεσα με την ενέργεια που εναποτίθεται στη μάζα dm , οπότε για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η ίδια μονάδα με την απορροφούμενη δόση D .

2.5.3 Προστατευτικά Μεγέθη

Τα προστατευτικά μεγέθη δεν αποτελούν μετρήσιμες ποσότητες, παρά μόνο μπορούμε να τις υπολογίσουμε. Χρησιμοποιούνται για να συγκρίνουμε μια επίδραση στην υγεία που παρατηρείται μετά από έκθεση σε ακτινοβολία, αλλά και για την καθιέρωση νομικών ορίων έκθεσης. Αυτά περιλαμβάνουν τη γραμμικά μεταφερόμενη ενέργεια, τους παράγοντες βαρύτητας ακτινοβολίας και ιστού, την ισοδύναμη δόση και την ενεργό δόση, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

- **Γραμμικά Μεταφερόμενη Ενέργεια LET**

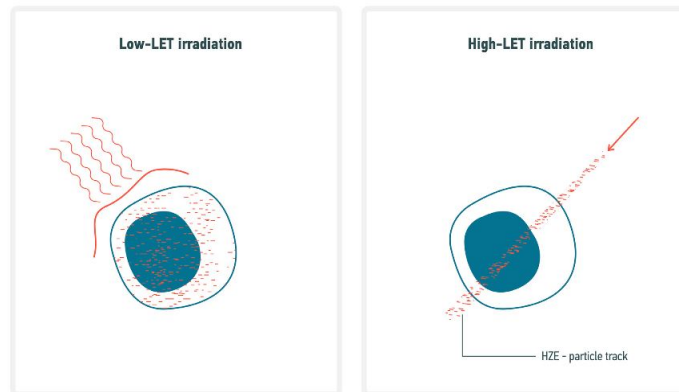
Η γραμμικά μεταφερόμενη ενέργεια (Linear Energy Transfer) LET εκφράζει την εναπόθεση ενέργειας dE_L από φορτισμένα σωματίδια σε ένα υλικό μέσω συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια του υλικού, ανά μονάδα μήκους dl μήκος της διαδρομής του:

$$LET = \frac{dE_L}{dl} \quad (2.6)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το $keV/\mu m$. Η LET παρουσιάζει αύξηση με αύξηση της μάζας ή του φορτίου, και μείωση με την αύξηση της ενέργειας.

Ως μέγεθος σχετίζεται άμεσα με τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, σωματίδια χαμηλής LET ($< 10 keV/\mu m$), δηλαδή φωτόνια, ηλεκτρόνια και

υψηλοενεργειακά πρωτόνια, προκαλούν λιγότερη βλάβη σε σχέση με σωμάτια υψηλής LET ($> 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$), όπως τα χαμηλοενεργειακά πρωτόνια, τα νετρόνια, τα σωμάτια α καθώς και βαρύτερα σωμάτια (τα σωματίδια υψηλής LET , που απαντώνται στο διαστημικό περιβάλλον ακτινοβολίας, λόγω υψηλού φορτίου και ενέργειας, συχνά αναφέρονται ως σωμάτια HZE). Αυτό συμβαίνει γιατί κατά μήκος της τροχιάς ενός σωματίου υψηλής LET , οι συγκρούσεις με τα ηλεκτρόνια του μέσου απέχουν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα να εναποτίθεται σημαντικότερη ποσότητα ενέργειας, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα πρόκλησης διπλής θραύσης στο DNA. Αντίθετα, σωμάτια χαμηλής LET εναποθέτουν την ενέργειά τους πιο ομοιόμορφα (Σχήμα 2.5).

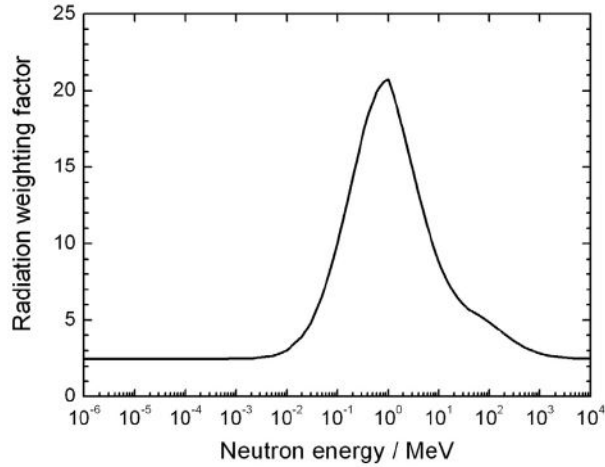


Σχήμα 2.5: Εναπόθεση ενέργειας από σωμάτια με χαμηλή LET (αριστερά) και υψηλή LET (δεξιά) (Cortese et al., 2018).

- Παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας w_R

Ο παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας (Radiation Weighting Factor) w_R είναι μια αδιάστατη σταθερά, αντιπροσωπευτικής της σχετικής βιολογικής δραστηριότητας (Relative Biological Effectiveness - RBE) διαφόρων τύπων ιονίζουσας ακτινοβολίας. Η RBE χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των βιολογικών επιπτώσεων που προκύπτουν από ακτινοβολίες διαφορετικής LET . Έτσι, ο w_R εξαρτάται με τη σειρά του από την τιμή της LET , με τον w_R να αυξάνεται με αύξηση της LET .

Οι τιμές του w_R για διάφορα είδη ακτινοβολίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Παρατηρούμε ότι η βιολογική βλάβη λόγω πρωτονίων και φορτισμένων πιονίων είναι 2 φορές μεγαλύτερη από αυτή που προκαλείται από φωτόνια και ηλεκτρόνια, και έως 20 φορές μεγαλύτερη αν πρόκειται για σωμάτια α και βαρύτερα ιόντα, όπως σωμάτια HZE. Η συνεισφορά των νετρονίων παρουσιάζεται μέσω μιας συνεχούς συνάρτησης της ενέργειας των νετρονίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Ο συντελεστής w_R για τα νετρόνια ως συνάρτηση της ενέργειας των νετρονίων (ICRP, 2013).

Είδος ακτινοβολίας	w_R
Φωτόνια (γ και X) όλων των ενεργειών	1
Ηλεκτρόνια (β) και μίονια όλων των ενεργειών	1
Πρωτόνια και φορτισμένα μίονια	2
Σωματία α , θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια, με $E_n < 1\text{MeV}$	$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
Νετρόνια, με $1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV}$	$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
Νετρόνια, $E_n > 50\text{MeV}$	$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}$

Πίνακας 2.1: Οι τιμές του παράγοντα βαρύτητα ιστού w_R , ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας, σύμφωνα με την ICRP (ICRP, 2007).

• Ισοδύναμη Δόση H_T

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι βιολογικές επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας εισάγεται η έννοια της ισοδύναμης δόσης (Equivalent Dose) H_T . Η $H_{T,R}$ ορίζεται ως το γινόμενο του παράγοντα βαρύτητας ακτινοβολίας w_R επί τη μέση απορροφούμενη δόση σε ένα όργανο ή ιστό λόγω ακτινοβολίας τύπου R :

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (2.7)$$

Για μικότο πεδίο ακτινοβολίας (διάφοροι τύποι και ενέργειες ακτινοβολιών) η σχέση γίνεται:

Όργανο / Ιστός	w_T	(%)
Πνεύμονες, στομάχι, κόλον, μαστοί, μυελός των οστών, επινεφρίδια, χοληδόχος κύστη, καρδιά, νεφρά, μύες, πάγκρεας, σπλήνα, θύμος αδένας, λεμφαδένες, λεπτό έντερο, στοματικός βλεννογόνο, προστάτης, μήτρα και τράχηλος.	0.12	0.72
Γονάδες (όρχεις, ωοθήκες).	0.08	0.08
Ουροδόχος κύστη, ήπαρ, οισοφάγος, θυροειδής αδένας.	0.04	0.16
Εγκέφαλος, επιφάνεια οστών, δέρμα, σιελογόνοι αδένες.	0.01	0.04

Πίνακας 2.2: Οι τιμές του παράγοντα βαρύτητας ιστού w_T , ανάλογα με το είδος του ιστού, σύμφωνα με την ICRP (ICRP, 2007). Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η συνολική συνεισφορά.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.8)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Sievert ($1 Sv = 1 J/kg$), ενώ μερικές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα rem ($1 rem = 0.01 Sv$).

Η ισοδύναμη δόση χρησιμοποιείται κυρίως για το καθορισμό των μη στοχαστικών αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας σε έναν ιστό ή όργανο. Όμως οι τιμές της RBE είναι συνήθως χαμηλότερες για μη στοχαστικά αποτελέσματα σε σχέση με τα στοχαστικά. Αυτό κάνει τελικά τη χρήση της H_T μία συντηρητική προσέγγιση.

- **Παράγοντας βαρύτητας ιστού w_T**

Ο παράγοντας βαρύτητας ιστού (Weighting Tissue Factor) w_T αποτελεί ένα σχετικό μέτρο του κινδύνου στοχαστικών επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν από την ακτινοβόληση ενός συγκεκριμένου είδους ιστού. Με βάση τις τιμές του w_T οι ιστοί ομαδοποιούνται ακολούθως στον Πίνακα 2.2, ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητας. Παρατηρούμε ότι ο εγκέφαλος, η επιφάνεια των οστών, το δέρμα και οι σιελογόνοι αδένες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην ακτινοβολία σε σχέση με τα όργανα φύλου, το στομάχι και τους πνεύμονες. Οι τιμές του w_T έχουν προκύψει από επιδημιολογικές μελέτες και προκύπτουν ως μέσος όρος για τα δύο φύλα και για όλες τις ηλικίες.

- **Ενεργός Δόση E**

Για τη σύγκριση ετερογενών καταστάσεων ακτινοβολίας που οδηγούν σε διαφορετικές

κατανομές ισοδύναμης δόσης σε όλο το σώμα, χρησιμοποιείται η ενεργός δόση Effective Dose E_T , η οποία ορίζεται για ένα συγκεκριμένο όργανο ή ιστό ως το γινόμενο του παράγοντα βαρύτητας του ιστού αυτού w_T επί την ισοδύναμη δόση $H_{T,R}$:

$$E_T = w_T H_{T,R} \quad (2.9)$$

Η E αποτελεί ουσιαστικά τη διπλά σταθμισμένη μέση απορροφούμενη δόση για όλα τα όργανα και τους ιστούς που έχουν υποστεί ακτινοβόληση:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.10)$$

Μονάδες μέτρησης είναι το Sievert (Sv) και το rem. Χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των στοχαστικών αποτελεσμάτων της ιονίζουσας ακτινοβολίας σε ολόκληρο το σώμα.

2.5.4 Λειτουργικά Μεγέθη

Για τους σκοπούς της ακτινοπροστασίας, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί με τη χρήση μιας μετρήσιμης ποσότητας, ο κίνδυνος που αντιπροσωπεύει για τον άνθρωπο ένα πεδίο ακτινοβολίας. Καθώς οποιαδήποτε ρεαλιστική κατάσταση μέτρησης θα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, γίνονται οι απαραίτητες απλοποιήσεις. Για το λόγο αυτό, ένας άνθρωπος αντιπροσωπεύεται από μια σφαίρα ICRU και η ισοδύναμη δόση καθορίζεται σε βάθος 0.07 mm για το δέρμα και 10 mm για εσωτερικά όργανα.

Πιο συγκεκριμένα, η σφαίρα ICRU αποτελεί ένα ομοίωμα αναφοράς (reference phantom) με διάμετρο 30 cm και πυκνότητα 1 g/cm^3 και σύσταση που προσομοιώνει ανθρώπινο μαλακό ιστό (76.2% O_2 , 11.1% C , 10.1% H_2 , 2.6% N_2) (ICRU, 1980). Οι διαστάσεις αυτές που χρησιμοποιούνται είναι περίπου ισοδύναμες με αυτές του ανθρώπινου σώματος.

Τα κυριότερα λειτουργικά μεγέθη είναι η ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος και η προσωπική ισοδύναμη δόση, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

- **Ισοδύναμη Δόση Περιβάλλοντος $H^*(d)$**

Η ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος (Ambient Dose Equivalent) $H^*(d)$ σε ένα σημείο P σε ένα δεδομένο πεδίο ακτινοβολίας ορίζεται ως η ισοδύναμη δόση που θα λαμβάνεται από το αντίστοιχο διευρυμένο και ευθυγραμμισμένο πεδίο στη σφαίρα ICRU σε βάθος $d \text{ mm}$ στο διάνυσμα ακτίνας που αντιτίθεται στην κατεύθυνση του ευθυγραμμισμένου πεδίου. Μονάδα μέτρησης της $H^*(d)$ είναι το Sievert (Sv).

Για έντονα διεισδυτική ακτινοβολία το βάθος των 10 mm θεωρείται ιδανικό. Έτσι, η $H^*(10)$ θεωρείται μια αρκετά καλή προσέγγιση της ισοδύναμης δόσης που λαμβάνεται από ένα βαθύ όργανο. Το μέγεθος $H^*(10)$, καθώς και ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$, χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

- **Προσωπική Ισοδύναμη δόση $H_p(d)$**

Η προσωπική δοσιμετρία περιλαμβάνει τη χρήση δοσιμέτρου για τη μέτρηση της ισοδύναμης δόσης στο στήθος. Έτσι, η προσωπική ισοδύναμη δόση (Personal Dose Equivalent) $H_p(d)$ ως η ισοδύναμη δόση σε μαλακό ιστό σε βάθος $d\text{ mm}$ στην περιοχή του στήθους. Οι $H_p(10)$ ανδ $H_p(0.07)$ είναι οι δύο τιμές που χρησιμοποιούνται για την προσωπική δοσιμετρία.

2.6 Ακτινοπροστασία

Στόχος της ακτινοπροστασίας είναι η προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντός του από τις επιπτώσεις της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύει στην αποτροπή οποιουδήποτε μη στοχαστικού αποτελέσματος λόγω έκθεσης σε ακτινοβολίας, καθώς και στον περιορισμό σε αποδεκτό επίπεδο όλα των στοχαστικών αποτελεσμάτων (IAEA, 2018).

2.6.1 Κατηγορίες και Καταστάσεις Έκθεσης

Σύμφωνα με την ICRP (ICRP, 2007), υπάρχουν τρία είδη καταστάσεων έκθεσης:

- **Προβλεπόμενη κατάσταση έκθεσης:** μια κανονικά προγραμματισμένη κατάσταση που εισάγει και χρησιμοποιεί κάποια ραδιενεργό πηγή.
- **Προϋπάρχουσα κατάσταση έκθεσης:** μια κατάσταση που υπάρχει ήδη όταν αποφασίζεται μία κατάσταση καταμέτρησης, όπως για παράδειγμα η φυσική έκθεση, ύπαρξη καταλοίπων από προηγούμενη δραστηριότητα, ή ραδόνιο.
- **Κατάσταση έκθεσης έκτακτης ανάγκης:** μια απροσδόκητη κατάσταση έκθεσης που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια μίας προγραμματισμένης ή εσκεμμένης κατάστασης όπου απαιτείται επείγουσα δράση.

Επιπλέον, αναφέρονται τρεις κατηγορίες έκθεσης:

- **Επαγγελματική έκθεση (Occupational exposure):** αφορά την έκθεση σε ακτινοβολία που λαμβάνεται από έναν εργαζόμενο, οφείλεται στην εργασία του εργαζομένου και

	Επαγγελματική Έκθεση	Έκθεση Κοινού	Ιατρική Έκθεση
Προβλεπόμενη Κατάσταση Έκθεσης	π.χ. εργασία σε νοσοκομείο ή βιομηχανία εξορύξεων	π.χ. επίσκεψη σε νοσοκομείο διαμονή κοντά σε πυρ. αντιδραστήρα	π.χ. ακτινογραφία, αξονική ακτινοθεραπεία
Προϋπάρχουσα Κατάσταση Έκθεσης	π.χ. πληρώματα αεροσκαφών και διαστημοπλοίων για έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία	π.χ. ραδόνιο στο σπίτι	-/-
Κατάσταση Έκθεσης Έκτακτης Ανάγκης	π.χ. άμεση απόκριση σε ατύχημα	π.χ. ατύχημα	-/-

Πίνακας 2.3: Οι κατηγορίες και οι καταστάσεις έκθεσης (Πηγή: icrpaedia.org).

λαμβάνεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου εργασίας. Τέτοια έκθεση μπορεί να συμβεί σε βιομηχανίες, στις εξορύξεις, σε ιατρικά ιδρύματα, σε εκπαιδευτικά και ερευνητικά ιδρύματα, σε εγκαταστάσεις πυρηνικών καυσίμων, αλλά και στις αερομεταφορές (πληρώματα αεροσκαφών) και τις επανδρωμένες διαστημικές αποστολές.

- **Δημόσια έκθεση** (Public exposure): αφορά την έκθεση σε ακτινοβολία του κοινού, εξαιρώντας την επαγγελματική ή ιατρική έκθεση, χωρίς να περιλαμβάνει τη φυσική τοπική ραδιενέργεια υποβάθρου.
- **Ιατρική έκθεση** (Medical exposure): περιλαμβάνει την έκθεση του ασθενούς, την έκθεση της οικογένεια ή της κοινότητα του ασθενούς που μπορεί να ενεργεί ως φροντιστές καθώς και οποιαδήποτε έκθεση στο πλαίσιο της βιοϊατρικής έρευνας.

Οι κατηγορίες και οι καταστάσεις έκθεσης εξετάζονται μαζί για να βοηθήσουν στην καλύτερη προσέγγιση της ακτινοπροστασίας σε μια συγκεκριμένη περίπτωση, όπως στα παραδείγματα που φαίνονται στον Πίνακα 2.3.

2.6.2 Αρχές Ακτινοπροστασίας

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται γενικά για τον καθορισμό των επιπέδων προστασίας. Η πρώτη προσέγγιση είναι προσανατολισμένη στην πηγή, με την ατομική δόση να καθορίζεται σε σχέση με την πηγή και δεν πρέπει να ξεπεραστεί. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται 'επίπεδο αναφοράς (reference level)' και δεν αποτελεί κάποιο νομικό όριο. Το όριο αυτό παρέχει την πρόσθετη ευελιξία που απαιτείται σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και σε υπάρχουσες

καταστάσεις έκθεσης για να διασφαλιστεί η βέλτιστη προστασία. Ωστόσο, εάν ξεπεραστεί αυτό το όριο, η κατάσταση πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η δεύτερη προσέγγιση είναι ατομική, και ισχύει μόνο για προγραμματισμένες καταστάσεις έκθεσης. Στην προσέγγιση αυτή, καθορίζεται μια δόση, ίση το άθροισμα των δόσεων που λαμβάνονται από όλες τις ρυθμιζόμενες πηγές, η οποία δεν πρέπει να ξεπεραστεί. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται 'όριο ατομικής δόσης' (individual dose limit).

Δύο από τις βασικές αρχές της ακτινοπροστασίας συνδέονται με την προσέγγιση που είναι προσανατολισμένη στην πηγή και ισχύουν για όλες τις καταστάσεις έκθεσης (Τεκμηρίωση και Βελτιστοποίηση). Αντίστοιχα, μία αρχή συνδέεται με την ατομική προσέγγιση και ισχύει για προγραμματισμένες καταστάσεις έκθεσης, εκτός από την ιατρική έκθεση (Καθορισμός ορίων δόσεων). Οι βασικές αυτές αρχές της ακτινοπροστασίας συνοψίζονται ως εξής:

- **Τεκμηρίωση (Justification)**

Σύμφωνα με την αρχή της τεκμηρίωσης, κάθε δραστηριότητα που συνεπάγεται ραδιολογικό κίνδυνο πρέπει να είναι αιτιολογημένη, και οποιεσδήποτε εναλλακτικές διαδικασίες πρέπει να εξετάζονται και να χρησιμοποιούνται όταν είναι απαραίτητο. Η ωφέλεια δηλαδή λόγω ακτινοβολίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις.

- **Βελτιστοποίηση (As Low As Reasonably Achievable - ALARA)**

Η ανίχνευση των στοχαστικών αποτελεσμάτων λόγω ακτινοβολίας και η υπόθεση της έλλειψης κατωφλίου για αυτά, οδηγεί στην ανάγκη της βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης, η δόση πρέπει να διατηρείται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα, λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες, προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός της ακτινοβολήσης. Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης εξετάζονται η πιθανότητα έκθεσης, ο αριθμός των ατόμων που εκτίθενται και η ατομική δόση των ατόμων που εκτέθηκαν.

- **Καθορισμός ορίων δόσεων (Individual Dose Limits)**

Η εφαρμογή των αρχών της τεκμηρίωσης και της βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσουν σε ένα μικρό αριθμό ατόμων που θα λαμβάνουν υψηλές δόσεις. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνει καθορισμός και των ατομικών ορίων δόσης. Τα όρια δόσεων από μόνα τους δεν είναι αρκετά για να διασφαλιστεί επαρκής προστασία (Angelopoulos and Sakelliou, 1994). Λειτουργούν σε συνδυασμό με τις θεμελιώδεις αρχές της αιτιολόγησης και της βελτιστοποίησης. Ισχύουν μόνο για δόσεις που λαμβάνονται πέρα από τη φυσιολογική τοπική

ακτινοβολία υποβάθρου, ενώ δεν ισχύουν για ιατρική έκθεση, καθώς η αποτελεσματικότητα της διάγνωσης ή της θεραπείας μπορεί να μειωθεί, κάνοντας περισσότερο κακό παρά καλό για τον ασθενή. Η έμφαση δίνεται στην αιτιολόγηση των ιατρικών διαδικασιών και στη βελτιστοποίηση της προστασίας.

Τα όρια για την ενεργό δόση, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση, έχουν σχεδιαστεί για την αποφυγή κινδύνων λόγω στοχαστικών επιδράσεων που θα θεωρούνται μη ανεκτή σε μια προβλεπόμενη κατάσταση έκθεσης. Τα όρια ισοδύναμης δόσης για ένα όργανο, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση, έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν την εμφάνιση μη στοχαστικών αποτελεσμάτων. Στα πλαίσια αυτά, διακρίνονται διαφορετικά όρια για επαγγελματική έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία σε σχέση με το γενικό πληθυσμό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.6. Τα όρια αυτά είναι σύμφωνα με τις οδηγίες από την ICRP 103 (ICRP, 2007). Εξάιρεση αποτελούν τα όρια για την ισοδύναμη δόση στα μάτια, τα οποία είναι σύμφωνα με την ICRP 118 (ICRP, 2012). Η υπέρβαση των ορίων δόσης είναι αντίθετη με τους κανονισμούς στις περισσότερες χώρες.

Σύμφωνα με τη φιλοσοφία της ICRP, το όριο δόσης ορίζεται ως η τιμή δόσης πάνω από την οποία ο κίνδυνος λόγω ακτινοβολίας γίνεται μη αποδεκτός (unacceptable). Κάτω από το όριο αυτό, ο κίνδυνος θεωρείται ανεκτός (tolerable). Η εφαρμογή της αιτιολόγησης και της βελτιστοποίησης οδηγεί σε αποδεκτό κίνδυνο (acceptable). Η αρχή της βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στην περίπτωση δραστηριοτήτων που δεν προσφέρουν ενεργό δόση μεγαλύτερη από $100 \mu Sv$ ανά έτος για άτομα με επαγγελματική έκθεση σε ακτινοβολία. Κάτω από την τιμή αυτή, ο κίνδυνος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος (negligible).

2.7 Βιολογικές Επιπτώσεις Ακτινοβολιών

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για τους ζωντανούς οργανισμούς καθώς μπορεί να προκαλέσει σωματικές μεταλλάξεις (πρόκληση καρκίνου και άλλων συμπτωμάτων) και γενετικές μεταλλάξεις που επηρεάζουν και τις επόμενες γενιές (ασθένειες, αύξηση θνησιμότητας). Παράλληλα, επιδρά στο έμβρυο κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης (τερματισμός εγκυμοσύνης, τερατογένεση), ενώ μπορεί να προκαλέσει ακόμα και άμεσο θάνατο (Margari-tis, 1987). Η ικανότητα της ιονίζουσας ακτινοβολίας να προκαλεί γενετικές μεταλλάξεις είναι γνωστή πολύ πριν από την ανακάλυψη της δομής της διπλής έλικας του DNA από τη Rosalind Franklin και στη συνέχεια από τους Watson και Crick το 1953, ή και ακόμα πιο πριν από το πείραμα Hershey-Chase, όπου αποδείχθηκε ότι το DNA πράγματι αποτελεί το γενετικό υλικό. Η πιο σημαντική επίδραση της ακτινοβολίας στο ζωντανό κύτταρο είναι η βλάβη στα χρωμο-

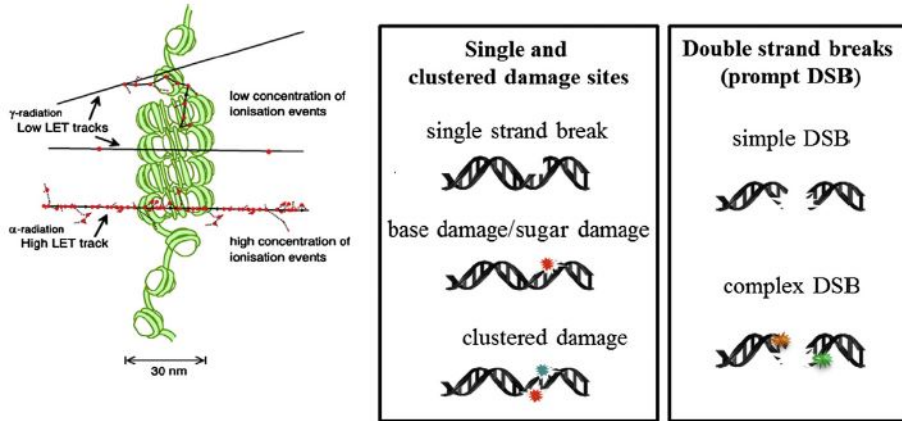
σώματα και πιο συγκεκριμένα στο DNA. Αυτή η βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε κυτταρικό θάνατο αλλά και να προκαλέσει μεταλλάξεις αλλάζοντας την πηγή των γενετικών πληροφοριών. Οι επιδράσεις τηςιονίζουσας ακτινοβολίας στο DNA τείνουν να είναι πιο σοβαρές σε σχέση με άλλα βιολογικά μακρομόρια, με πολλές συστηματικές επιπτώσεις στην υγεία να είναι το αποτέλεσμα βλάβης του DNA και χρωμοσωμικής βλάβης (Cortese et al., 2018).

Η πλειονότητα των βλαβών στο κυτταρικό DNA που προκαλούνται απόιονίζουσα ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά σε φυσικές και χημικές ιδιότητες από εκείνες που προκαλούνται από ενδογενείς πηγές, με το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των βλαβών αυτών να είναι η πολυπλοκότητά τους (Becker and Sevilla, 1993). Γενικότερα, όσο πιο πολύπλοκος είναι ένας οργανισμός, τόσο αυξάνεται η ευαισθησία του στην ακτινοβολία. Κατά την επίδραση τηςιονίζουσας ακτινοβολίας στα κύτταρα, διακρίνονται τα εξής διαδοχικά στάδια (Angelopoulos and Sakelliou, 1994; Margaritis, 1987):

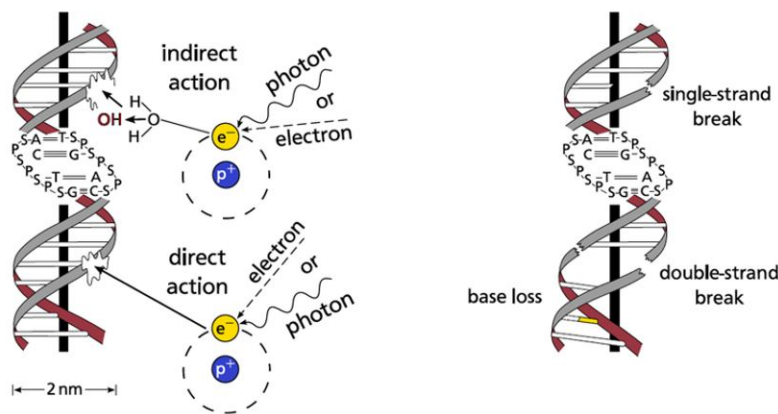
- Φυσικό στάδιο ($10^{-18} - 10^{-13} \text{ sec}$): εδώ λαμβάνει χώρα η πρώτη επαφή της ακτινοβολίας με τα μόρια ή άτομα του κυττάρου μέσω ιονισμών και διεγέρσεων.
- Φυσιχοχημικό στάδιο ($10^{-13} - 10^{-3} \text{ sec}$): εδώ σχηματίζονται οι πολύ δραστικές και βραχύβιες ελεύθερες ρίζες.
- Βιοχημικό στάδιο ($10^{-3} - 10^3 \text{ sec}$): εδώ οι ελεύθερες ρίζες αντιδρούν τόσο μεταξύ τους όσο και με άλλα μόρια προκαλώντας μόνιμες αλλαγές σε συστατικά σημαντικά για το μεταβολισμό των κυττάρων και σχηματισμό αλλοιωμένων μορίων.
- Βιολογικό στάδιο ($10^3 - 10^{10} \text{ sec}$): εδώ εκδηλώνονται μη φυσιολογικά φαινόμενα σε μοριακό επίπεδο (αναστολή πρωτεϊνσύνθεσης), σε κυτταρικό επίπεδο (αναστολή κυτταρικής διαίρεσης) και σε επίπεδο οργανισμού (εκδήλωση συμπτωμάτων, διακοπή ζωής).

Η βλάβη από την ακτινοβολία στο DNA προέρχεται, λοιπόν, κυρίως από το σχηματισμό ελευθέρων ριζών και μπορεί να ταξινομηθεί είτε ως δομική βλάβη (Σχήμα 2.7) που οδηγεί σε θραύση φωσφοδιεστερικών δεσμών και επακόλουθο απλό σπάσιμο της έλικας του DNA (Single Strand Break - SSB) ή διπλό σπάσιμο (Double Strand Break - DSB), είτε ως αλλαγή στις γενετικές πληροφορίες που προκαλούνται με χημική τροποποίηση των μεμονωμένων βάσεων DNA λόγω ακτινοβολίας, όπως διαγραφή (καταστροφή) μιας βάσης ή δημιουργία χημικού δεσμού μεταξύ δύο περιοχών του DNA (Σχήμα 2.8). Η έκθεση σε ακτίνες X 1 mGy προκαλεί ένα SSB ανά κύτταρο κατά μέσο όρο, ενώ DSB συμβαίνουν λιγότερο συχνά, σε 0,04 θέσεις ανά κύτταρο (MOE, 2016). Και οι δύο τύποι βλάβης μπορεί να είναι θανατηφόροι και να οδηγήσουν σε μεταλλάξεις. Πιο συγκεκριμένα, τα SSB μπορεί να λάβουν χώρα στο φωσφοδιεστερικό δεσμό

ή στο δεσμό ανάμεσα σε μία βάση και το σάκχαρο, ενώ τα DSB περιλαμβάνουν σπάσιμο και στις δύο έλικες. Οι βάσεις μπορεί να υποστούν βλάβη ή να καταστραφούν ή να μεταβληθούν χημικά, με τη σημαντικότητα αυτής της βλάβης να είναι λιγότερη από το SSB.



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση των τύπων βλάβης του DNA που δημιουργούνται από τη διέλευση ακτινοβολίας κατά μήκος μιας διαδρομής. Τα χρωματιστά αστέρια αντιπροσωπεύουν αλλοιώσεις βάσης ή πεντόζης (Lomax et al., 2013).



Σχήμα 2.8: Η άμεση βλάβη προκαλείται από την εναπόθεση ενέργειας σε απευθείας χτυπήματα από ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται σε διεργασίες ιονισμού. Οι ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου (OH), που σχηματίζονται με ιονισμό στην υδρόλυση του νερού, μπορούν να προκαλέσουν έμμεση βλάβη στο DNA σε χημικές αντιδράσεις (Richter, 2012).

Το DSB τείνει να είναι η πιο κρίσιμη από τις βλάβες λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας για την τύχη των κυττάρων και μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως ο βασικός παράγοντας πυροδότησης της κυτταρικής απόκρισης και της προσαρμογής στην έκθεση σε ακτινοβολία, λόγω της κυτταροτοξικότητάς του. Πρόκειται για ένα σπάσιμο στον φωσφοδιεστερικό δεσμό και των δύο

κλώνων του DNA που διαχωρίζεται από περίπου 10 ζεύγη βάσεων, με το σύνθετο DSB να έχει τουλάχιστον ένα ακόμα επιπλέον σπάσιμο μεταξύ των σπασιμάτων αυτών. Θεωρείται ως η κύρια ραδιοτοξική βλάβη, με ελάχιστα DSB να προκαλούνται ενδογενώς. Τόσο τα απλά όσο και τα σύνθετα DSB προκαλούνται από ιονίζουσα ακτινοβολία με 3' άκρα μπλοκαρίσματος, π.χ. 3'-φωσφορικών ή 3'-φωσφογλυκολικών τμημάτων, και έχουν μονόκλωνες προεξοχές μεταβλητού μήκους, με τα σύνθετα DSB να εμφανίζουν υψηλή συχνότητα τροποποίησης οξειδωσης βάσεων και αβασικών τοποθεσιών που γειτνιάζουν άμεσα με τα άκρα των DSB. Έτσι, τα DSB εμφανίζουν μια ιδιαίτερα σύνθετη δομική και χημική πολυπλοκότητα, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μειωμένη δυνατότητα αποκατάστασης σε σύγκριση με εκείνη των μεμονωμένων βλαβών.

Τόσο τα είδη ακτινοβολίας με χαμηλό LET όσο και αυτές με υψηλό LET προκαλούν βλάβες στο DNA, με την πολυπλοκότητα της ζημιάς να ποικίλλει ανάλογα με το LET. Κατά την έκθεση σε ακτινοβολία χαμηλού LET, περίπου το 70% της εναποτιθέμενης ενέργειας προκαλεί απομονωμένες βλάβες, οι οποίες αυξάνουν το οξειδωτικό φορτίο του κυττάρου, ενώ το υπόλοιπο 30% προκαλεί ομαδοποιημένες θέσεις βλαβών διαφορετικής δομικής και χημικής πολυπλοκότητας. Για έκθεση σε ακτινοβολία υψηλού LET, περίπου το 90% της εναποτιθέμενης ενέργειας οδηγεί σε ομαδοποιημένες περιοχές βλαβών, συμπεριλαμβανομένων των DSB. Πιο συγκεκριμένα, το 80% των DSB προκαλείται κυρίως από ακτινοβολία υψηλού LET, με αποτέλεσμα τη ακτινοβολία υψηλού LET να έχει εντονότερη καρκινογόνο δράση, καθώς τα DSB οδηγούν σε πιο ανεπανόρθωτες βλάβες στο DNA.

Η βλάβη της ακτινοβολίας στο DNA λαμβάνει χώρα με διάφορους τρόπους, οι οποίοι, μέχρι τώρα, έχουν ταξινομηθεί σε άμεσους ή έμμεσους. Το άμεσο αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε άμεσο ιονισμό του DNA με αποτέλεσμα τον σχηματισμό δραστικών κατιόντων και ανιόντων στο ίδιο το DNA. Το έμμεσο αποτέλεσμα αντιστοιχεί στην εναπόθεση ενέργειας στη γύρω περιοχή (κυρίως νερό) ακολουθούμενη από επίθεση από δραστικές ρίζες (HO-, e-, H-) από την περιοχή αυτή. Ωστόσο, σε πολύπλοκα συστήματα όπως το κύτταρο, η βλάβη μπορεί επίσης να προκληθεί από ακτινοβόληση μορίων που συνδέονται με το DNA (συμπεριλαμβανομένου του νερού διαλυτοποίησης, των πρωτεϊνών ιστόνης και άλλων δεσμευμένων πρωτεϊνών) που μεταφέρουν θετικές σπές και / ή ηλεκτρόνια στους κλώνους του DNA ή που αργότερα αντιδρούν με διασύνδεση ή με αφαίρεση υδρογόνου. Έτσι, η κατηγοριοποίηση σε άμεσες και έμμεσες έχει γίνει λιγότερο χρήσιμη και κάπως συγκεχυμένη. Αντίθετα, η ταξινόμηση των μηχανισμών βλάβης σε τρία ξεχωριστά αποτελέσματα, άμεσα (direct effects), σχεδόν άμεσα (quasi-direct effect) και έμμεσα (indirect effects), αντικατοπτρίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πλήρες φάσμα των διαδικασιών που συμβαίνουν. Ο όρος άμεσο αποτέλεσμα διατηρεί τη συνήθη σημασία του. Το έμμεσο αποτέλεσμα περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία οι δραστικές ρίζες του νερού και οι δευτερογενείς ρίζες

πρωτεΐνης διαχέονται και αντιδρούν με το DNA. Αυτό μπορεί να προκαλέσει δραστικά κατιόντα βάσης DNA από την ρίζα υδροξυλίου, πιθανώς μέσω αντίδρασης προσθήκης-αφυδάτωσης δύο σταδίων και δραστικών ανιόντων βάσης από τη σύνδεση e-. Ο νέος όρος 'σχεδόν άμεση επίδραση' αναφέρεται σε μια τρίτη διαδικασία: οι ιονισμοί λόγω ακτινοβολίας οδηγούν σε οπές και ηλεκτρόνια σε βιομοριακά είδη και το νερό που βρίσκονται πολύ κοντά στο DNA, τα οποία στη συνέχεια υφίστανται γρήγορη μεταφορά στο DNA για να σχηματίσουν ρίζες ιόντων στο ίδιο το DNA. Είναι σαφές ότι οι άμεσες, σχεδόν άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τα ίδια δραστικά είδη (Becker and Sevilla, 1993).

Επιπλέον, η κοσμική ακτινοβολία, ως ιονίζουσα ακτινοβολία, είναι σε θέση να απομακρύνει, τουλάχιστον, ένα ηλεκτρόνιο από ένα άτομο ή μόριο δημιουργώντας ελεύθερες ρίζες (Reactive Oxygen Species - ROS). Αυτές χωρίζονται σε δραστικές (υπεροξειδίο, υδροξύλιο, υπεροξύλιο, αλκοξύλιο και υδροϋπεροξύλιο) και μη δραστικές (υπεροξειδίο υδρογόνου, όζον, απλό οξυγόνο, υπεροξυνιτρώδες και υποχλωριώδες οξύ). Σε υψηλές συγκεντρώσεις, προκαλούν προβλήματα στις φυσιολογικές κυτταρικές λειτουργίες, για παράδειγμα, οξειδώνοντας λιπίδια, μειώνοντας τα σάκχαρα και τα αμινοξέα ή προκαλώντας μεγάλο αριθμό τροποποιήσεων στις πουρίνες και τις πυριμιδίνες. Οι αντιδράσεις με πρωτεΐνες μπορούν να οδηγήσουν σε διάσπαση της πρωτεΐνης, διασύνδεση ή απώλεια δομικών και / ή καταλυτικών λειτουργιών. Τα συστήματα αποικοδόμησης των κυτταρικών πρωτεϊνών μπορεί, ή όχι, να αναγνωρίζουν αυτές τις ανώμαλες πρωτεΐνες. Όταν δεν αναγνωρίζονται, οι ανώμαλες πρωτεΐνες θα συσσωρευτούν και, με την πάροδο του χρόνου, θα προκαλούν επιβλαβείς επιδράσεις σε κύτταρα ή οργανισμούς (Silva et al., 2013).

Όλοι οι ευκαρυωτικοί οργανισμοί έχουν εξελιχθεί στα πλαίσια μιας συνεχούς έκθεσης σε ενδογενή και εξωγενή μεταλλαξιογόνα, και ως εκ τούτου έχουν αναπτύξει ισχυρούς κυτταρικούς μηχανισμούς για την επισκευή του DNA και την προστασία από βλάβες στο DNA. Οι μηχανισμοί κυτταρικής προστασίας έναντι βλάβης και μετάλλαξης του DNA και της επισκευής του DNA μπορούν να χαρακτηριστούν ως μηχανισμοί άμεσης και προσαρμοστικής άμυνας. Αυτοί περιλαμβάνουν την παραγωγή αντιοξειδωτικών που εξουδετερώνουν τις ελεύθερες ρίζες που παράγονται από το μεταβολισμό του οξυγόνου, την ιονίζουσα και την υπεριώδη ακτινοβολία, διάφορους μηχανισμούς επισκευής του DNA (όπως επισκευή άμεσης αναστροφής ή εκτομής βάσης, την επιδιόρθωση νουκλεοτιδίων, την επισκευή αναντιστοιχίας για μονόκλωνες τροποποιήσεις, τη μη ομόλογη τελική ένωση, τον ομόλογο ανασυνδυασμό για DSB και την επιδιόρθωση διασταυρούμενης ζεύξης για τροποποιήσεις που επηρεάζουν και τους δύο κλώνους), την εξάλειψη των κατεστραμμένων κυττάρων μέσω απόπτωσης, και την αναπαραγωγική γήρανση (Willers et al., 2004). Οι κυτταρικοί μηχανισμοί επιδιόρθωσης επιδιορθώνουν αποτελεσματικά το μεγαλύτερο μέρος της βλάβης του DNA, συμπεριλαμβανομένων των SSB και της βλάβης σε βάσεις,

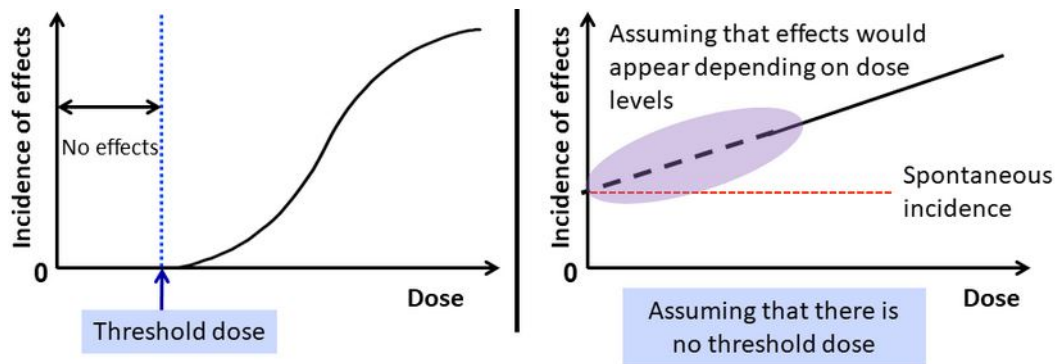
αλλά μόνο ένα κλάσμα των DSB.

Καθώς τα ευκαρυωτικά κύτταρα επιδιορθώνουν τις βλάβες στο DNA (κυρίως τα DSB) μέσω της μεθόδου της μη ομόλογης τελικής σύνδεσης ή του αλληλικού ανασυνδυασμού, παρουσιάζεται μια τάση απώλειας γενετικών πληροφοριών είτε μέσω απώλειας ετεροζυγωτικότητας και διαγραφών είτε μέσω γενετικών αναδιατάξεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι βλάβες στο DNA να επανορθώνονται λανθασμένα και να επιβιώνουν. Το γεγονός αυτό είναι υπεύθυνο για τα απώτερα αποτελέσματα της έκθεσης σε ακτινοβολία και μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές κυτταρογενετικές αλλοιώσεις και κυτταρικό θάνατο, ή μετασχηματισμό και ογκογονικότητα μέσω της απενεργοποίησης γονιδίων καταστολής όγκων έως και ενεργοποίηση ορισμένων ογκογονιδίων.

Τα πιθανά βιολογικά αποτελέσματα των ακτινοβολιών διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι κατωφλίου στην καμπύλη δόσης - ανταπόκρισης (Σχήμα 2.9). Αυτά είναι τα εξής:

- **Μη στοχαστικά αποτελέσματα (Deterministic effects):** πρόκειται για αποτελέσματα που εμφανίζονται όταν η δόση ξεπερνά μία δόση κατωφλίου. Η εμφάνισή τους σε χαμηλότερες δόσης είναι αδύνατη, ενώ για τιμές δόσης μεγαλύτερες του κατωφλίου, η σφοδρότητα της βλάβης αυξάνεται με την αύξηση της δόσης. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συνήθως άμεσα και εκδηλώνονται σε μικρό χρονικό διάστημα από την ακτινοβόληση. Περιλαμβάνουν την καταστροφή των αιμοφόρων αγγείων, την ελάττωση της γονιμότητας και την εμφάνιση καταρράκτη στα μάτια (Angelopoulos and Sakelliou, 1994).
- **Στοχαστικά αποτελέσματα (Stochastic effects):** πρόκειται για αποτελέσματα που εμφανίζονται τυχαία σε μερικά άτομα ύστερα από ακτινοβόληση ενός πληθυσμού. Δεν υπάρχει τιμή κατωφλίου ενώ η σφοδρότητα της βλάβης δεν καθορίζεται από την τιμή της δόσης. Αντίθετα, η τιμή της δόσης καθορίζει την πιθανότητα εμφάνισης της βλάβης. Τα αποτελέσματα αυτά είναι συνήθως απώτερα και εκδηλώνονται σε μεγάλο χρονικό διάστημα από την ακτινοβόληση (χρόνια έως και δεκαετίες). Περιλαμβάνουν την καρκινογένεση και τη γενετική επιβάρυνση, τα οποία μπορεί να εκδηλωθούν ακόμα και σε μηδενική δόση (Angelopoulos and Sakelliou, 1994).

Γενικά, αν οι χρωμοσωμικές αλλοιώσεις συμβούν σε ένα σωματικό κύτταρο, η πιθανή βιολογική επίδραση σχετίζεται με την ανάπτυξη και τη ζωή του οργανισμού. Αν, όμως, οι αλλοιώσεις συμβούν σε ένα γενετικό κύτταρο, τότε οι αλλοιώσεις αυτές θα μεταβιβαστούν σε όλα τα κύτταρα των επόμενων γενεών. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει κατώφλι για τις γενετικές επιδράσεις των ακτινοβολιών (Angelopoulos and Sakelliou, 1994).

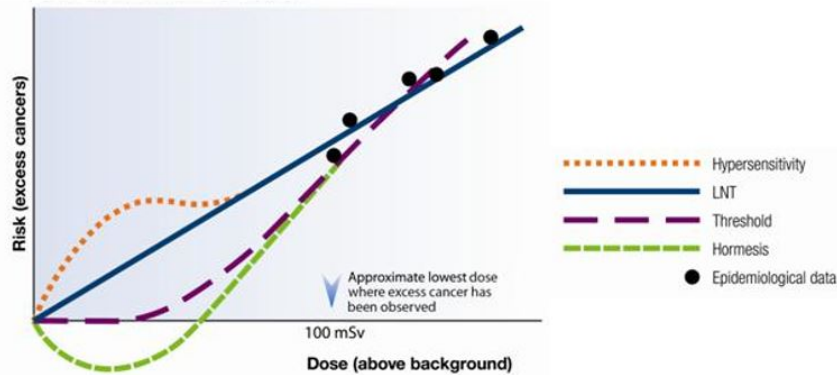


Σχήμα 2.9: Καμπύλη δόσης - ανταπόκρισης. Η ύπαρξη ή μη κατωφλίου χαρακτηρίζει αντίστοιχα τα μη στοχαστικά αποτελέσματα (αριστερά) και τα στοχαστικά αποτελέσματα (δεξιά) (MOE, 2016).

Για την αξιολόγηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου λόγω έκθεσης σε χαμηλές δόσεις, χρησιμοποιούνται κυρίως τα αποτελέσματα των επιδημιολογικών ερευνών των επιζώντων από τις ατομικές βόμβες στη Hiroshima και το Nagasaki. Ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά καθώς η δόση έκθεσης αυξάνεται πάνω από περίπου τα 150 mSv . Ωστόσο, δεν είναι σαφές εάν οι κίνδυνοι αυξάνονται επίσης γραμμικά στην περίπτωση έκθεσης σε ακτινοβολία σε δόσεις 150 mSv , λόγω έλλειψης επαρκών επιδημιολογικών δεδομένων για έκθεση σε τόσο χαμηλές δόσεις. Επιπλέον, πειράματα με τη χρήση ζώων ή κυτταροκαλλιιεργειών αποκάλυψαν ότι η σύγκριση της έκθεσης σε υψηλές δόσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα με την εμπειρία των επιζώντων ατομικής βόμβας και των εκθέσεων χαμηλής δόσης για μεγάλο χρονικό διάστημα, το τελευταίο ενέχει χαμηλότερους κινδύνους όταν οι συνολικές δόσεις έκθεσης είναι οι ίδιες. Η ICRP καθορίζει τα πρότυπα ακτινοπροστασίας για εκθέσεις χαμηλής δόσης, υποθέτοντας ότι οι επιδράσεις θα εμφανίζονται ανάλογα με τα επίπεδα της δόσης (γραμμική απόκριση δόσης), ενώ αυτή τη στιγμή προτείνονται και διάφορα άλλα μοντέλα (Σχήμα 2.10). Από αυτά, το μοντέλο υπερευαισθησίας (Hypersensitivity model) υποδηλώνει μεγαλύτερο κίνδυνο σε χαμηλότερες δόσεις, το μοντέλο LNT είναι η ευθεία που παρεκτείνεται στο μηδέν, πράγμα που σημαίνει ότι ο κίνδυνος καρκίνου θα αυξηθεί με την αύξηση της δόσης, το μοντέλο κατωφλίου (Threshold model) υπονοεί ότι κάτω από μια συγκεκριμένη δόση, δεν υπάρχει κίνδυνος, ενώ το μοντέλο Hormesis υποδηλώνει ότι οι χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας μπορεί να είναι ακόμη προστατευτικές και ευεργετικές.

2.8 Έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία

Στο επίπεδο εδάφους, η κοσμική ακτινοβολία αντιπροσωπεύει μόνο περίπου το 10% της ακτινοβολίας υποβάθρου (Di Trollo et al., 2015), ενώ η παγκόσμια μέση έκθεση σε κοσμική



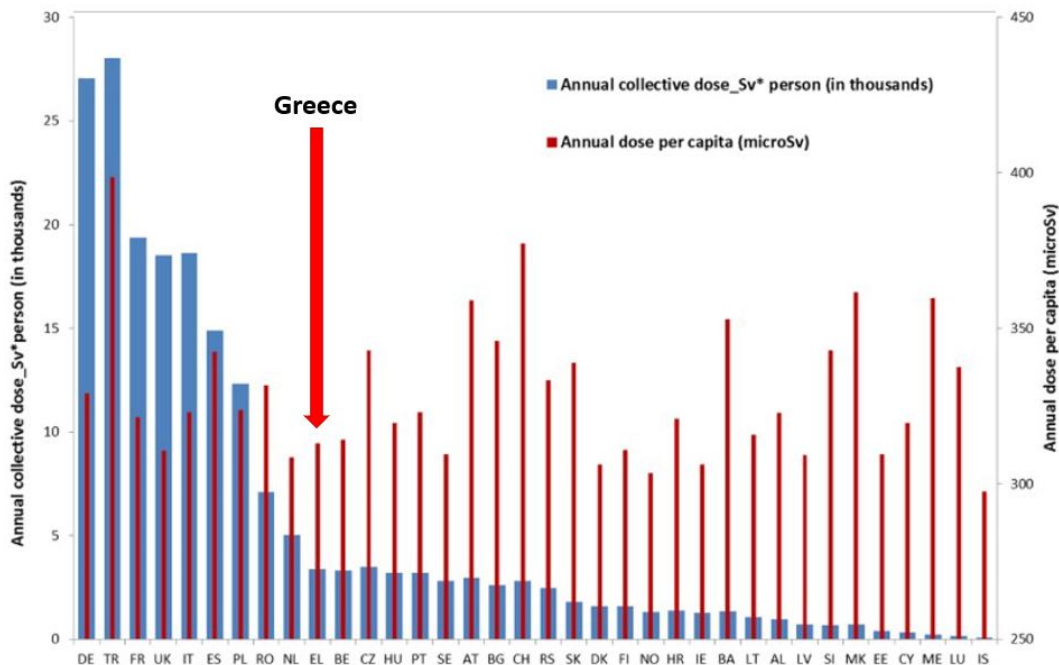
Σχήμα 2.10: Μοντέλα για τους κινδύνους στην υγεία από την έκθεση σε χαμηλά επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας (CNSC, 2013).

ακτινοβολία συμβάλλει περίπου στο 13% της συνολικής ετήσιας ενεργού δόσης που λαμβάνεται από τον πληθυσμό (UNSCEAR, 2008). Για την Ευρώπη, η ετήσια δόση λόγω κοσμικής ακτινοβολίας είναι γενικά κάτω από $360 \mu Sv$ και για λιγότερο από 1% πάνω από $1000 \mu Sv$. Οι υψηλότερες τιμές αφορούν τα υψηλότερα μέρη της Ευρώπης, όπως οι Άλπεις, τα Πυρηναία και η ανατολική Τουρκία (βουνά με υψόμετρο πάνω από $3000 m$) και αγγίζουν τη μέγιστη τιμή των $3955 \mu Sv$. Οι μεσαίες τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ $400 - 900 \mu Sv$, σχετίζονται επίσης με φυσικό υψόμετρο, για παράδειγμα, στην Ισπανία με μέσο ύψος $600 m$ ή στην ευρωπαϊκή πεδιάδα, η οποία εκτείνεται σε απόσταση $2 km$, από τις γαλλικές ακτές του Ατλαντικού έως τα Ουράλια Όρη (Σχήμα 2.11). Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή των $301 \mu Sv$ στο επίπεδο της θάλασσας συμπίπτει κυρίως με τις παράκτιες τοποθεσίες, με εξαίρεση τα παράκτια βουνά της Νορβηγίας (Cinelli et al., 2017; Wissmann et al., 2005).

Αντίστοιχα, στις ΗΠΑ, η μέση ετήσια ενεργός δόση που λαμβάνεται για το γενικό πληθυσμό από όλες τις πηγές είναι $3 mSv$, με την πλειοψηφία της έκθεσης αυτής να προέρχεται από φυσικές πηγές ακτινοβολία, όπως ραδόνιο και άλλα ραδιονουκλίδια. Στο επίπεδο της θάλασσας, μόνο περίπου το $0.27 mSv$ της ετήσιας δόσης αποδίδεται σε κοσμική ακτινοβολία, με ρυθμό δόσης $0.05 \mu Sv$ ανά ώρα. Αντίστοιχα, άτομα που μένουν σε υψηλό υψόμετρο, όπως για παράδειγμα στο Ντένβερ του Κολοράντο ($1600 m$), λαμβάνουν διπλάσια δόση σε σχέση με αυτούς που διαμένουν στο επίπεδο της θάλασσας (Σχήμα 2.12), ενώ στα υψόμετρα πτήσης εμπορικών αεροσκαφών ($10 km$) ο ρυθμός δόσης μπορεί να είναι της τάξης των $4 \mu Sv$ ανά ώρα.

Η κοσμική ακτινοβολία στο διαστημικό και ατμοσφαιρικό χώρο, αποτελείται από:

- τη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία, η οποία αποτελεί ένα μόνιμο υπόβαθρο έκθεσης,

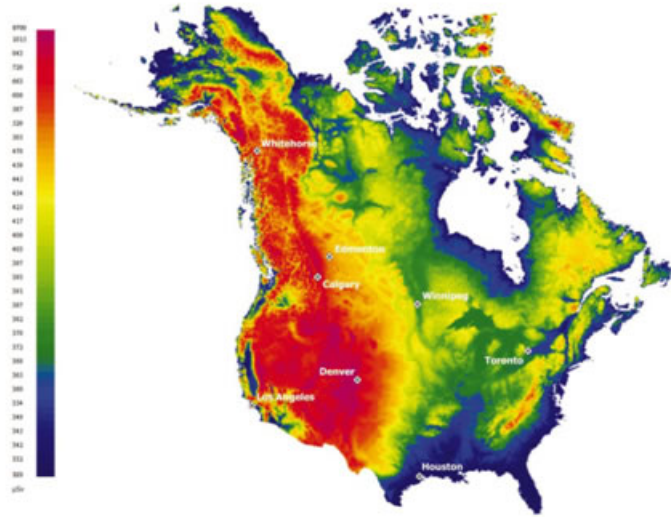


Σχήμα 2.11: Ετήσια συλλογική ενεργός δόση και μέση σταθμισμένη ως προς τον πληθυσμό ετήσια ενεργός δόση ανά άτομο λόγω κοσμικής ακτινοβολίας για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Cinelli et al., 2017).

- τα σωματίδια που βρίσκονται παγιδευμένα στη μαγνητόσφαιρα,
- τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια, που αποτελούν έκτακτα και αρκετά επικίνδυνα γεγονότα, και
- την υπερϊώδη ακτινοβολία, που αποτελείται από λιγότερο ενεργητικά σωματίδια.

Από τα παραπάνω, οι γαλαξιακές και ηλιακές κοσμικές ακτίνες, καθώς και τα σωματίδια μέσα στη μαγνητόσφαιρα αποτελούν ιονίζουσα ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αποτελούν κίνδυνο τόσο για τα πληρώματα αεροσκαφών και διαστημικών αποστολών όσο και τους ταξιδιώτες που χρησιμοποιούν συχνά τις εναέριες μεταφορές. Η έκθεση του ανθρώπου μεταβάλλεται ανάλογα με το ατμοσφαιρικό υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας, το γεωγραφικό πλάτος (δηλαδή το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας) καθώς και τη φάση του ηλιακού κύκλου. Στο Σχήμα 2.13 δίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της αύξησης της δόσης με την αύξηση του ύψους.

Η ηλιακή κοσμική ακτινοβολία συνδέεται με άμεσες επιδράσεις στην υγεία, λόγω έκτακτων φαινομένων μεγάλης έντασης. Τα συμπτώματα αυτά εμφανίζονται άμεσα, συνήθως μέσα σε

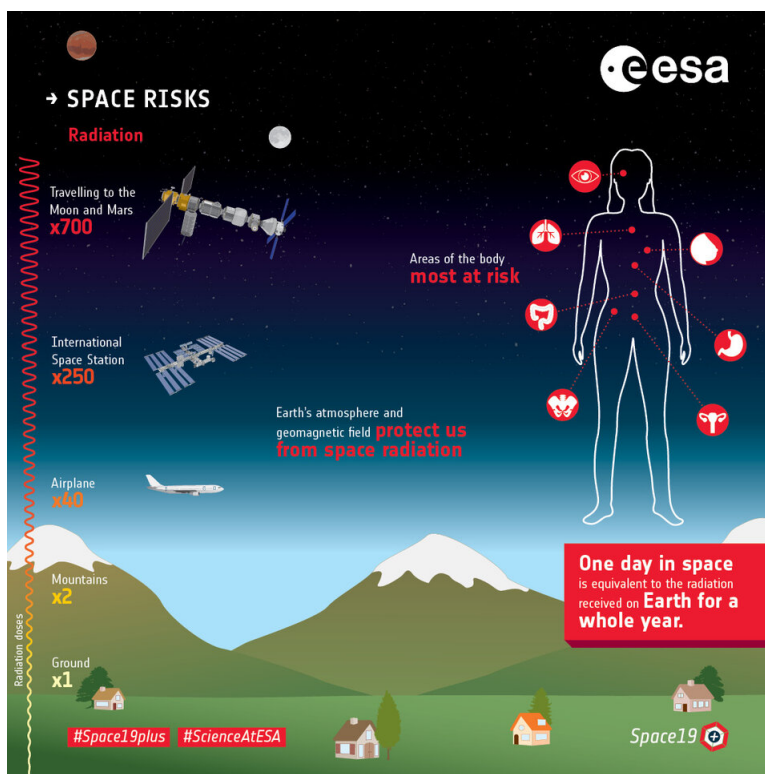


Σχήμα 2.12: Η ετήσια ενεργός δόση (mSv) λόγω κοσμικής ακτινοβολίας για τον Καναδά και τις ΗΠΑ (Grasty and LaMarre, 2004).

μερικές ώρες ή ημέρες, και οφείλονται σε κυτταρικό θάνατο ή κυτταρικό εκφυλισμό. Αυτά μπορεί να είναι το Σύνδρομο Οξείας Ακτινοβόλησης Acute Radiation Syndrome - ARS, κόπωση, οξεία δερματικά προβλήματα, όπως εγκαύματα, και νόσους του κεντρικού νευρικού συστήματος. Το Σύνδρομο Οξείας Ακτινοβόλησης μπορεί να περιλαμβάνει ναυτία και έμετο μέσα σε λίγες ώρες από την έκθεση, διάρροια που μπορεί να συνεχιστεί μερικές ημέρες έως μερικές εβδομάδες μετά την έκθεση, μείωση των ερυθροκυττάρων, αιμορραγία, εξάντληση των αιμοποιητικών οργάνων, απώλεια του τριχωτού της κεφαλής, και παροδική ανδρική στειρότητα (McPhee and Charles, 2009). Αντίστοιχα, οι μακροχρόνιες επιδράσεις στην υγεία συνδέονται με τη μακρόχρονη έκθεση στη μόνιμα παρούσα γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία. Τα συμπτώματα μπορεί να εμφανιστούν μετά από αρκετούς μήνες έως χρόνια, ενώ μπορούν ακόμα να περάσουν στις επόμενες γενιές. Κάποια από αυτά μπορεί να οφείλονται σε κυτταρικό θάνατο ή κυτταρικό εκφυλισμό, όπως βλάβες στην όραση, καταρράκτης του οφθαλμού, μη φυσιολογική ανάπτυξη και δυσπλασία του εμβρύου, ενώ άλλα οφείλονται κυρίως σε μεταλλάξεις, όπως ο καρκίνος, διάφοροι συμπαγείς όγκοι, η λευχαιμία, η εκφυλιστική καρδιακή νόσος και οι κληρονομικές διαταραχές.

2.8.1 Πληρώματα αεροσκαφών

Γενικά, τα πληρώματα των αεροσκαφών (και αυτά των διαστημικών αεροσκαφών όπως θα δούμε παρακάτω) εξαιτίας της φύσης του επαγγέλματός τους ανήκουν στους γενικότερα υγιείς εργαζόμενους σε σχέση με το γενικό πληθυσμό (healthy worker effect). Αυτό συμβαίνει τόσο λόγω της διαδικασίας επιλογής προκειμένου κάποιος να γίνει πιλότος ή αεροσυνοδός όσο και λόγω



Σχήμα 2.13: Τα επίπεδα έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα, καθώς και οι κίνδυνοι που εγχυμονούν για την υγεία του ανθρώπου (Πηγή: esa.int).

της συνεχούς και αυστηρής παρακολούθηση της υγείας του πληρώματος (Kuipers et al., 2014; Zeeb et al., 2012), παράλληλα με τον τελείως διαφορετικό τρόπο ζωής και την υψηλή κοινωνικοοικονομική κατάσταση της ομάδας αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνολική θνησιμότητα του πληρώματος να είναι χαμηλότερη από αυτή του γενικού πληθυσμού, ενώ οι περισσότεροι ιατρικοί παθήσεις και οι παράγοντες λόγω τρόπου ζωής, όπως το κάπνισμα και η χρήση αλκοόλ, είναι λιγότερο διαδεδομένοι στα πληρώματα αεροπορικών εταιρειών.

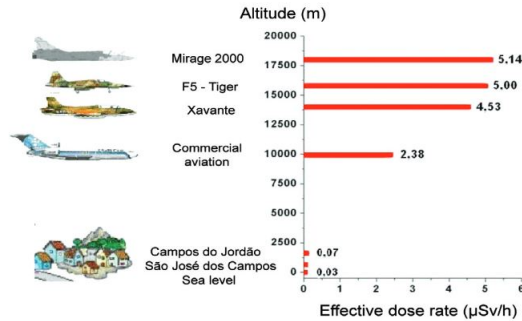
Παρόλ' αυτά πληρώματα αεροσκαφών εκτίθενται επαγγελματικά σε παράγοντες που ενδέχεται να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην υγεία τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι διάφοροι καρκινογόνοι και μεταλλαξογόνοι παράγοντες όπως είναι η ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία, η υπεριώδης ακτινοβολία, τα μαγνητικά πεδία από τα όργανα του πιλοτηρίου, το όζον, οι διάφορες πτητικές ουσίες, όπως τα αερολύματα, οι ρύποι του αέρα καμπίνας, οι εξατμίσεις από τα καύσιμα του αεροπλάνου ή από τα υλικά του αεροπλάνου, οι ακανόνιστες ώρες εργασίας, η συνεχής διαταραχή του καρδιακού ρυθμού (Rafnsson et al., 2001a). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ορισμένες ασθένειες να εμφανίζονται συχνότερα σε σχέση με το γενικό πληθυσμό, όπως είναι διάφοροι κακοήθεις και μη όγκοι λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία, ενώ αυξημένα είναι και τα

ποσοστά συχνότητας εμφάνισης HIV, δερματίτιδας και τραυματισμών (Kuipers et al., 2014).

Τα πληρώματα αεροσκαφών εκτίθενται διαρκώς σε γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία. Σε έκτακτες περιπτώσεις, μπορεί να εκτεθούν σε SPEs, τα οποία εκδηλώνονται περισσότερο στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη αντίστοιχα. Αντίστοιχα, πιθανή είναι και η ύπαρξη ενεργητικών νετρονικών γεγονότων (Solar Neutron Events - SNEs) ή γεγονότων ηλιακών ακτίνων γ (Solar Gamma Ray Event - SGEs) τα οποία παρατηρούνται κυρίως σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη. Τέλος, πέρα από τις εξωγήινες πηγές, διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην ατμόσφαιρα λόγω καταιγίδων και κεραυνών (Bramlitt and Shonka, 2015), όπως οι επίγειες εκλάμψεις ακτίνων γ (Terrestrial Gamma Ray flashes - TGFs) ενδέχεται να συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της δόσης μέσα σε ένα δευτερόλεπτο (Bramlitt and Shonka, 2015). Αν και οι υποκείμενες φυσικές διεργασίες σχετικά με το φαινόμενο αυτό δεν έχουν ακόμη κατανοηθεί πλήρως, φαίνεται να σχετίζεται με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας που επιταχύνονται στα ηλεκτρικά πεδία των καταιγίδων. Η ακτινοβολία γ υψηλής ενέργειας προκύπτει από αλληλεπιδράσεις αυτών των ηλεκτρονίων με άτομα στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια μπορεί ακόμη και να δημιουργήσει ραδιενεργά ισότοπα στην ατμόσφαιρα λόγω φωτοπυρηνικών αλληλεπιδράσεων (Meier et al., 2020).

Η έκθεση των πιλότων και του πληρώματος καμπίνας σε κοσμική ακτινοβολία εξαρτάται από το υψόμετρο στο οποίο πραγματοποιείται η πτήση, τη διαδρομή της πτήσης, τη διάρκεια της πτήσης και την ηλιακή δραστηριότητα (Linnertsjö et al., 2003). Γενικότερα, όσο αυξάνεται το υψόμετρο ή η χρονική διάρκεια της πτήσης, τόσο θα αυξάνεται και η δόση. Πιο συγκεκριμένα, ο μέγιστος ρυθμός δόσης μέσα στην ατμόσφαιρα είναι περίπου στα 20 km και μειώνεται σταδιακά μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Σε ευρωπαϊκές πτήσεις, έχει μετρηθεί αύξηση στο ρυθμό δόσης κατά έναν παράγοντα 4.6 με μεταβολή του υψομέτρου από τα 8 km στα 12 km. Το υψόμετρο πτήσης καθορίζεται και από το είδος του αεροπλάνου που χρησιμοποιείται (Σχήμα 2.14). Αντίστοιχα, παρατηρείται και αυξημένη δόση όταν η πτήση διέρχεται από μεγάλα ή πολικά γεωγραφικά πλάτη, καθώς υπάρχει μικρότερη θωράκιση από το γεωμαγνητικό πεδίο. Τέλος, εξαιτίας της αντισυσχέτισης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και της ηλιακής δραστηριότητας, υψηλότερες δόσεις παρατηρούνται κατά το ηλιακό ελάχιστο. Ειδική περίπτωση αποτελεί η παρουσία κάποιου SPE, το οποίο ενδέχεται να αυξήσει τη δόση κατά πολλές τάξεις μεγέθους (Shea and Smart, 2000). Στον Πίνακα 2.4 δίνεται κατά προσέγγιση το εύρος μεταβολής για καθένα από τους παραπάνω παράγοντες.

Οι πιθανές επιπτώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας στην υγεία έχουν γίνει αντικείμενο ανησυχίας και έρευνας πρόσφατα, και για το λόγο αυτό, τα πληρώματα αεροσκαφών έχουν ταξινομηθεί ως επαγγελματικά εκτεθειμένα σε ιονίζουσες ακτινοβολίες από το 1996 (EURATOM, 1996).



Σχήμα 2.14: Ρυθμός ενεργού δόσης για διάφορα είδη αεροπλάνου και υψομέτρων πτήσης (Federico et al., 2010).

Παράγοντας	Εύρος Μεταβολής	Εντός Μαγνητόσφαιρας
Υψόμετρο	Παράγοντας 1000	Από το επίπεδο της θάλασσας έως τα 80000 <i>ft</i>
Γεωγραφικό Πλάτος	Παράγοντας 2	Υψηλότερο στα πολικά γεωγραφικά πλάτη
Ηλιακός Κύκλος	Παράγοντας 2	Υψηλότερο στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη
SPEs	Μεταβλητό	Υψηλότερα στα πολικά γεωγραφικά πλάτη, έκτακτα γεγονότα

Πίνακας 2.4: Μεταβολή της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία (Miroshnichenko, 2003; Shea and Smart, 2000).

Τα τυπικά επίπεδα ετήσιας έκθεσης στην περιοχή 2 – 6 *mSv*, ενώ σπάνια υπερβαίνει τα 8 *mSv*, παίρνοντας περίπου 1000 ώρες ανά έτος πετώντας. Αυτό ισοδυναμεί με περίπου τη διπλάσια ετήσια δόση ακτινοβολίας υποβάθρου στις περισσότερες χώρες και είναι μεγαλύτερη από τη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι εργαζόμενοι στην πυρηνική ενέργεια. Θεωρητικά, μία δόση των 150 *mSv* κατά τη διάρκεια της συνολικής καριέρας ενός πιλότου θα μπορούσε να είναι δυνατή, παρόλ' αυτά έρευνες δεν έχουν δείξει αθροιστικές δόσεις που να ξεπερνούν τα 100 *mSv*. (Blettner et al., 2003).

Για την αξιολόγηση της έκθεσης του προσωπικού μιας αεροπορικής εταιρείας σε κοσμική ακτινοβολία, υπάρχει μια ποικιλία μεθόδων, όπως συγκεκριμένες μετρήσεις κατά τη διάρκεια της πτήσης και υπολογισμοί είτε με βάση δεδομένα ημερολογίου είτε με βάση διάφορες προσεγγίσεις και υπολογισμούς κατά την περίοδο απασχόλησης. Οι μελέτες αυτές βασίζονται γενικά σε μια καλή συνεργασία μεταξύ των αεροπορικών εταιρειών και των εργαζομένων ή των οργανισμών τους, καθώς πολλές από τις απαραίτητες πληροφορίες προέρχονται από αρχεία προσωπικού

(Zeeb et al., 2012), ενώ η παρακολούθηση ρουτίνας για τα πληρώματα, όπως γίνεται στους εργαζομένους στην πυρηνική βιομηχανία, θα ήταν μη πρακτική και δύσκολο να εφαρμοστεί (Federico et al., 2010). Οι περισσότερες επιδημιολογικές μελέτες μέχρι στιγμής δεν μπόρεσαν να ενσωματώσουν τόσο λεπτομερείς πληροφορίες και βασίζονταν συνήθως σε μάλλον ακατέργαστες μετρήσεις (Hammer et al., 2000).

Παρόλ' αυτά, πλήθος επιδημιολογικών ερευνών και ερευνών αξιολόγησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία έχουν λάβει χώρα σε πολλές χώρες, όπως είναι η Ελλάδα (Paridou et al., 2003), η Γερμανία (Dreger et al., 2020; Hammer et al., 2012), η Ιταλία (De Angelis et al., 2001) η Γαλλία (Desmaris, 2016), η Φινλανδία (Pukkala et al., 1995), η Νορβηγία (Pukkala et al., 2002), η Σουηδία (Linersjö et al., 2003), η Ισπανία (Saez Vergara et al., 2005), η Πορτογαλία (Silva et al., 2013), η Ισλανδία (Rafnsson et al., 2001a), η Πολωνία (Bilski et al., 2004), η Αίγυπτος (Sayed et al., 2010), η Ιαπωνία (Yasuda et al., 2011), η Κορέα (Cho, 2020), ο Καναδάς (Lewis et al., 1999), η Αυστραλία (Olsen et al., 2019) και οι ΗΠΑ (Grajewski et al., 2011, 2018; Yong et al., 2014). Αντίστοιχα έχουν γίνει και πολλές συγκεντρωτικές μελέτες όπως στην Ευρώπη (Blettner et al., 2003; Langner et al., 2004; Zeeb et al., 2003). Με βάση υπολογισμούς, σε 1000 άτομα πληρώματος καμπίνας, η θνησιμότητα των 220 αναμένεται από καρκίνο από καρκίνο που δεν σχετίζεται με την εργασία, ενώ 3 αναμένεται να πεθάνουν λόγω εργασιακής έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία (Friedberg et al., 1989). Τα διαθέσιμα, όμως, επιδημιολογικά δεδομένα δεν δείχνουν σαφή συσχέτιση των επιπτώσεων στην υγεία με την έκθεση στην κοσμική ακτινοβολία (Di Trollo et al., 2015; Zeeb et al., 2012). Επιπλέον, η ενεργός δόση, που συνήθως χρησιμοποιείται στις μελέτες αυτές, θεωρείται κατά κύριο λόγο ακατάλληλη για επιδημιολογικούς σκοπούς, δεδομένων των παραγόντων βαρύτητας ακτινοβολίας και ιστού που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της. Αυτό ισχύει ειδικά για κοσμική ακτινοβολία υψηλής LET, για την οποία υπάρχει μεγάλη συζήτηση σε σχέση με τους παράγοντες βαρύτητας που χρησιμοποιούνται. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε χαμηλότερη εκτίμηση της έκθεσης και οι μελέτες τελικά να έχουν μικρότερη ισχύ (Schubauer Berigan, 2020).

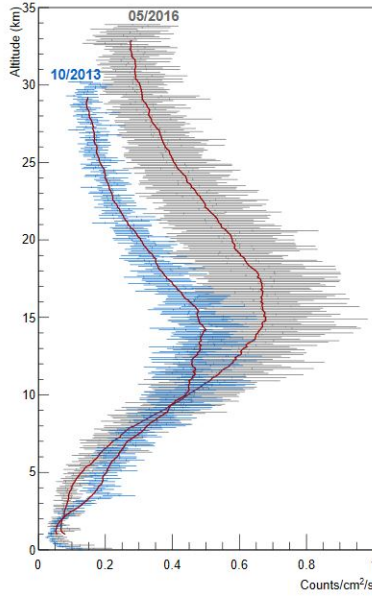
Όπως είπαμε και παραπάνω, καθώς η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα, παράγονται δευτερογενή σωματίδια, τα οποία στα συνηθισμένα υψόμετρα πτήσης, αποτελούνται σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό (σχεδόν 50%) από νετρόνια, τα οποία κατατάσσονται ως Group 1 καρκινογόνο από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC), καθώς και φορτισμένα σωματίδια με υψηλή RBE (Grajewski et al., 2011). Τα νετρόνια αυτά αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος της ενεργού δόσης του πληρώματος, γεγονός που τη διακρίνει από άλλες επαγγελματικές ομάδες που εκτίθενται σε ιονίζουσα ακτινοβολία (Rafnsson

et al., 2001a). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε τυπικά υψόμετρα πτήσης και μεσαία γεωγραφικά πλάτη, τα νετρόνια μπορεί να αποτελούν το 55% της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια το 20%, τα πρωτόνια περίπου 15%, και τα μίονια και τα φωτόνια το υπόλοιπο. Η σχετική αυτή συνεισφορά ποικίλλει ανάλογα με τη φάση του ηλιακού κύκλου και το υψόμετρο. Σε κάθε περίπτωση, αυτό καθιστά τα πληρώματα πτήσης έναν από τους λίγους πληθυσμούς που είναι γνωστό ότι εκτίθενται σε νετρόνια. Το ενεργειακό εύρος των σωματιδίων αυτών είναι αρκετά μεγάλο στα υψόμετρα πτήσης και κυμαίνεται από 0.023 eV έως περισσότερα από 400 MeV για τα νετρόνια, από δεκάδες KeV έως εκατοντάδες MeV για την ηλεκτρομφωτονική συνιστώσα και τέλος από 10 MeV έως εκατοντάδες GeV για τα πρωτόνια (Federico et al., 2010).

Ιδιαίτερα σημαντικό για την έκθεση κατά τη διάρκεια αεροπορικών πτήσεων αποτελεί και το μέγιστο Regener-Pfotzer (Regener and Pfozter, 1935). Πρόκειται για το σημείο όπου τα πρωτογενή πόνια και αδρόνια μειώνονται, ενώ αυξάνονται τα δευτερογενή σωματίδια, και κυρίως τα μίονια. Εμφανίζεται στο στρώμα της τροπόπαυσης και κάτω από τη στρατόσφαιρα, σε υψόμετρο $14 - 25\text{ km}$, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή του περίπου σε ύψος 18 km . Το μέγιστο Regener-Pfotzer αποτελεί μια σημαντική πηγή ιονισμού στην ατμόσφαιρα της Γης και συνεπώς ιονισμού της ύλης, και για το λόγο αυτό, δεν επιτρέπεται στα αεροσκάφη να παραμένουν σε αυτό το ύψος. Κάτω από το σημείο αυτό, η ένταση της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται σταδιακά μέχρι το έδαφος.

Έτσι, ενώ οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της ακτινοβολίας στους αεροπόρους είναι ακόμη ελλιπείς, πολλές μελέτες δείχνουν έναν σημαντικότερο κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου στα πληρώματα αεροσκαφών (Krain, 2019; NASA, 2016). Μη σημαντικά αυξημένη πιθανότητα παρατηρείται και για άλλες μορφές καρκίνου, όπως καρκίνος στο πάγκρεας, στο στομάχι, στο κεντρικό νευρικό σύστημα (Hammer et al., 2012), στον προστάτη (Hammer et al., 2009), στο θυρεοειδή αδένια (Liu et al., 2018) καθώς και εμφάνισης οξείας μυελογενούς λευχαιμίας (Gundestrup and Storm, 1999).

Ο κίνδυνος εμφάνισης κακοήθους μελανώματος και άλλων καρκίνων του δέρματος είναι περίπου διπλάσιος στους πιλότους αεροπορικών εταιρειών και το πλήρωμα καμπίνας σε σύγκριση με το γενικό πληθυσμό, λόγω της αυξημένης επαγγελματικής έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία και κοσμική ακτινοβολία, που σχετίζεται με το υψόμετρο πτήσης (Miura et al., 2018; Nicholas et al., 2009; Sanlorenzo et al., 2015). Στα συνήθη υψόμετρα πτήσης των εμπορικών αεροσκαφών (περίπου 9 km), το επίπεδο υπεριώδους ακτινοβολίας είναι περίπου διπλάσιο από αυτό στο έδαφος, και μπορεί να είναι ακόμη υψηλότερο όταν πετούν πάνω από παχιά στρώματα νεφών ή χιόνια, που αντανακλούν έως και το 85% της υπεριώδους ακτινοβολίας. Το υλικό που χρη-



Σχήμα 2.15: Το κατακόρυφο προφίλ των δευτερογενών κοσμικών ακτίνων, με δεδομένα από δύο διαφορετικές αποστολές κατά τη διάρκεια διαφορετικών φάσεων ηλιακής δραστηριότητας, όπου διακρίνεται το μέγιστο Regener-Pfotzer (Sarkara et al., 2017)

σιμοποιείται στο πιλοτήριο και τα παράθυρα καμπίνας των αεροπλάνων είναι ικανό να κόψει το μεγαλύτερο τμήμα της UVB ακτινοβολίας, φαίνεται όμως να εμποδίζουν ελάχιστα την ακτινοβολία UVA να εισχωρήσει, με αποτέλεσμα τόσο το πλήρωμα όσο και οι επιβάτες να εκτίθενται στην ακτινοβολία αυτή (Sanlorenzo et al., 2015).

Υπάρχει όμως περίπτωση το μελάνωμα να μην σχετίζεται αποκλειστικά με την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, αλλά και με την έκθεση σε ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία, παρά το γεγονός ότι η ετήσια έκθεση φαίνεται να είναι κάτω από τα επίπεδα που θεωρούνται επί του παρόντος επικίνδυνα, συμπεριλαμβανομένου του δέρματος. Αν και το μελάνωμα είναι ένας καρκίνος με πολύ χαμηλή ευαισθησία στην επαγωγή με ιονισμό και κατά συνέπεια δεν περιλαμβάνεται στους καρκίνους που αποδίδονται συστηματικά σε ιονίζουσα ακτινοβολία, οι 'ασφαλείς δόσεις' σχετικά με την πιθανότητα εμφάνισης μελανώματος δεν έχουν καθοριστεί επακριβώς και έτσι τα τρέχοντα όρια επαγγελματικής έκθεσης δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ελαχιστοποιηθεί αυτός ο κίνδυνος. Υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ εμφάνισης μελανώματος (αλλά όχι θνησιμότητας λόγω μελανώματος και διάρκειας απασχόλησης, έκθεσης σε ακτινοβολία διάρκειας πτήσεων (Miura et al., 2018). Το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα του δέρματος αποτελεί έναν καρκίνο που σχετίζεται με την ακτινοβολία, οπότε μπορεί να αποδοθεί σε κοσμική ακτινοβολία (Gudmundsdottir et al., 2017). Η εμφάνιση του καρκινώματος αυτού έχει παρατηρηθεί και σε στρατιωτικούς πιλότους, πολύ νωρίτερα από το αναμενόμενο για έναν αντίστοιχα

αρκετά υγιή πληθυσμό (Wilkison and Wong, 2017). Γενικότερα, ο τύπος του αεροσκάφους παίζει ρόλο στην έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία. Για παράδειγμα, τα αεροσκάφη που κινούνται με έλικα επιφέρουν έως $0.2 \mu Sv/blockhour$, τα Boeing 727 και 737 έως $2 \mu Sv/blockhour$ και τα Douglas DC8 και DC10 και τα Boeing 757 έως $3 \mu Sv/blockhour$ (Rafnsson et al., 2001a).

Ειδικότερα, οι επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν πληρώματα θηλυκού γένους (γυναίκες πιλότοι και αεροσυνοδοί) δείχνουν μία σχετικά αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου του μαστού (Barr et al., 2007; Pukkala et al., 1995; Rafnsson et al., 2001b; Tokumaru et al., 2006; Zeeb et al., 2003). Αν και ο καρκίνος του μαστού συνδέεται άμεσα με την έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία, άλλοι παράγοντες, όπως οι μεταβολές στον καρδιακό ρυθμό και η παραγωγή μελατονίνης, μπορούν επίσης να ευθύνονται για την εμφάνιση καρκίνου μαστού (Rafnsson et al., 2001b). Μη σημαντικά αυξημένος κίνδυνος παρουσιάζεται και για άλλες ενδεχόμενες επιπτώσεις όπως η εμφάνιση οστικού καρκίνου, καρκίνου του τραχήλου της μήτρας και των ωοθηκών, καρκίνου του θυρεοειδούς αδένος, νόσο του Hodgkin, λέμφωμα non-Hodgkin και λευχαιμία (Pinkerton et al., 2018; Rafnsson et al., 2001b). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση εγκυμοσύνης, καθώς αεροσυνοδοί που πετούν κατά τη διάρκεια εγκυμοσύνης, ενδέχεται να ξεπεράσουν το όριο του $1 mSv$ στο έμβρυο κατά τη συνολική διάρκεια της εγκυμοσύνης, όπως προτείνεται από την ICRP (Grajewski et al., 2002).

Η επαγωγή καταρράκτη λόγω επαγγελματικής έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών αποτελεί επίσης ένα σημαντικό θέμα ενδιαφέροντος για την αεροδιαστημική ιατρική τα τελευταία χρόνια (IAEA, 2004). Λόγω πολλών μεταβλητών, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί εάν υπάρχει αυξημένος κίνδυνος καταρράκτη που προκαλείται άμεσα από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον πτήσης, είτε ειδικά με την προστιθέμενη έκθεση σε ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η εναπόθεση ενέργειας από κοσμικές ακτίνες γ και νετρόνια δύναται να προκαλέσει ιονισμό των συστατικών του οφθαλμικού φακού (κυρίως του νερού) και να παραχθούν ελεύθερες ρίζες (κυρίως ρίζες υδροξυλίου), οι οποίες μπορούν εύκολα να αντιδράσουν και να αλλάξουν τη λειτουργία του DNA και των κυτταρικών μεμβρανών με υψηλότερο μιτωτικό ρυθμό, όπως αυτές των φακών (Jones et al., 2006).

Τέλος, η διαρκής έκθεση του πληρώματος σε ιονίζουσα ακτινοβολία χαμηλών δόσεων συνδέεται με αύξηση διάφορων χρωμοσωμικών ανωμαλιών και αλλοιώσεων, με μορφή κενών, σπασμάτων ή μετατοπίσεων, που οδηγούν σε κυτταρογενετικές αλλαγές (Grajewski et al., 2018; Heimers, 1999; Romano et al., 1997; Yong et al., 2015b; Zeeb et al., 2012).

2.8.2 Επιβάτες

Οι αεροπορικές πτήσεις αποτελούν πλέον ένα κοινό τρόπο μεταφοράς σε ολόκληρο τον κόσμο, ιδίως λόγω της έλευσης αεροσκαφών μεγάλης εμβέλειας και των σχετικά οικονομικών αεροπορικών εισιτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών (International Air Transport Association - IATA), το 2010 υπολογίστηκαν περίπου 1.8 δισεκατομμύρια επιβάτες πτήσεων, με το 40% αυτών να χρησιμοποιούν διεθνείς πτήσεις τλ(Ζεεβ ετ αλ., 2012). Έτσι, το ιπτάμενο κοινό εκτίθεται σε υψηλότερη από τη μέση δόση ακτινοβολίας, γεγονός που προκαλεί ανησυχία για τη δημόσια υγεία, καθώς τα προηγούμενα χρόνια ήταν δύσκολο να γίνει ποσοτικοποίηση της έκθεσης αυτής (Baily, 2000). Παρόλ' αυτά, δεν πρέπει να υπάρχει ανησυχία για τον 'απλό ταξιδιώτη', καθώς η κοσμική ακτινοβολία ενέχει για αυτόν λίγο ή καθόλου κίνδυνο.

Εδική περίπτωση αποτελούν οι επιβάτες που χρησιμοποιούν συχνά τις αερομεταφορές λόγω επαγγελματικών υποχρεώσεων. Αν οι πτήσεις έχουν και μεγάλη διάρκεια και πραγματοποιούνται σε υψηλό υψόμετρο, εκτίθενται σε κοσμική ακτινοβολία με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως τα μέλη του πληρώματος των αεροσκαφών με τα οποία ταξιδεύουν, ενώ πολύ συχνά αν πρόκειται για διεθνείς ή διηπειρωτικές πτήσεις μπορεί να υπερβούν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια που καθορίζονται από τους κυβερνητικούς ρυθμιστικούς οργανισμούς, αν η έκθεση προκλήθηκε για παράδειγμα από μία συμβατική ιατρική ή βιομηχανική εγκατάσταση το έδαφος. Έτσι είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι οι επιβάτες με συχνές πτήσεις αντιμετωπίζουν τους ίδιους κινδύνους για την υγεία από την έκθεση σε ακτινοβολία με τους πιλότους και τους αεροσυνοδούς και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως επαγγελματικά εκτεθειμένοι (Barish and Dilchert, 2010). Αν και οι κίνδυνοι για την υγεία από την έκθεση σε αυτά τα επίπεδα δεν είναι μεγάλοι, η λήψη αποφάσεων σχετικά με την αποδοχή αυτών των κινδύνων ανήκει στους ίδιους τους ταξιδιώτες. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση εγχύων υπαλλήλων όπου κινδυνεύει επίσης το έμβρυο.

2.8.3 Πληρώματα διαστημικών αποστολών

Τα πληρώματα των διαστημικών εκτίθενται σε ακραίες συνθήκες κοσμικής ακτινοβολίας, έλλειψης βαρύτητας (μικροβαρύτητα) και έντονου ψυχολογικού στρες, λόγω του εγκλεισμού και της απομόνωσης. Καθένας από αυτούς τους παράγοντες επιδρά τόσο στην απόδοση όσο και στην υγεία του πληρώματος, με την έκθεση σε κοσμική ακτινοβολία να αποτελεί αυτή τη στιγμή το σημαντικότερο από αυτούς τους κινδύνους.

Αντίθετα με τα πληρώματα αεροσκαφών, οι αστροναύτες εκτίθενται σε γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία, ενεργητικά ηλεκτρόνια και πρωτόνια που βρίσκονται παγιδευμένα στις ζώνες ακτινοβολίας της Γης και σε ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Για τις τροχιές που βρίσκονται κο-

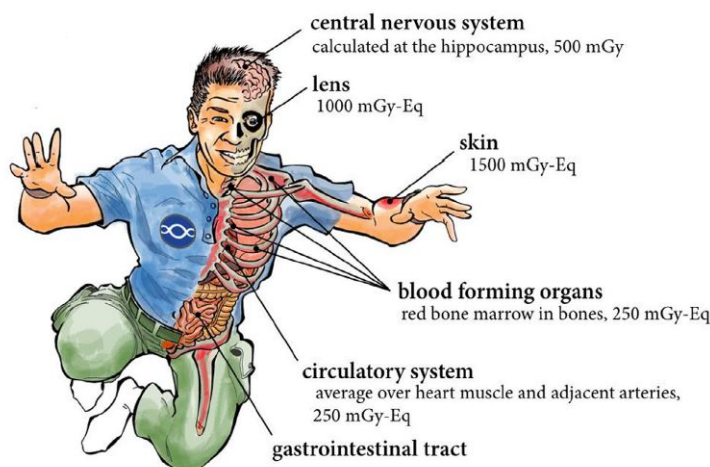
ντά στη γη (Low Earth Orbit - LEO), υπάρχει επίσης μια τέταρτη πηγή, τα νετρόνια και τα πρωτόνια albedo. Πρόκειται για δευτερογενή σωματίδια που δημιουργούνται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και γηίνης ατμόσφαιρας, με τις τροχιές τους να τα ανακλούν στο διάστημα. Η συνιστώσα αυτή είναι σχετικά μικρή και χαμηλής ενέργειας, οπότε συνήθως δεν θεωρείται μία σημαντική πηγή ακτινοβολίας των αστροναυτών (Benton and Benton, 2001).

Οι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα της ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι αστροναύτες είναι το υψόμετρο πάνω από τη Γη (όπου το γεωμαγνητικό πεδίο να είναι ασθενέστερο και το διαστημικό σκάφος περνά μέσα από τις ζώνες ακτινοβολίας), τη φάση του ηλιακού κύκλου, καθώς και την ευαισθησία του κάθε ατόμου στην ακτινοβολία (Miroshnichenko, 2003). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κοσμική ακτινοβολία να αποτελεί τον κυριότερο κίνδυνο για μακροχρόνιες διαστημικές αποστολές, ειδικά για αυτές που πραγματοποιούνται εκτός της LEO (Chancellor and Sutton, 2014). Η υγεία και η απόδοση του πληρώματος διαστημικών αποστολών μπορεί να επηρεαστούν από ένα έντονο ηλιακό γεγονός (solar particle event - SPE), πολλαπλά SPEs ή από τη σωρευτική επίδραση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων.

Η δόση στον ISS σε LEO είναι περίπου $200 - 600 \mu Sv/day$, ενώ σε 6 μήνες μπορεί να φτάσει τα $50 - 100 mSv$. Οι αστροναύτες που περνούν μόλις ένα μήνα στον ISS υπόκεινται περίπου στη μέγιστη συνιστώμενη δόση ακτινοβολίας για ένα έτος. Πιο συγκεκριμένα, τα πληρώματα στον ISS λαμβάνουν κατά μέσο όρο $80 mSv$ για εξάμηνη παραμονή σε ηλιακό μέγιστο και $160 mSv$ στο ηλιακό ελάχιστο, δόση που αντιστοιχεί περίπου σε 80 και 160 ακτινογραφίες θώρακα, αντίστοιχα. Οι γυναίκες αστροναύτες ενδέχεται να υπερβούν τα όρια ακτινοβολίας που καθορίζονται από τη NASA ύστερα από 18 μήνες παραμονής στη LEO και οι άνδρες αστροναύτες μετά από 24 μήνες. Κάποια μεταβλητότητα σε αυτούς τους χρόνους αναμένεται λόγω της φάσης του ηλιακού κύκλου, άλλων επαγγελματικών εκθέσεων σε ακτινοβολίες και της πιθανότητας εμφάνισης SPEs (Cucinotta, 2014).

Η έκθεση των αστροναυτών σε κοσμική ακτινοβολία είναι δύσκολο να εκτιμηθεί εξαιτίας της μεγάλης πολυπλοκότητας του διαστημικού περιβάλλοντος, της ετερογένειας της ακτινοβολίας και του τρόπου έκθεσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η κοσμική ακτινοβολία στην οποία εκτίθεται το πλήρωμα είναι ένα πολύπλοκο μίγμα πρωτονίων, νετρονίων, ακτίνων γ και βαρύτερων ιόντων υψηλής LET, που μπορεί να προκαλέσουν πολύ διαφορετικές βιολογικές αποκρίσεις ανά μονάδα απορροφούμενης δόσης, λόγω του διαφορετικού παράγοντας βαρύτητας ακτινοβολίας. Επιπροσθέτως, οι επανδρωμένες αποστολές γίνονται όλο και μεγαλύτερες τόσο σε υψόμετρο όσο και σε διάρκεια, με αποτέλεσμα η δόση των αστροναυτών να αυξάνεται σημαντικά, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5 και το Σχήμα 2.17.

Ενδεικτικά, ο κοσμοναύτης Valery Polyakov το 1994 κατέχει αυτή τη στιγμή το ρεκόρ μεγαλύτερης διαστημικής αποστολής, έχοντας παραμείνει στο σοβιετικό Διαστημικό Σταθμό Mir για 437 ημέρες, ο αστροναύτης Scott Kelly το 2016 επέστρεψε από ταξίδι 340 ημερών στον ISS, σημειώνοντας αμερικανικό ρεκόρ, ενώ η αστροναύτης Christina Koch το 2020, περνώντας 328 ημέρες στον ISS, σπάει το ρεκόρ της μακρύτερης διαστημικής αποστολής που ολοκληρώθηκε ποτέ από μια γυναίκα αστροναύτη. Έτσι, ουσιαστικά, οι εκθέσεις που βιώνουν οι αστροναύτες προσεγγίζουν την έκθεση λόγω χρόνιας ακτινοβόλησης, με σχετικά μικρές δόσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ακτινοβόληση αυτή είναι ομοιογενής επειδή εκτίθεται ολόκληρο το σώμα, αλλά ετερογενής όσον αφορά την κατανομή των ακτινοβολούντων κυττάρων και τη βιολογική επίπτωση στα όργανα, εξαιτίας της διαφορετικής ευαισθησίας των ιστών στην ακτινοβολία (Testard and Sabatier, 1999), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Τα όρια έκθεσης για 30 ημέρες σε LEO (NASA, 2018)

Το συνολικό ποσό ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι αστροναύτες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλιακή δραστηριότητα, τη θέση τους σε σχέση με τα πλανητικά μαγνητικά πεδία και το είδος της θωράκισης που χρησιμοποιείται στις στολές τους, στα διαστημόπλοια και στις πιθανές αποικίες που μπορεί να κατασκευαστούν σε άλλους πλανήτες. Η προστασία του πληρώματος από την ακτινοβολία πρέπει να παρέχεται με τη μορφή θωράκισης και λειτουργικής δοσιμετρίας και παρακολούθησης, καθώς και βιολογικών αντιμέτρων (Berger et al., 2013; Dettmann et al., 2007; Reitz and Berger, 2006). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η ενίσχυση της στολής των αστροναυτών (Baiocco et al., 2018) και η δημιουργία ειδικών περιοχών με αυξημένη θωράκιση, όπως το Columbus στον ISS. Άλλα αντίμετρα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην υγεία μπορεί να είναι είτε χρήση κατάλληλων ραδιοπροσταυτικών χημικών παρασκευασμάτων είτε η διαδικασία επιλογής ατόμων που είναι ανθεκτικά γενετικά στην

ακτινοβολία (Hellweg and Baumstark-Khan, 2007).

Πέρα από τη LEO, η προστασία από τη μαγνητόσφαιρα της Γης δεν είναι πλέον διαθέσιμη, με αποτέλεσμα να χρειάζονται αυξημένη θωράκιση και διάφοροι προστατευτικοί μηχανισμοί για την πρόληψη του ARS και των άλλων πιθανών επιπτώσεων λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία, που μπορεί να διακινδυνεύσουν το σύνολο της αποστολής. Ενώ η παρακολούθηση και η θωράκιση του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (International Space Station - ISS) αναμένεται να ελαχιστοποιήσει την έκθεση σε ακτινοβολία, υπάρχουν σενάρια εκτός των τμημάτων του ISS (extravehicular activity - EVA) εκτός LEO όπου υπάρχει ο κίνδυνος έκθεσης σε ακτινοβολία λόγω SPEs. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση συμπτωμάτων ARS έως και άμεσο θάνατο (McPhee and Charles, 2009).

Πέρα από το ARS, η ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα στο κεντρικό νευρικό σύστημα, κυρίως στον ιππόκαμπο και τον προμετωπιαίο φλοιό, όπως νευρωνικό εκφυλισμό, οξειδωτικό στρες, απόπτωση, φλεγμονή και αλλαγές στη λειτουργία της ντοπαμίνης. Επιπροσθέτως, η ακτινοβολία αυτή είναι υπεύθυνη και για πληθώρα καρδιαγγειακών νόσων, όπως περικαρδίτιδα, στεφανιαία νόσο και ισχαιμικά επεισόδια (Cortese et al., 2018; Patel, 2018). Η έκθεση στη διαστημική ακτινοβολία αυξάνει τη νοσηρότητα και τον κίνδυνο θνησιμότητας λόγω καρκίνου του καρκίνου στους αστροναύτες, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες της διαστημικής πτήσης, όπως η έλλειψη βαρύτητας, οι ρύποι του περιβάλλοντος χώρου, διάφορα διατροφικά θέματα και το στρες (McPhee and Charles, 2016). Ειδικότερα, για τις γυναίκες αστροναύτες, υπάρχει επίσης αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί κατά κύριο λόγο με την εμφάνιση αιματολογικών κακοηθειών και καρκίνων στερεών οργάνων, όπως είναι ο μαστός, οι ωοθήκες και ο θυρεοειδής αδένας. Από αυτά, ο μαστός αναμένεται να διατρέχει τον υψηλότερο κίνδυνο λόγω της σχετικά μεγαλύτερης μάζας, της ορμονικής απόκρισης και του βαθμού ραδιοευαισθησίας του ιστού (Barr et al., 2007; Steller et al., 2020). Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική είναι βλάβη στους ιστούς των οφθαλμών και η μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης καταρράκτη (Cucinotta et al., 2001). Κατά τη διάρκεια μίας διαστημικής αποστολής, οι αστροναύτες μπορεί να εμφανίσουν και άλλα προβλήματα υγείας. Αυτά μπορεί να είναι μυοσκελετικά, καρδιαγγειακά, κινητικά και ανοσολογικά λόγω μικροβαρύτητας, τοξικολογικής και μικροβιολογικής φύσης λόγω του κλειστού περιβάλλοντος, καθώς και προβλήματα σίτισης, ύπνου, συμπεριφοράς και απόδοσης εξαιτίας της απομόνωσης, του εγκλεισμού και της μεταβολής του κίρκαδιανού κύκλου (Patel, 2018).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι νέες αποστολές στη Σελήνη που ετοιμάζονται για το 2024 στα πλαίσια της αποστολής ARTEMIS της NASA, με στόχο την επιστροφή στη Σελήνη 50 χρόνια μετά την αποστολή Apollo 11. Η αποστολή αυτή θα αποτελέσει ουσιαστικά μία πρόβα

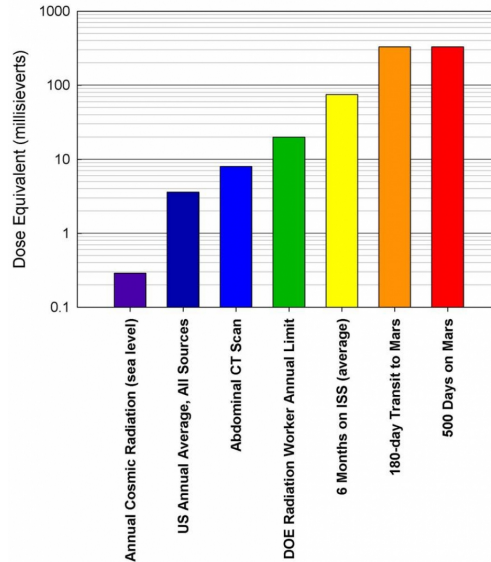
Αποστολή	Δόση ακτινοβολίας
Space Shuttle Mission 41-C (8 ημέρες σε τροχιά γύρω από τη Γη στα 460 km)	5.59 mSv
Apollo 14 (9 ημέρες στη Σελήνη)	11.4 mSv
Skylab 4 (87 ημέρες σε τροχιά γύρω από τη Γη στα 473 km)	178 mSv
Αποστολή στον ISS (έως 6 μήνες σε τροχιά γύρω από τη Γη στα 353 km)	160 mSv
Εκτιμώμενη αποστολή στον Άρη (3 έτη)	1200 mSv

Πίνακας 2.5: Μέση δόση ακτινοβολίας που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια διάφορων τύπων διαστημικών αποστολών (Rask et al., 2008).

για μία μελλοντική αποστολή στον Άρη (Cucinotta et al., 2010). Για ένα ταξίδι έξι μηνών στον Άρη, ένας αστροναύτης θα εκτεθεί σε περίπου 300 mSv, ή συνολικά 600 mSv για το ταξίδι μετέπιστροφής. Εάν υποθέσουμε ότι το πλήρωμα θα περάσει 18 μήνες στην επιφάνεια, προκειμένου να έρθουν οι πλανήτες σε κατάλληλη θέση για να είναι δυνατό το ταξίδι της επιστροφής, θα εκτεθούν σε επιπλέον 400 mSv, κάνοντας έτσι λόγο για μια συνολική συνολική έκθεση περίπου 1000 mSv. Σε τέτοιες αποστολές η έκθεση και το περιβάλλον ακτινοβολίας θα είναι τελείως διαφορετικό από τις πτήσεις σε LEO, με την έκθεση σε γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία να αυξάνεται έως και τρεις φορές σε σχέση με τη LEO (Cucinotta et al., 2013). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης χρωμοσωμικών ανωμαλιών, όπως αύξηση της συχνότητας χρωμοσωμικών εκτροπών στα λεμφοκύτταρα των μελών του πληρώματος, οι οποίες συνδέονται άρρηκτα με ρίσκο εμφάνισης καρκίνου (Obe, 1999). Για το λόγο αυτό, η κοσμική ακτινοβολία θεωρείται ως τροχοπέδη εξαιτίας της υψηλής αβεβαιότητας σχετικά με τον κίνδυνο νοσηρότητας και της έλλειψης απλών αντιμέτρων για τη μείωση της έκθεσης (Cucinotta, 2015; Durante, 2014).

2.9 Πρωτόκολλα ακτινοπροστασίας για κοσμική ακτινοβολία

Οι δόσεις ακτινοβολίας που λαμβάνονται από πιλότους και αεροσυνοδούς είναι συχνά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που λαμβάνονται από τους εργαζόμενους σε επίγειες βιομηχανίες όπου χρησιμοποιούνται ραδιενεργές πηγές ή μηχανές παραγωγής ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα, τα επίπεδα έκθεσης των πληρωμάτων στα εμπορικά αεροσκάφη είναι τα υψηλότερα από οποιαδήποτε άλλη ομάδα εργαζομένων, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών, ιατρικών, κυβερνητικών και εργαζομένων πυρηνικής ενέργειας (NCRP, 2009), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.18. Παρόλα αυτά μέχρι πρόσφατα, λίγη προσοχή είχε καταβληθεί στο επαγγελματικά εκτεθειμένο πλήρωμα αέρα. Τώρα, ο εξελιγμένος εξοπλισμός επιτρέπει τη μελέτη της έκθεσης αυτής, ενώ σε πολλά κράτη υπάρχει κατάλληλη νομοθεσία για την παρακολούθηση της έκθεσης στις αερομεταφορές (Baily, 2000; McAulay, 2000). Η αρχή έγινε με την ICRP, η οποία συνέστησε

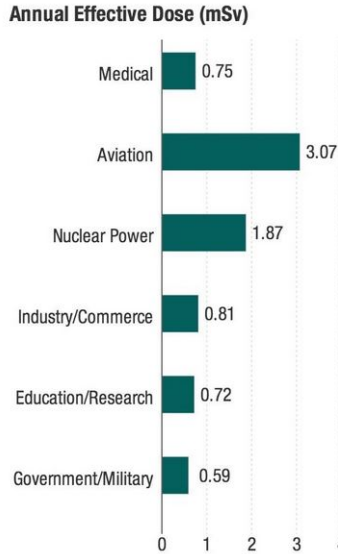


Σχήμα 2.17: Σύγκριση της δόσης στην επιφάνεια της Γης με διάφορες διαστημικές αποστολές (Πηγή: nasa.gov).

την αντιμετώπιση της έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών λόγω κοσμικής ακτινοβολίας ως επαγγελματική έκθεση σε ακτινοβολίας ήδη από το 1990 (ICRP, 1991).

Η σύσταση αυτή υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 1996 (EC, 1996) με εφαρμογή της στην Κοινοτική Οδηγία 96/29/EURATOM και αποτέλεσε νομική ρύθμιση στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2000 (EURATOM, 1996). Η σύσταση αυτή, η οποία δίνει τα βασικά πρότυπα ασφάλειας για την προστασία της υγείας του κοινού και των εργαζομένων από τους κινδύνους της ιονίζουσας ακτινοβολίας, ήρθε να αντικαταστήσει την οδηγία 80/836/EURATOM (Courades, 1999). Τα νομικά προβλεπόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας αφορούσαν κυρίως την ατομική αξιολόγηση της έκθεσης των μελών του πληρώματος σε ακτινοβολία, λαμβάνοντας υπόψη στη συνέχεια την αξιολογηθείσα αυτή έκθεση κατά την οργάνωση των προγραμμάτων εργασίας με σκοπό τη μείωση της δόσης του υψηλά εκτιθέμενου προσωπικού, τον περιορισμό της δόσης των εγκύων μελών του πληρώματος μετά την αναφορά της εγκυμοσύνης σε 1 mSv για το υπόλοιπο της εγκυμοσύνης, καθώς και την ενημέρωση των εργαζομένων σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία που συνεπάγεται η εργασία τους (Courades, 1999).

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία τροποποιήθηκε με την οδηγία 2013/59/EURATOM το 2013 (EURATOM, 2013), η οποία βελτίωσε περαιτέρω τα πρότυπα ακτινοπροστασίας του πληρώματος με βάση τα πιο πρόσφατες συστάσεις της ICRP το 2007 (ICRP, 2007). Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη έκθεση για τα πληρώματα αεροσκαφών δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 20 mSv το χρόνο μέσα σε πέντε χρόνια, χωρίς να ξεπερνά τα 50 mSv ανά έτος, ενώ σε περίπτωση εγκυμοσύνης,



Σχήμα 2.18: Η μέση ετήσια ενεργός δόση για εργαζομένους σε διάφορους τομείς. Οι δόσεις για τις αερομεταφορές υπολογίζονται με βάση τα δρομολόγια και το υψόμετρο πτήσης. (NCRP, 2009).

η δόση της μητέρας, και συνεπώς του εμβρύου, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 mSv για το υπόλοιπο της εγκυμοσύνης, από τη στιγμή της ανακοίνωσής της. Αξίζει να σημειωθεί πως το όριο έκθεσης για το γενικό πληθυσμό είναι 1 mSv ανά έτος. Τα όρια έκθεσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.6. Η οδηγία αυτή της Ευρωπαϊκής Ένωσης ενσωματώνεται σε νόμους και κανονισμούς στα κράτη μέλη της και περιλαμβάνεται στις διαδικασίες προτύπων ασφαλείας των αερομεταφορών των Κοινών Αεροπορικών Αρχών (Joint Aviation Authorities-JAA), ενός οργανισμού που αποτελείται από 35 ευρωπαϊκά κράτη (Bartlett et al., 2001).

Η εφαρμογή της οδηγίας αυτής απαιτεί την αξιολόγηση και την εκτίμηση των δόσεων του πληρώματος που μπορεί να υπερβαίνουν τα 1 mSv ανά έτος. Η αξιολόγηση αυτή μπορεί κατ'άρχην να γίνει είτε με άμεση μέτρηση είτε με εκτίμηση χρησιμοποιώντας κάποια προκαθορισμένη διαδικασία, όπως ένα επικυρωμένο λογισμικό (McAulay, 2000). Αν γενικότερα, οι πτήσεις περιορίζονται σε υψόμετρα πτήσης κάτω των 8 km , τότε είναι σχεδόν απίθανο να ξεπεραστεί το όριο αυτό (Courades, 1999). Η εκτίμηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία για τα αεροσκάφη πολιτικής αεροπορίας βρίσκεται αναλυτικά στη σειρά προτύπων ISO:20785, τα οποία περιλαμβάνουν την εννοιολογική βάση για μετρήσεις (ISO, 2020a), το χαρακτηρισμό απόκρισης των οργάνων (ISO, 2020b), τις μετρήσεις σε υψόμετρα πτήσης (ISO, 2015) και την αξιολόγηση των διάφορων λογισμικών (ISO, 2019). Επιπροσθέτως, τόσο η ICRP όσο και η ICRU έχουν εκδώσει συστάσεις για την αξιολόγηση της έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών, βάσει δεδομένων αναφοράς από πραγματικές μετρήσεις (ICRP, 2016; ICRU, 2010)

Μέγεθος	Όρια δόσεων για επαγγελματική έκθεση	Όρια δόσεων για έκθεση κοινού
Ενεργός δόση	20 mSv ανά χρόνο, κατανεμημένο σε διακριτές περιόδους των 5 ετών, χωρίς καμία χρονιά να υπερβαίνει τα 50mSv. (Σε περίπτωση δήλωσης εγκυμοσύνης, η δόση στο έμβρυο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1mSv για το υπόλοιπο της εγκυμοσύνης.)	1 mSv σε ένα χρόνο (Σε ειδικές περιπτώσεις, επιτρέπεται μία υψηλότερη τιμή για μία μεμονωμένη χρονιά, με την προϋπόθεση ότι η μέση τιμή σε 5 χρόνια δεν υπερβαίνει το 1mSv ανά χρόνο.)
Ισοδύναμη δόση (οφθαλμοί)	20 mSv ανά χρόνο, κατανεμημένο σε διακριτές περιόδους των 5 ετών, χωρίς καμία χρονιά να υπερβαίνει τα 50mSv	15 mSv σε ένα χρόνο
Ισοδύναμη δόση (δέρμα)	500 mSv σε ένα χρόνο	50 mSv σε ένα χρόνο
Ισοδύναμη δόση (χέρια / πόδια)	500 mSv σε ένα χρόνο	-

Πίνακας 2.6: Τα όρια έκθεσης σύμφωνα με την ICRP (Πηγή: icrpaedia.org).

Όσον αφορά τις ΗΠΑ, οι συστάσεις της ICRP δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί στη δεσμευτική νομοθεσία τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η έκθεση των πληρωμάτων πτήσης σε κοσμική ακτινοβολία να μη ρυθμίζεται ή να μην παρακολουθείται συνεχώς (Waters et al., 2000), ενώ δεν έχουν θεσπιστεί και επίσημα όρια δόσης για την έκθεση των πληρωμάτων αυτών (Grajewski et al., 2011; Meier et al., 2020). Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας των ΗΠΑ (Federal Aviation Administration - FAA), η οποία έχει δικαιοδοσία για την υγεία και την ασφάλεια του αμερικανικού ιπτάμενου πληρώματος, αναγνώρισε επίσημα με τη Συμβουλευτική Εγκύκλιο του 1994 ότι τα πληρώματα αεροσκαφών εκτίθενται επαγγελματικά σε ιονίζουσα ακτινοβολία, συνέστησε να ενημερώνονται για την έκθεση στην ακτινοβολία και τους σχετικούς κινδύνους για την υγεία και βοήθησε στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με το εργασιακό τους περιβάλλον (FAA, 1994; Friedberg et al., 2000). Έχει υιοθετήσει, δηλαδή, ως επί το πλείστον συμβουλευτικό ρόλο για τους πιλότους και αερομεταφορείς με δημοσίευση Συμβουλευτικών Εγκυκλίων, εκπαιδευτικών εγγράφων και τεχνικών αναφορών (Friedberg and Copeland, 2003; Schennetten et al., 2018).

Η FAA συνιστά τη συνδυαστική υιοθέτηση συστάσεων τόσο από την ICRP όσο και από το και Εθνικό Συμβούλιο Ακτινοπροστασίας και Μετρήσεων (National Council of Radiation Protection and Measurements - NCRP). Αυτά περιλαμβάνουν μία πενταετή μέση ενεργό δόση των 20 mSv ανά έτος, χωρίς να ξεπερνά τα τα 50 mSv σε ένα συγκεκριμένο έτος και ένα επιπρόσθετο όριο της τάξης του τα 0.5 mSv ανά μήνα για μία έγκυο μέλος πληρώματος, και συνολικά τα 1 mSv κατά το υπόλοιπο της εγκυμοσύνης, ξεκινώντας από τη στιγμή που η εγκυμοσύνη αναφέρεται στη διαχείριση. Προκειμένου οι έγκυες να ελαχιστοποιήσουν την επαγγελματική έκθεση, θα πρέπει να πετούν σε πτήσεις σύντομης διάρκειας, χαμηλού ύψους και μικρού γεωγραφικού πλάτους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι πτήσεις Αθήνα - Νέα Υόρκη

και Χιούστον - Όστιν. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία πτήση μεγάλης διάρκειας και ύψους με πάνω από 80 ώρες στον αέρα μηνιαίως, με τη μηνιαία ενεργό δόση να είναι περίπου 0.57 mSv , ξεπερνώντας το μηνιαίο συνιστώμενο όριο, αλλά και το όριο για τη συνολική εγχυμοσύνη σε μόλις 2 μήνες. Αντίθετα, για τις ίδιες συνολικές ώρες πτήσεις, αλλά αυτή τη φορά μεταξύ Χιούστον - Όστιν, θα λάμβανε μόλις 0.027 mSv μηνιαίως, τιμή που είναι πολύ χαμηλότερη από τα συνιστώμενα όρια (Nicholas et al., 2000).

Υπάρχουν μόνο μερικοί κανονισμοί που σχετίζονται με την ιονίζουσα ακτινοβολία για πληρώματα αερομεταφορών. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι πτήσεις που πραγματοποιούνται σε πολιτικές περιοχές (εκτός από αυτές που πραγματοποιούνται αποκλειστικά εντός της Αλάσκας), οι οποίες απαιτούν ειδικό σχέδιο δράσης για τον μετριασμό της έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία σε περίπτωση κάποιας ηλιακής καταιγίδας μεγάλης έντασης (FAA, 2007). Γενικότερα, τα όρια που προτείνονται από την ICRP, την NCRP και την FAA στοχεύουν στην αποφυγή των ντετερμινιστικών αποτελεσμάτων και την ελαχιστοποίηση των στοχαστικών επιπτώσεων λόγω έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία, όπως είναι η καρκινογένεση (Friedberg et al., 2000; Waters et al., 2000).

Πλέον, η εγκύκλιος του 1994 έχει ακυρωθεί και αντικατασταθεί από μια νέα συμβουλευτική εγκύκλιο του 2006 (FAA, 2006), στην οποία αναφέρεται ότι υπό την προϋπόθεση ότι τα πληρώματα αεροσκαφών ανταποκρίνονται στις προειδοποιήσεις σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, αυτή δε θα συνεισφέρει σε βαθμό που θα ξεπεραστούν τα συνιστώμενα όρια έκθεσης, ενώ η πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου λόγω επαγγελματικής έκθεσης σε γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία είναι μια μικρή προσθήκη στους κινδύνους που αντιμετωπίζει και ο γενικός πληθυσμός (Grajewski et al., 2011).

Σε αντίθεση με την έκθεση λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας από κοσμικές πηγές, δεν υπάρχουν κανονισμοί σχετικά με την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV) στα πιλοτήρια αεροσκαφών μέχρι στιγμής. Ωστόσο, η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιονίζουσα Ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP) παρέχει μία συμβουλευτική σύσταση για τη μέγιστη επαγγελματική έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Σύμφωνα με τις συστάσεις της επιτροπής, η έκθεση στα μάτια σε μη σταθμισμένη UV-A δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 10 kJ/m^2 , ενώ η συνδυαστική έκθεση τόσο του δέρματος όσο και των ματιών σε σταθμισμένη υπεριώδη ακτινοβολία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30 J/m^2 εντός 8 ωρών αντίστοιχα (ICNIRP, 2007). Αυτές οι τιμές έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά ως κατευθυντήρια γραμμή για την αξιολόγηση της έκθεσης λόγω υπεριώδους ακτινοβολίας στο πιλοτήριο, παρόλα αυτά υπό ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ξεπεραστούν τα όρια αυτά (Schennetten et al., 2018). Αντίστοιχα, δεν υπάρχει κάποιο όριο ή σύσταση σχετικά με την έκθεση λόγω TGF

(Meier et al., 2020).

Η Διεθνής Ομοσπονδία Πιλότων Αεροπορικής Γραμμής (International Federation of Air Line Pilots Associations - IFALPA), η οποία αντιπροσωπεύει περίπου 100000 πιλότους από πιλοτικές ενώσεις σε περίπου 90 διαφορετικές χώρες, συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, προσπαθεί να γνωστοποιήσει τις ανησυχίες της σχετικά με τις εκθέσεις ακτινοβολίας. Παράλληλα έχει υιοθετήσει μία πρόταση παρόμοια, με αυτή της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 1999, όπου, μεταξύ άλλων, ορίζει ότι τα αεροπλάνα μεγάλης εμβέλειας που πετούν πάνω από 8000 *m* πρέπει να μεταφέρουν εξοπλισμό για τη συνεχή μέτρηση του ρυθμός δόσης λόγω κοσμικής ακτινοβολίας που λαμβάνεται, την αθροιστική δόση σε κάθε πτήση, αλλά και κατά την παρουσία ηλιακών εκρήξεων, ενώ όλα τα μέλη του πληρώματος θα επιτρέπεται να προσαρμόσουν τα δρομολόγια πτήσης τους έτσι ώστε να μην υπερβαίνουν ένα ετήσιο όριο 6 *mSv* (Baily, 2000).

Οι αλλαγές στα αεροσκάφη, τα αυξημένα πολιτικά δρομολόγια, οι προσπάθειες μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων και του κόστους καθώς και οι αλλαγές στις συμβάσεις του πληρώματος ενδέχεται να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της έκθεσης κατά τη διάρκεια της πτήσης. Σύμφωνα με την αρχή ακτινοπροστασίας ALARA, θα πρέπει η απόσταση μεταξύ πηγής και ακτινοβολίας να είναι αυξημένη, να υπάρχει κατάλληλη θωράκιση και ο χρόνος έκθεσης να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Δυστυχώς οι αρχές αυτές δεν μπορούν να εφαρμοστούν κατάλληλα για την προστασία του πληρώματος από την κοσμική ακτινοβολία. Οι πτήσεις σε χαμηλότερα υψόμετρα θα ισοδυναμούσε με αύξηση της απόστασης μεταξύ πηγής και ατόμου, αλλά θα οδηγούσε σε αύξηση κυκλοφορίας με κίνδυνο ατυχημάτων, σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμων και σε αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η αποτελεσματική θωράκιση είναι επίσης ανέφικτη, καθώς η τεχνολογία κατασκευής αεροσκαφών δεν είναι συμβατή με τα βαριά υλικά θωράκισης. Επιπλέον, οι πτήσεις σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου θα μπορούσαμε να επωφεληθούμε από την πιο αποτελεσματική θωράκιση του γεωμαγνητικού πεδίου, δεν είναι βιώσιμες καθώς απαιτούν πτήσεις μεγαλύτερης διάρκειας, που συνεπάγονται αύξηση του χρόνου έκθεσης. Τέλος, η μείωση του χρόνου έκθεσης οδηγεί σε μειωμένο ωράριο ανά πιλότο ή ανά μέλος του πληρώματος καμπίνας, το οποίο αυξάνει δραματικά το κόστος για τις αεροπορικές εταιρείες λόγω ανάγκης μεγαλύτερου αριθμού προσωπικού (Baily, 2000; Silva et al., 2013). Η ακριβής αξιολόγηση της έκθεσης του πληρώματος αεροσκαφών σε ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη δημόσια υγεία. Η ταυτοποίηση των πιλότων υψηλής έκθεσης θα αποτελούσε πολύτιμη προσθήκη σε ένα πρόγραμμα επαγγελματικής υγείας, εάν η παροχή συμβουλών ή παρέμβασης στηριζόταν σε μια κατανόηση αυτής της επαγγελματικής ομάδας, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων προγραμματισμού και αρχαιότητας (Grajewski et al., 2011).

Τα SPEs είναι συνήθως δεν συνεισφέρουν στα επίπεδα ακτινοβολίας στα τυπικά υψόμε-

τρα πτήσης των εμπορικών αερομεταφορών. Ενίοτε, κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου, ο αριθμός και οι ενέργειες αυτών των ηλιακών σωματιδίων μπορεί να αυξηθούν αρκετά, συνεισφέροντας έτσι στη δόση. Τα SPEs θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση στα μελλοντικά αεριωθούμενα αεροσκάφη. Ένα υποθετικό υπερηχητικό αεροπλάνο θα μπορούσε να είναι εξοπλισμένο με ειδικά εργαλεία παρακολούθησης των επιπέδων ακτινοβολίας, όπως τα Concorde σήμερα, το οποίο θα μπορούσε να προειδοποιήσει τους πιλότους για την εμφάνιση ενός SPE, στην περίπτωση που δεν είναι σε θέση να το κάνουν οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας. Η FAA αναγνωρίζει την επικινδυνότητα των SPEs, αλλά αποκλείει τη συνεισφορά τους στη δόση, καθώς είναι σπάνια, επηρεάζουν λίγες πτήσεις και ενδέχεται να αποφευχθούν, καθώς περίπου το 84% των SPEs δεν προκαλεί GLE. Έτσι, ιδιαίτερη περίπτωση για την ακτινοπροστασία μπορεί να αποτελεί συγκεκριμένα η εμφάνιση GLEs, όπου ύστερα από έγκαιρη ειδοποίηση θα μπορεί να τροποποιείται ελφωρως η διαδρομή, είτε μειώνοντας το υψόμετρο πτήσης είτε αποφεύγοντας τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Θα πρέπει, όμως, να σημειωθεί πως τα SPEs μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλαβες ή δυσλειτουργίες στα ευαίσθητα ηλεκτρονικά του αεροπλάνου, θέτοντας έτσι με αυτό τον τρόπο σε κίνδυνο τα πληρώματα και τους επιβάτες.

Όσον αφορά την έκθεση των αστροναυτών, τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Καθώς οι μελλοντικές αποστολές θα είναι πλέον εκτός της LEO, και συνεπώς έξω από την προστασία της γεωμαγνητικής θωράκισης, η έκθεση των αστροναυτών θα περιλαμβάνει υψηλότερες δόσεις από οποιαδήποτε άλλη αποστολή στην ιστορία των διαστημικών πτήσεων. Παρά την πολυετή έρευνα, η κατανόηση του διαστημικού περιβάλλοντος ακτινοβολίας και ο κίνδυνος που ενέχει για τους αστροναύτες σε αποστολές μεγάλης διάρκειας παραμένει περιορισμένη. Γενικότερα, παρατηρείται μια διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της έρευνας και των εμπειρικών επιδράσεων που παρατηρούνται στα πληρώματα διαστημικών σκαφών, πιθανώς λόγω των πολυάριθμων παραγόντων που περιορίζουν την επίγεια προσομοίωση του σύνθετου διαστημικού περιβάλλοντος και την παρέκταση των ανθρώπινων κλινικών συνεπειών από ποικίλα μοντέλα σε πειραματόζωα (Chancellor et al., 2018).

Το 1988, το NCRP δημοσίευσε μία έκθεση σύμφωνα με την οποία συνιστάται η έκθεση των αστροναυτών σε κοσμική ακτινοβολία να περιορίζεται καθ'όλη τη διάρκεια της σταδιοδρομίας τους σε επίπεδα που δεν θα προκαλούν πλέον από το 3% του κινδύνου θανάτου που προκαλείται από την έκθεση (Risk of Exposure Induced Death - REID) (NCRP, 1989). Αυτό υπογραμμίστηκε εκ νέου πρόσφατα (NASA, 2015; NCRP, 2014), όπου τονίστηκε ότι η NASA πρέπει να συνεχίσει να τηρεί το όριο σταδιοδρομίας 3% REID για μελλοντικές αποστολές εκτός της LEO. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται επίσης και για την περίπτωση SPEs (NCRP, 2006). Πρόσφατοι υπολογισμοί δείχνουν ότι υπάρχει σοβαρή πιθανότητα να γίνει υπέρβαση του ποσοστού αυτού

Ηλικία (έτη)	25	35	45	55
Άντρας	1.50 Sv	2.50 Sv	3.25 Sv	4.00 Sv
Γυναίκα	1.00 Sv	1.75 Sv	2.50 Sv	3.00 Sv

Πίνακας 2.7: Όρια έκθεσης για τους αστροναύτες ανά ηλικία και φύλο για το σύνολο της σταδιοδρομίας τους, όπως καθορίζονται από τη NASA (Rask et al., 2008).

	Διάρκεια Έκθεσης	Αιμοποιητικά Όργανα (βάθος 0.01 cm)	Οφθαλμοί (βάθος 0.01 cm)	Δέρμα (βάθος 0.01 cm)
Αστροναύτες	30 ημέρες	0.25 Sv	1.0 Sv	1.5 Sv
	Ετησίως	0.50 Sv	2.0 Sv	3.0 Sv
	Σταδιοδρομία	1 – 4 Sv	4.0 Sv	6.0 Sv
Κοινό	Ετησίως	0.001 Sv	0.015 Sv	0.05 Sv

Πίνακας 2.8: Όρια διείσδυσης και έκθεσης ακτινοβολίας για αστροναύτες και το ευρύ κοινό (Rask et al., 2008).

κατά τη διάρκεια μιας αποστολής στον Άρη. Τα όρια έκθεσης για τους αστροναύτες, ανάλογα με το φύλο και την ηλικία τους, όπως ορίζονται από τη NASA, δίνονται στον Πίνακα 2.7, ενώ η σύγκριση με τις τιμές για το γενικό πληθυσμό δίνονται στον Πίνακα 2.8.

Σύμφωνα με την ICRP 103 (ICRP, 2007), η έκθεση των αστροναυτών στο διάστημα αποτελεί μια ειδική περίπτωση έκθεσης από φυσικές πηγές ακτινοβολίας που υπάρχουν στο διαστημικό περιβάλλον, διαφορετικές από αυτές στη Γη. Έτσι, αν και οι αστροναύτες εκτίθενται σε ιονίζουσα ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των επαγγελματικών τους δραστηριοτήτων, η έκθεση αυτή συνήθως δεν ταξινομείται ως επαγγελματική υπό την έννοια του συστήματος ICRP για την ακτινοπροστασία τόσο των εργαζομένων στη γη όσο και των πληρωμάτων αεροσκαφών. Ακόμα και στις νεότερες οδηγίες της ICRP σε σχέση με την έκθεση στο διαστημικό χώρο (ICRP, 2013), επίκεντρο είναι η αξιολόγηση της έκθεσης και όχι η ακτινοπροστασία.

2.10 Μοντέλα

Εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης της κοσμικής ακτινοβολίας, η μέτρηση της δόσης δεν είναι απλή. Η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία μπορεί να μετρηθεί είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Οι ενεργητικοί ανιχνευτές παρέχουν άμεσες μετρήσεις, ενώ οι παθητικοί ανιχνευτές πρέπει να εκτιμηθούν στο εργαστήριο μετά την πτήση. Η ενεργητική δοσιμετρία περιλαμβάνει απαριθμητές Geiger-Muller (ακτινοβολία γ), θαλάμους ιονισμού (ακτινοβολία γ) απαριθμητές τριφθοριούχου βορίου (νετρόνια), σπινθηριστές (ακτινοβολία γ ή νετρόνια) και αναλογικοί μετρητές ισοδύναμου

ιστού (tissue equivalent proportional counters - TEPCs) (μικτά πεδία ακτινοβολίας), ενώ τα δοσόμετρα για ακτινοβολία γ και νετρόνια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, εξαιτίας του σύνθετου φάσματος το οποίο περιλαμβάνει ενεργητικά φορτισμένα σωματίδια. Η παθητική δοσιμετρία περιλαμβάνει κυρίως δοσόμετρα θερμοφωταύγειας (thermoluminescence dosimeters - TLDs), τα οποία δίνουν μία καλή εκτίμηση για ακτινοβολία X, γ και φορτισμένα σωματίδια, δοσίμετρο ανθρακικής πολυαλλυδιγλυκόλης (polyallyldiglycol carbonate - PADC ή αλλιώς CR39) για τη μέτρηση της νετρονικής συνιστώσας και ανιχνευτές ημιαγωγών πυριτίου Liulin (Bagshaw et al., 1996). Ειδικότερα, οι TEPCs και οι Liulin μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της $H^*(10)$ (Meier et al., 2016).

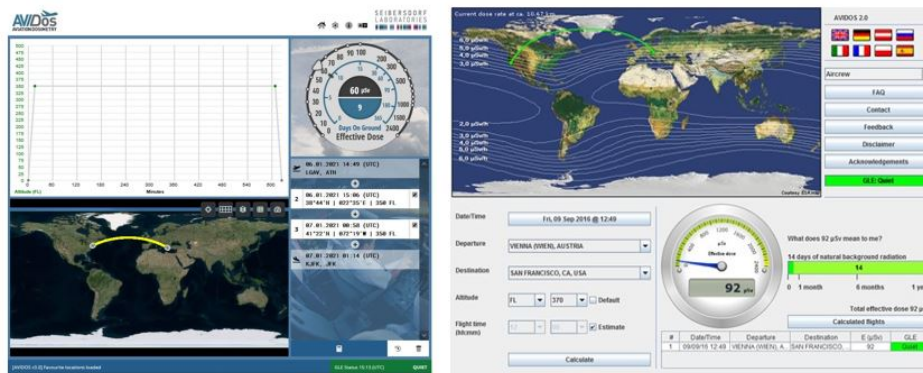
Δυστυχώς, οι περισσότεροι ανιχνευτές είναι ευαίσθητοι συνήθως σε ένα μόνο είδος ακτινοβολίας και για ένα περιορισμένο ενεργειακό εύρος, ενώ για να πιτευχθεί μία σωστή μέτρηση, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια σειρά ανιχνευτών ή ορισμένων μετρητών που είναι σε θέση να λάβουν υπόψη όλα τα στοιχεία της κοσμικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, οι συσκευές τέτοιου είδους κρίνονται ακατάλληλες για την πραγματοποίηση μετρήσεων ρουτίνας κατά τη διάρκεια εμπορικών πτήσεων.

Η έκθεση του πληρώματος αέρα στην ιονίζουσα ακτινοβολία έχει μελετηθεί λεπτομερώς τα τελευταία 30 με 40 χρόνια και έχει επιτευχθεί ένας καλός χαρακτηρισμός του περιβάλλοντος ακτινοβολίας. Για πρακτικούς σκοπούς, όπως η παρακολούθηση των εκθέσεων του πληρώματος πτήσης, αναπτύχθηκαν διάφορα υπολογιστικά προγράμματα, μοντέλα και εφαρμογές για τον υπολογισμό των ατομικών εκθέσεων του προσωπικού ή για την παροχή συνοπτικών αξιολογήσεων. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται τόσο σε συλλογή πραγματικών δεδομένων όσο και σε προσομοιώσεις του γεωδιαστημικού περιβάλλοντος και αριθμητικές αναλύσεις. Τα κυριότερα πακέτα προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μοντέλων αυτών είναι τα: FLUKA (FLUktuierende KAskade), GEANT4 (GEometry ANd Tracking version 4), MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport), HZETRN (High Charge and Energy Transport) και PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System).

Παρακάτω αναλύεται η αρχή λειτουργίας των πιο σημαντικών εφαρμογών που είναι διαθέσιμες σήμερα για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών στη γήινη ατμόσφαιρα. Σύγκριση των παρεχόμενων αποτελεσμάτων από τα μοντέλα αυτά είναι διαθέσιμα σε διάφορες μελέτες (Bottollier-Depois et al., 2012; EC, 2004, 2009, 2017), όπου δεν παρατηρείται απόκλιση μεταξύ τους μεγαλύτερη από $\pm 20\%$, ενώ είναι πολύ κοντά και σε πραγματικές μετρήσεις.

2.10.1 AVIDOS

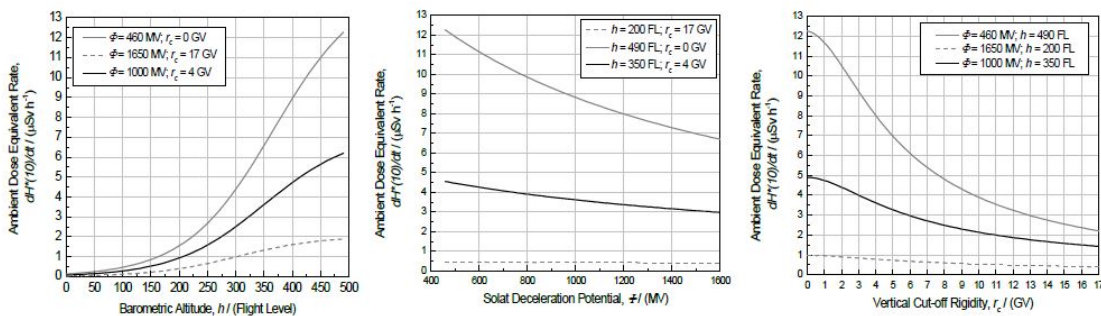
Η AVIDOS (Aviation Dosimetry) είναι μία ενημερωτική και εκπαιδευτική διαδικτυακή υπηρεσία για τον υπολογισμό των δόσεων ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα και οι επιβάτες αεροσκαφών λόγω κοσμικών ακτίνων (Latocha and Beck, 2016; Latocha et al., 2009). Διατίθεται από τα Seibersdorf Laboratories της Αυστρίας και η υλοποίησή του υποστηρίχθηκε από το Αυστριακό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Μεταφορών και Καινοτομίας, καθώς και την Αυστριακή Υπηρεσία Αεροπορίας και Διαστήματος (ALR). Η αξιολόγηση της δόσης με τη χρήση της AVIDOS είναι διαπιστευμένη από το Αυστριακό γραφείο διαπίστευσης σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς και ισχύει σε ολόκληρη την Ευρώπη. Τα Seibersdorf Laboratories είναι ένα από τα expert group του Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC) της ESA, όπου η υπηρεσία AVIDOS παρέχεται ως federated product και είναι διαθέσιμο ύστερα από εγγραφή (<https://swe.ssa.esa.int/avidos-federated>) (Σχήμα 2.19). Η αξιολόγηση του λσογισμικού έχει γίνει σύμφωνα με τα πρότυπα της ICRP.



Σχήμα 2.19: Η πλατφόρμα της AVIDOS σε aircrew mode για εύκολη χρήση από το κοινό (<https://avidos.seibersdorf-laboratories.at/public>). Παρέχοντας την ημερομηνία πτήσης και τα αεροδρόμια αναχώρησης και προορισμού, γίνεται μία απλή μέτρηση της ενεργού δόσης κατά τη διάρκεια μίας πτήσης, καθώς και ο χρόνος που ισοδυναμεί με μία τέτοια έκθεση στην επιφάνεια της Γης (αριστερά). Η πλατφόρμα της AVIDOS σε science mode στην ιστοσελίδα της ESA (δεξιά), όπου μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της ενεργού δόσης καθώς και της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μίας πτήσης, με ακριβή καθορισμό της διαδρομής (<https://swe.ssa.esa.int/avidos-federated>).

Η AVIDOS χρησιμοποιεί ένα μοντέλο πολλαπλών παραμέτρων που βασίζεται σε Monte Carlo προσομοιώσεις έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία για πολλά διαφορετικά υψόμετρα, γεωγραφικές θέσεις και καταστάσεις ηλιακής δραστηριότητας με τη χρήση του πακέτου προσομοιώσεων FLUKA. Η γεωμετρία προσομοίωσης περιλαμβάνει μια τρισδιάστατη σφαιρική αναπαράσταση της ατμόσφαιρας της Γης. Το ατμοσφαιρικό τυπικό προφίλ ύψους-πυκνότητας με ένα κατάλληλο

μείγμα αζώτου, οξυγόνου και αργού οργανώθηκε σε 100 ομόκεντρα κελύφη που εκτείνονται σε υψόμετρο 70 km. Για την περιγραφή του περιβάλλοντος ακτινοβολίας λόγω γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων χρησιμοποιήθηκε ένα πρωτογενές φάσμα πρωτονίων τροποποιημένο από πρόσφατα πειραματικά δεδομένα δορυφόρων και μπαλονιών (Gaisser et al., 2001). Η ηλιακή διαμόρφωση λαμβάνεται υπόψη μέσω υπολογισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα από μετρητές νετρονίων (συγκεκριμένα από το μετρητή νετρονίων της Oulu στη Φινλανδία), ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκε και ένα μοντέλο για τα κατώφλια κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας (Smart and Shea, 1997). Έγινε διάδοση του φάσματος αυτού στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα και διαφορετικές περιόδους ηλιακής δραστηριότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές ενεργούς διατομές για τις διάφορες πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Οι ροές σωματιδίων που προέκυψαν, μετατράπηκαν σε ρυθμούς ροής ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος και ενεργού δόσης με τη χρήση των παραγόντων βαρύτητας ακτινοβολίας που προτείνονται από την ICRP. Προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς ηλιακού δυναμικού επιβράδυνσης και κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας για διάφορα υψόμετρα (Latocha, 2017; Latocha et al., 2009). Έτσι, η AVIDOS πραγματοποιεί δοσιμετρικούς υπολογισμούς σε υψόμετρα έως και 15 km για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση και για ολόκληρο τον κύκλο ηλιακής δραστηριότητας (Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ως συνάρτηση του βαρομετρικού υψομέτρου, του ηλιακού δυναμικού επιβράδυνσης και της μαγνητικής δυσκαμψίας, αντίστοιχα, όπως υπολογίστηκε με την AVIDOS (Latocha et al., 2009).

Η νεότερη έκδοση μπορεί να παρέχει και υπολογισμούς δόσης ακτινοβολίας λόγω έκτακτων γεγονότων ηλιακής προέλευσης, όπως επίγειες επαυξήσεις της κοσμικής ακτινοβολίας, όπου παρατηρείται μεγάλη αύξηση της δόσης (Latocha, 2017; Latocha and Beck, 2017). Πιο συγκεκριμένα, έχουν μελετηθεί δύο ιστορικά γεγονότα, το GLE42 στις 29 Σεπτεμβρίου 1989 (το ισχυρότερο GLE κατά τη διάρκεια του 22ου ηλιακού κύκλου) και το GLE72 στις 10 Σεπτεμβρίου 2017 (το δεύτερο και τελευταίο GLE του 24ου ηλιακού κύκλου), όπου η δόση που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια του GLE42 διαφέρει σημαντικά από τη δόση που λαμβάνεται σε συνθήκες ήπιας

ηλιακής δραστηριότητας, αλλά και από τη δόση κατά τη διάρκεια του GLE72, καθώς πρόκειται για ένα φαινόμενο πολύ μικρής έντασης. Η AVIDOS κάνει χρήση της υπηρεσίας GLE Alert, που παρέχεται από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας ως federated product στην ESA, για την ανίχνευση GLE σε πραγματικό χρόνο.

2.10.2 CARI

Το υπολογιστικό πρόγραμμα CARI υπολογίζει την ενεργό δόση λόγω γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που λαμβάνει ένα άτομο σε ένα αεροσκάφος (με βάση ένα ανθρωπόμορφο ομοίωμα) κατά μήκος μίας διαδρομής που καθορίζεται από το χρήστη. Αναπτύχθηκε από το Ιατρικό Ινστιτούτο Πολιτικής Αεροδιαστημικής της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αερομεταφορών (FAA) των Ηνωμένων Πολιτειών. Η πρώτη έκδοση με την αρχική ονομασία Carrier (στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η συντομογραφία CARI) δημιουργήθηκε το 1991, ενώ μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές βασικές αλλαγές. Στο CARI-2 έως το CARI-6 χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων υπολογισμού του ρυθμού δόσης από τον κώδικα LUIN, με κάθε σημαντική αναθεώρηση να ακολουθεί μια σημαντική αναθεώρηση του LUIN. Οι κύριες εκδόσεις του CARI άλλαξαν συχνά προκειμένου να ταιριάζουν στις ανάγκες συγκεκριμένων χρηστών (όπως για παράδειγμα της Πολεμικής Αεροπορίας και το Εθνικό Ινστιτούτο Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία των ΗΠΑ). Έτσι, υπήρχαν δύο εκδόσεις CARI-2 (2, 2N), τέσσερις εκδόσεις CARI-3 (3, 3C, 3N, 3Q), τρεις εκδόσεις του CARI-4 (4/4EZ, 4Q, 4R), τέσσερις εκδόσεις CARI-5 (5, 5E, 5AF, 5G) και επτά εκδόσεις CARI-6 (6, 6HF, 6M, 6P, 6PM, -6W, -WEB). Το 2014, η νεότερη έκδοση CARI-7 (CARI-7, CARI-7A) έρχεται να αντικαταστήσει το CARI-6, με πολλές βασικές αλλαγές (Copeland, 2017).

Πιο συγκεκριμένα, το CARI-7 αναπτύσσεται με τον κώδικα MCNPX 2.7.0, σε αντίθεση με τα προηγούμενα που χρησιμοποιούσαν διάφορες εκδόσεις του LUIN. Το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας το εσωτερικό διαθέσιμο μενού ή με τη χρήση σεναρίων, ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη στα αρχεία προετοιμασίας. Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια διεπαφή γραμμής εντολών και μπορεί να εκτελεστεί στους περισσότερους προσωπικούς υπολογιστές. Τα αρχεία χρησιμοποιούν περίπου 80 MB χώρου στο δίσκο και έως 42 MB μνήμης RAM, ενώ τα αρχεία εξόδου είναι συνήθως μικρά (kb). Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις προηγούμενες εκδόσεις CARI, το CARI-7 δεν απαιτεί εξομοιωτή (emulator) του λειτουργικού συστήματος DOS σε σύγχρονα συστήματα, αλλά θα τρέχει σε FORTRAN και .NET format.

Με το CARI μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της δόσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο (συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες, συγκεκριμένο υψόμετρο και ημερομηνία) αλλά

και κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται η συντομότερη διαδρομή (γεωδαιτική) μεταξύ των αεροδρομίων αναχώρησης και προορισμού, ενώ συνυπολογίζονται και οι χρόνοι απογείωσης και προσγείωσης μαζί με την παραμονή στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα. Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη το υψόμετρο και τη γεωγραφική θέση κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, με βάση τις πληροφορίες που παρέχει ο χρήστης. Για το CARI-7 το όριο υψομέτρου επεκτάθηκε από τα 27 km στα 100 km. Βάσεις δεδομένων χρησιμοποιούνται για τις μεταβολές στην ηλιακή δραστηριότητα και το γεωμαγνητικό πεδίο. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής μοντέλου γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας από μία λίστα (όπως για παράδειγμα ISO, Bahdwar O'Neill, και άλλα). Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της ροής σωματιδίων, της ενεργού δόσης καθώς και της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος (Σχήμα 2.21). Στην νέα έκδοση δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης των παραπάνω υπολογισμών κατά τη διάρκεια μίας μείωσης Forbush ή μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας, το οποίο ήταν αδύνατον μέχρι πρότινος με τη χρήση του κώδικα LUIN.

```

CARI-7A (ACADEMIC USE) Civil Aerospace Medical Institute
OCTOBER 4, 2019 (4.1.0) Federal Aviation Administration

MAIN MENU
<1> HELP file (Read me).
<2> Galactic radiation received on flights.
<3> View, add, or change airport information.
<4> Radiation level at user-specified
altitude and geographic coordinates.
<5> Update heliocentric potential, ISO sunspot
number, or Forbush effect data.
<6> Change output settings. View old results.
<7> Exit program.

Type 1, 2, 3, 4, 5, 6, or 7 and press <ENTER> .

DATE 2008.0409830056
HELIOCENTRIC POTENTIAL 298 MV
LATITUDE 90.000000000000 N
LONGITUDE 0.000000000000E+000 E
ALTITUDE 10.067999740000 km
DEPTH 242.120700000000 g/cm^2
VERTICAL CUTOFF RIGIDITY 0.000000000000E+000 GV
PARTICLE TOTAL
AMBIENT DOSE EQUIVALENT (h*(10)) 0.22826028952467 +/-
0.219157259410313 MICROSIEVERTS/HOUR

SELECT RADIATION.
<0> TOTAL <10> DEUTERONS <20>F <30>K
<1> NEUTRONS <11> TRITONS <21>Ne <31>Ca
<2> PHOTONS <12> HELIONS <22>Na <32>Sc
<3> ELECTRONS <13> ALPHAS <23>Mg <33>Ti
<4> POSITRONS <14> LI <24>Al <34>V
<5> NEG. MUONS <15> Be <25>Si <35>Cr
<6> POS. MUONS <16> B <26>P <36>Mn
<7> PROTONS <17> C <27>S <37>Fe
<8> POS. PIONS <18> N <28>Cl
<9> NEG. PIONS <19> O <29>Ar
Enter 0-37 and press <enter>.

0
38

SELECT DOSE TYPE
<1> Secondary Particle Flux (Any rad but TOTAL)
<2> ICRP PUB 103 EFFECTIVE DOSE
<3> ICRP PUB 60 EFFECTIVE DOSE
<4> ICRU H*(10) AMBIENT DOSE EQUIVALENT
<5> WHOLE BODY ABSORBED DOSE
<6> ABSORBED DOSE IN 0.5 mm SI
<7> ABSORBED DOSE IN 0.3 mm SI
<8> NM-64 COUNTS

type is 4

SELECT COSMIC RAY MODEL
<1> GCR: ISO T515390:2004-MSU-NYMMIK
<2> GCR: BADHWAR-ONEILL 2011
<3> USE DEFAULT
<4> GCR: HP MODULATED ISO
<5> SPE: LARC FEB 1956 EVENT TOTAL
<6> SPE: LARC SEP 1989 EVENT TOTAL
<7> USER PROVIDED: GCR_MODELS\MY_MODEL.OUT

```

Σχήμα 2.21: Το γραφικό περιβάλλον του CARI-7.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση του CARI-7 σε συνδυασμό με το Σύστημα ειδοποίησης ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Radiation Alert system - SRAS) για τη δημιουργία χαρτών ιονίζουσας ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (Maps of Ionizing Radiation in the Atmosphere - MIRA), ενός καινούριου εργαλείου το οποίο έχει αναπτυχθεί από την FAA για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τον ρυθμό δόσης σε υψόμετρα άνω των 70 ft λόγω ηλιακών σωματιδίων κατά τη διάρκεια έντονων ηλιακών γεγονότων (Copeland, 2018). Το φάσμα της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας υπολογίζεται από τους δορυφόρους GOES μέσω του MIRA, ενώ το γαλαξιακό φάσμα δίνεται από το μοντέλο ISO 15390:2004. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται δοσιμετρικοί υπολογισμοί και για τις δύο συνιστώσες κοσμικής ακτινοβολίας με το CARI-7.

2.10.3 NAIRAS

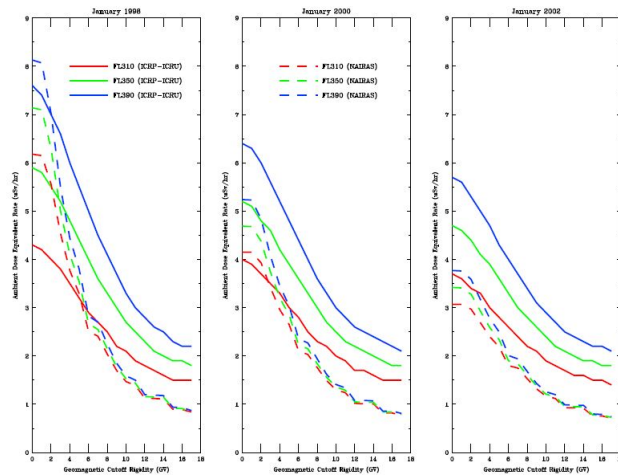
Το NAIRAS (Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation for Aviation Safety) είναι ένα μοντέλο για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης σε υψόμετρα εμπορικών αεροπορικών πτήσεων (Mertens et al., 2013, 2009, 2007). Έχει αναπτυχθεί από τη NASA σε συνεργασία με την Space Environment Technologies. Στόχος του είναι να παρέχει μία συνεχή αξιολόγηση του ατμοσφαιρικού πεδίου ιονίζουσας ακτινοβολίας, που είναι απαραίτητο για τις εμπορικές αεροπορικές εταιρείες για την παρακολούθηση και καταγραφή των επιπέδων έκθεσης του πληρώματος, ώστε οι αεροπορικές εταιρείες και η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αερομεταφορών (FAA) να μπορούν να αναπτύξουν πολιτικές και μέτρα για το μετριασμό των επιπέδων έκθεσης. Αντίστοιχα, κατά την εκδήλωση έντονων ηλιακών γεγονόσ, στόχος είναι η παροχή έγκαιρων και έγκυρων πληροφοριών στη διοίκηση των αεροπορικών εταιρειών ώστε να λαμβάνονται κρίσιμες αποφάσεις που εξισορροπούν το κόστος σε αλλαγές διαδρομής πτήσης έναντι του κινδύνου για την υγεία των επιβατών και του πληρώματος.

Χρησιμοποιούνται επίγειες παρατηρήσεις από μετρητές νετρονίων, ατμοσφαιρικές μετρήσεις από μπαλόνια (NCEP Reanalysis και NCEP Global Forecasting System) και δεδομένα από το διάστημα από τους δορυφόρους ACE και GOES. Το ατμοσφαιρικό προφίλ δίνεται από το μοντέλο NRLMSIS, ενώ οι ρυθμοί δόσης υπολογίζονται με βάση το παραμετρικό μοντέλο Atmospheric Ionizing Radiation (AIR) και τον κώδικα HZETRN. Έτσι, το μοντέλο παρέχει ρυθμούς ενεργού δόσης και ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες, διάφορα ύψη και διάφορες περιόδου ηλιακής δραστηριότητας.

Στα πλαίσια αξιολόγησης του μοντέλου, οι εκτιμώμενοι ρυθμοί δόσης με το NAIRAS συγκρίθηκαν με τα δεδομένα αναφοράς που παρέχονται από την ICRU και την ICRP. Οι μετρήσεις με το NAIRAS ήταν γενικά εντός του $\pm 50\%$ σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς και εντός του $\pm 25\%$ για κατώφλια κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας μικρότερα από 4 GV (Mertens et al., 2013). Σύμφωνα με την ICRU και την ICRP, η απόκλιση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 30\%$. Η σύγκριση αυτή δίνεται στο Σχήμα 2.22.

2.10.4 PLANETOCOSMICS - MAGNETOCOSMICS

Τα λογισμικά πακέτα PLANETOCOSMICS - MAGNETOCOSMICS έχουν αναπτυχθεί από την ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Βέρνης στην Ελβετία. Πρόκειται για Monte Carlo προσομοιώσεις της διάδοσης φορτισμένων σωματιδίων στο πλανητικό μαγνητικό πεδίο και των αδρονικών και ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον διάφορων πλανητών, όπως η Γη, ο Άρης και ο Ερμής, με χρήση του πακέτου GEANT4 (Desorgher, 2005; Desorgher et al., 2006).



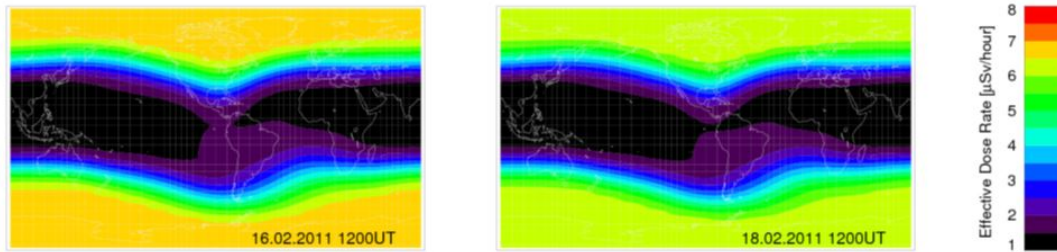
Σχήμα 2.22: Σύγκριση της $H^*(10)$ από το NAIRAS με τα δεδομένα αναφοράς ICRU συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας (Mertens et al., 2013).

Το PLANETOCOSMICS μπορεί παρέχει το ρυθμό ροής των σωματιδίων σε διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα, την ενέργεια που εναποτίθεται σε αυτά τα στρώματα λόγω των καταιγισμών, ο ρυθμός ιονισμού καθώς και εκτίμηση δόσεων ακτινοβολίας για αεροπρικές πτήσεις. Για να γίνει αυτό, η κατακόρυφη μαγνητική δυσκαμψία υπολογίζεται σε σημεία πλέγματος γεωγραφικών συντεταγμένων $5^\circ \times 5^\circ$, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το παγκόσμιο δίκτυο των μετρητών νετρονίων. Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας έξω από τη μαγνητόσφαιρα της Γης, βάσει των ηλιοκεντρικών δυναμικών, το οποίο οδηγεί τελικά στον υπολογισμό της ροής των δευτερογενών σωματιδίων. Τέλος, η ροή αυτή μετατρέπεται σε δόση με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών μετατροπής ροής-δόσης, που βασίζονται σε υπολογισμούς με το εργαλείο FLUKA.

Το μοντέλο της Βέρνης είναι μη εμπορικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για επιστημονικούς σκοπούς, ενώ απαιτείται και ειδική άδεια για τη χρήση του. Με το μοντέλο αυτό μπορούν να πραγματοποιηθούν και υπολογισμοί δόσεων ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια GLEs και μειώσεων Forbush (Σχήμα 2.23), καθώς παρέχει πλήθος ωριαίων τιμών. Παρόλ' αυτά λόγω περιορισμένου αριθμού δεδομένων και μη ανανέωσης της βάσης, δεν είναι δυνατή η προσομοίωση κάποιου γεγονότος μετά το 2012.

2.10.5 EPCARD

Το λογισμικό EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) επιτρέπει τον υπολογισμό της ενεργού δόσης και της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος



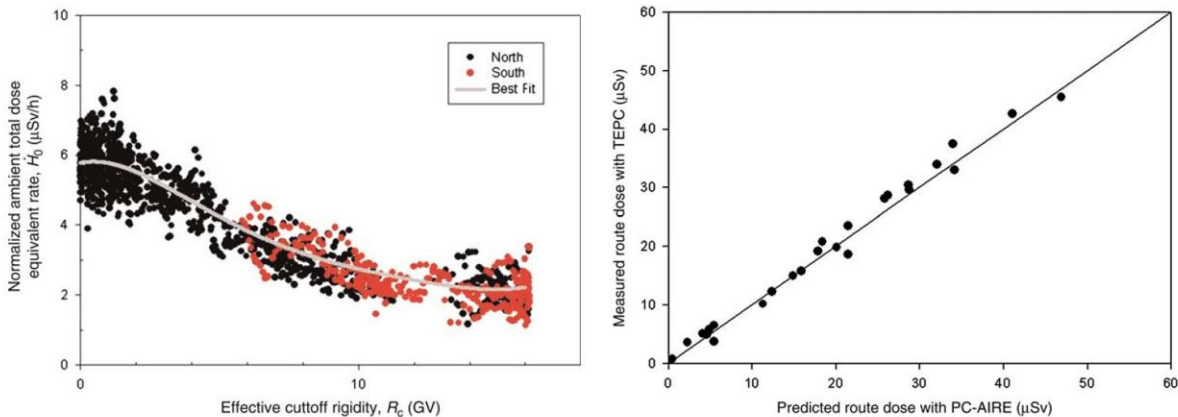
Σχήμα 2.23: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης πριν και κατά τη διάρκεια μίας μείωσης Forbush στις 18/2/2011, όπου παρατηρείται μείωση της δόσης (Πηγή: <http://kspsc22.unibe.ch/>).

λόγω κοσμικής ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε σενάριο πτήσης (Mares and Leuthold, 2007; Mares et al., 2009, 2004; Roesler et al., 2002; Schraube et al., 2002). Δημιουργήθηκε από το Γερμανικό Ινστιτούτο Helmholtz Zentrum München - GmbH με την υποστήριξη του Πανεπιστημίου Siegen της Γερμανίας και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το πρόγραμμα πληρεί τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 96/29/EURATOM και των μεταγενέστερων ευρωπαϊκών εθνικών κανονισμών, ενώ η νεότερη έκδοση έχει πάρει επίσημη έγκριση για τον καθορισμό δόσεων των πληρωμάτων αεροπορίας από τη Γερμανική Αρχή Αεροπορίας και το Εθνικό Μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Γερμανίας το 2010. Μεταξύ των χρηστών του λογισμικού EPCARD περιλαμβάνονται μεγάλες γερμανικές αεροπορικές εταιρείες, όπως η Lufthansa, η Condor Flugdienst, η LTU International καθώς κι ο διεθνής πάροχος υπηρεσιών αεροπορικών εταιρειών ASISTIM GmbH.

Το λογισμικό βασίζεται στο πακέτο προσομοιώσεων FLUKA και χρησιμοποιεί ως φάσμα πρωτογενούς ακτινοβολίας αυτό που παρέχεται από το μοντέλο της NASA. Επιτρέπει τον υπολογισμό δόσεων σε οποιαδήποτε αεροπορική διαδρομή και για οποιοδήποτε προφίλ πτήσης σε διάφορα υψόμετρα στην ατμόσφαιρα της Γης μέχρι το επίπεδο της θάλασσας, για όλες τις πιθανές φυσικές παραμέτρους της ηλιακής δραστηριότητας και της γεωμαγνητικής θωράκισης (5 – 25 km). Είναι διαθέσιμο στο κοινό μέσω της ιστοσελίδας <https://www.helmholtz-muenchen.de/en/epcard-neu/index.html>, όπου δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους πτήσης, όπως την ημερομηνία και τη χρονική διάρκεια της πτήσης, τους χρόνους απογείωσης και προσγείωσης, το υψόμετρο πτήσης καθώς και τη μετάβαση σε έως και 12 διαφορετικά υψομετρικά επίπεδα κατά τη διάρκεια της πτήσης.

2.10.6 PCAIRE

Ο κώδικας PCAIRE (Predictive Code for Radiation Exposure) έχει αναπτυχθεί στον Καναδά και αποτελεί ένα εμπειρικό μοντέλο για τον υπολογισμό του ρυθμού δόσης ακτινοβολίας μέσα



Σχήμα 2.26: Διάγραμμα του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας (αριστερά) και των μετρήσεων με TEPC έναντι των εκτιμώμενων τιμών με τον κώδικα PCAIRE (McCall et al., 2009).

μοντέλο του δυναμικού επιβράδυνσης (deceleration potential model), που έχει αναπτυχθεί από τη NASA και σε επίγειες μετρήσεις από τον μετρητή νετρονίων Climax στο Colorado.

Η αξιολόγηση (validation) του PCAIRE έχει γίνει σύμφωνα με τις μετρήσεις των μετρητών TEPC, όπου υπάρχει μία απόκλιση της τάξης του $\pm 25\%$, και όχι σύμφωνα με τις οδηγίες της ICRP (McCall et al., 2009).

2.10.7 JISCARD EX

Το πρόγραμμα JISCARD EX (Japanese Internet System for the Calculation of Aviation Route Doses) έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Ινστιτούτο Ραδιολογικών Επιστημών (NIRS) της Ιαπωνίας (Yasuda, 2008a,b). Η Ιαπωνική κυβέρνηση ζήτησε από τις εγχώριες αεροπορικές εταιρείες να ακολουθήσουν τις οδηγίες του Ιαπωνικού Συμβουλίου Ακτινοβολίας το 2006, σύμφωνα με τις οποίες οι ετήσιες δόσεις του πληρώματος αεροσκαφών πρέπει να διατηρούνται κάτω από $5 mSv$ ετησίως. Το Ινστιτούτο NIRS βοήθησε τις αεροπορικές εταιρείες να ακολουθήσουν αυτήν την οδηγία, ιδίως για τον υπολογισμό των δόσεων της αεροπορικής διαδρομής. Ως υποπροϊόν αυτής της εργασίας, αναπτύχθηκε το JISCARD EX Personal Edition, το οποίο είναι διαθέσιμο στο κοινό ύστερα από εγγραφή (www.nirs.go.jp/research/jiscard/ex/index_ex_e.html).

Το πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί με Excel VBA (Visual Basic for Applications) και εκτελείται στην πλατφόρμα του Microsoft Excel 2003/2007. Το πρωτογενές φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων δίνονται από τα τοπικά διαστρικά (LIS) φάσματα, ενώ η ηλιακή διαμόρφωση διαμορώνεται από το μοντέλο των Nymmik et al. σε συνδυασμό με τροποποιημένες εμπειρικές παραμέτρους που βασίζονται στον φορμαλισμό πεδίου δύναμης. Οι τιμές του κατωφλίου μαγνητι-

κής δυσκαμψίας R_c στα σημεία διέλευσης υπολογίζονται με τον κώδικα MAGNETOCOSMICS από την ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Βέρνης. Ο ρυθμός δόσης σε ένα σημείο στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται με βάση τους προτεινόμενους από την ICRP παράγοντες βαρύτητας ακτινοβολίας w_R με το αναλυτικό μοντέλο PARMA (PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere) (Sato et al., 2008) αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία και βασίζεται στον κώδικα προσομοιώσεων PHITS (Sato et al., 2018).

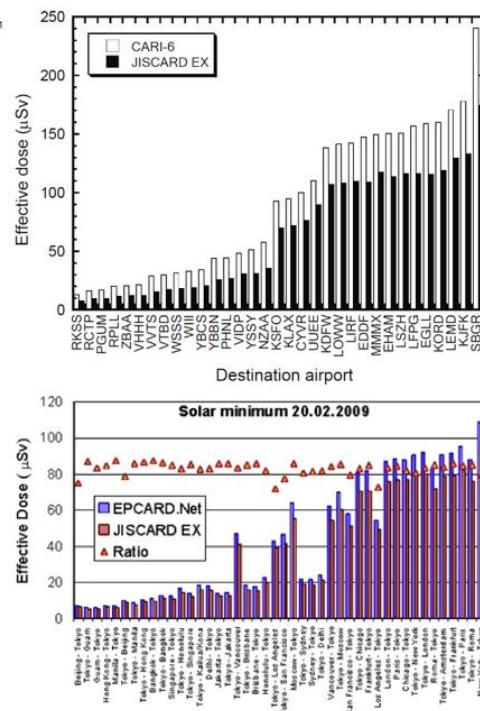
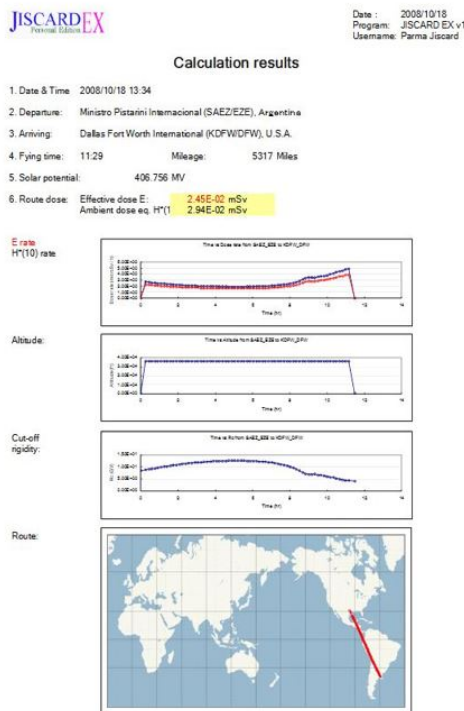
Η επέκταση του μοντέλου ακτινοβολίας PARMA/EXPACS (Excel-based Program for Calculating Atmospheric Cosmic ray Spectrum) επιτρέπει τον υπολογισμό δόσεων λόγω κοσμικής ακτινοβολίας στιγμιαία και με ακρίβεια, καθορίζοντας το χρόνο, το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος και μήκος (<https://phits.jaea.go.jp/expacs/>) (Sato, 2015). Η χρήση του συνδυαστικά με το δυναμικό ηλιακής διαμόρφωσης που εκτιμάται από τον αριθμό ηλιακών κηλίδων, παρέχει αυτόματα σε καθημερινή βάση τον παγκόσμιο χάρτη το ρυθμό δόσης σε ένα τυπικό υψόμετρο πτήσης (περίπου 11 *thinspacekm*). Το μοντέλο έχει ενσωματωθεί στο πρόγραμμα JISCARD EX.

Ο χρήστης καθορίζει τη διαδρομή πτήσης, δίνοντας την ώρα αναχώρησης, το υψόμετρο, τις γεωγραφικές συντεταγμένες και τις τοποθεσίες των αεροδρομίων απογείωσης και προσγείωσης. Η δυνατότητα αυτή δίνεται πλέον από ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας που είναι διαθέσιμο στο χρήστη (Martin Andersson et al., 2011). Το πρόγραμμα πραγματοποιεί υπολογισμό της συνολικής ενεργού δόσης και της συνολικής ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για την πτήση, ενώ δίνει στο χρήστη συγκεντρωτικά τις συνθήκες πτήσης, το σχήμα της διαδρομής πτήσης, το ηλιακό μαγνητικό δυναμικό καθώς και τα γραφήματα ρυθμού δόσης, δυναμικό υψομέτρου και μαγνητικής δυσκαμψίας σαν συνάρτηση του χρόνου (Σχήμα 2.27).

Συγκρίνοντας την ενεργό δόση όπως υπολογίζεται από το JISCARD EX και το CARI-6 για επιλεγμένες διεθνείς πτήσεις, παρατηρείται ότι οι εκτιμώμενες τιμές του JISCARD EX είναι 20% - 50% (30% κατά μέσο όρο) χαμηλότερες από εκείνες του CARI-6 (Yasuda, 2008a). Αντίστοιχα, είναι χαμηλότερες και σε σχέση με τα προγράμματα EPCARD και SIEVERT (Mares and Yasuda, 2010; Yasuda, 2008a). Κάποια παραδείγματα δίνονται στο Σχήμα 2.27).

2.10.8 SIEVERT

Το SIEVERT (Système d'Information et d'Évaluation par Vol de l'Exposition au Rayonnement Cosmique dans les Transports Aériens) αποτελεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα για την αξιολόγηση της δόσης λόγω κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας αεροπορικής πτήσης (Bottollier-Depois et al., 2003, 2002). Αναπτύχθηκε από τη Γενική Διεύθυνση Πολιτικής Αεροπορίας της Γαλλίας (DGAC) με συνεργάτες το Ινστιτούτο Προστασίας Ακτινοβολίας και



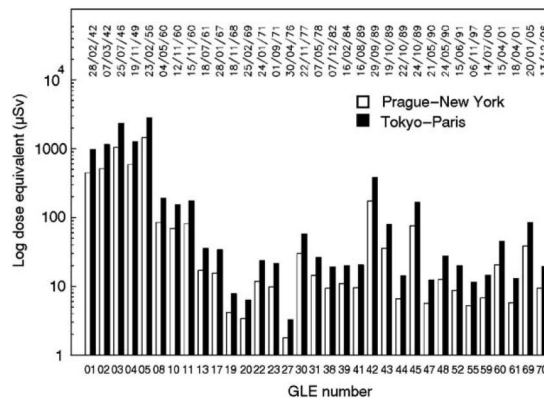
Σχήμα 2.27: Τα αποτελέσματα υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας από το πρόγραμμα JISCARD EX (Yasuda, 2008a) (αριστερά) Σύγκριση των τιμών ενεργού δόσης όπως υπολογίστηκαν με το JISCARD EX σε σχέση με το CARI-6 (πάνω) (Yasuda, 2008a) και το EPCARD (κάτω) (Mares and Yasuda, 2010).

Πυρηνικής Ασφάλειας (IRSN), το Παρατηρητήριο του Παρισιού και το Γαλλικό Ινστιτούτο Πολιτικής Έρευνας Paul-Emile Victor (IPEV). Η επαγγελματική έκδοση είναι διαθέσιμη σε έναν διακομιστή Διαδικτύου προσβάσιμο μόνο σε εταιρείες που έχουν υποβάλλει αίτηση, ενώ παράλληλα μία διαθέσιμη στο κοινό έκδοση επιτρέπει στους επιβάτες να αξιολογούν τη δόση που λαμβάνουν κατά τη διάρκεια μιας πτήσης (<https://www.sievert-system.org/>). Στη Γαλλία, το σύστημα SIEVERT χρησιμοποιείται από αεροπορικές εταιρείες, όπως για παράδειγμα η Air France, στα πλαίσια εφαρμογής του άρθρου 42 της Ευρωπαϊκής Κοινοτικής Οδηγίας EURATOM 96/29.

Ο εναέριος χώρος χωρίζεται σε κυψελίδες, με την κάθε μία να έχει 1000 πόδια ύψος και γεωγραφικό μήκος και πλάτος 10° και 2° αντίστοιχα. Αυτά σχηματίζουν συνολικά έναν χάρτη 265.000 κυψελίδων, με ένα ρυθμό ενεργού δόσης να αντιστοιχίζεται σε καθεμία από αυτές. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το χρόνο παραμονής του αεροσκάφους σε κάθε κυψελίδα και την αντίστοιχη δόση. Στη συνέχεια, οι δόσεις αυτές αθροίζονται και προκύπτει η συνολική δόση που λαμβάνεται στην πτήση αυτή. Οι δόσεις αξιολογούνται, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά

της πτήσης, από δοσιμετρικά δεδομένα επικυρωμένα από το (IRSN) για πληθώρα πτήσεων. Ο υπολογισμός της δόσης βασίζεται σε άλλα μοντέλα που αντιστοιχούν στους ρυθμούς δόσης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως το EPCARD και το CARI (παλιότερα). Πειραματικά δεδομένα από δοσιμετρα τοποθετημένο στο έδαφος και στα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται επιβεβαίωση ή / και διόρθωση της εκτιμώμενης δόσης (Bottollier-Depois et al., 2007; Clairand et al., 2009).

Λαμβάνοντας υπόψη τον 11ετή ηλιακό κύκλο, μπορούν να καταρτιστούν χάρτες πρόγνωσης, με το SIEVERT να είναι σε θέση να παρέχει προβλέψεις για έως και 18 μήνες. Σε περίπτωση ηλιακής έκλαμψης, χρησιμοποιείται το ημιεμπειρικό μοντέλο SiGLE από το Παρατηρητήριο του Παρισιού για την εκτίμηση της ισοδύναμης δόσης (Lantos and Fuller, 2004). Το SiGLE βασίζεται σε μετρήσεις από πτήσεις της Air France και της British Airways και δεδομένα από επίγειους μετρητές νετρονίων κατά τη διάρκεια του GLE42 για διάφορες τιμές του κατωφλίου μαγνητικής δυκαμψίας (Σχήμα 2.28)



Σχήμα 2.28: Ραβδόγραμμα των ισοδύναμων δόσεων που ελήφθησαν στη χειρότερη περίπτωση κατά τη διάρκεια GLE (μόνο συνεισφορά μόνο του GLE), για δύο πτήσεις, όπως υπολογίστηκαν με το μοντέλο SiGLE (Clairand et al., 2009; Lantos and Fuller, 2004).

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής, χρησιμοποιείται ένα νέο εργαλείο για την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών, το οποίο ονομάζεται DYASTIMA (Paschalis et al., 2014), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το εργαλείο αυτό, καθώς και τα αποτελέσματα από τη χρήση του σε διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες και φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας, θα αναλυθούν ενδελεχώς στα κεφάλαια του Πειραματικού Μέρους.

Πειραματικό Μέρος

3 Λογισμικό DYASTIMA

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται το εργαλείο DYASTIMA το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας και χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Η νέα του έκδοση περιέχει την επέκταση DYASTIMA-R, η οποία δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης δοσιμετρικών υπολογισμών μέσα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία των πληρωμάτων αεροσκαφών. Γίνεται εκτενής αναφορά στην παραμετροποίηση του DYASTIMA και DYASTIMA-R και δίνονται κάποια πρώτα αποτελέσματα από την εφαρμογή του. Το DYASTIMA και DYASTIMA-R αποτελεί πλέον federated product στην Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), και πιο συγκεκριμένα στο Space Situational Awareness (SSA) Space Weather Service Network (SWE) Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC), όπου η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ συμμετέχει ως expert group.

3.1 DYASTIMA

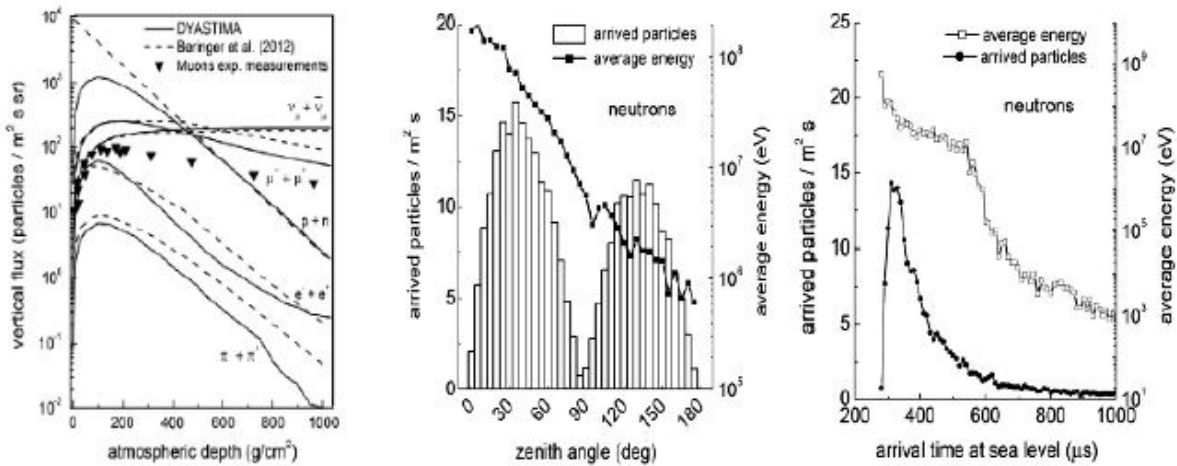
Το DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA) αποτελεί μία εφαρμογή Monte Carlo προσομοίωσης των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη. Αναπτύχθηκε από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ, και συγκεκριμένα από τον Δρ. Παύλο Πασχάλη, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του (Paschalis, 2014). Η ανάπτυξη της εφαρμογής, καθώς και τα πρώτα αποτελέσματα για την ατμόσφαιρα της Γης έχουν ήδη δημοσιευθεί (Paschalis et al., 2014). Η κεντρική ιδέα πίσω από το λογισμικό αυτό ήταν η δημιουργία μιας εύχρηστης εφαρμογής που θα επιτρέψει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ελευθερία παραμετροποίησης στο χρήστη και θα παρέχει πλήθος πληροφοριών για τον ατμοσφαιρικό καταιγισμό. Αυτό δίνει τη δυνατότητα χρήσης όχι μόνο από επιστήμονες αλλά και από άλλους φορείς ή το ευρύ κοινό, καθιστώντας το έτσι όχι απλά ένα άρτια επιστημονικό εργαλείο, αλλά και ένα εκπαιδευτικό μέσο για τη μελέτη της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας.

Η υλοποίηση του λογισμικού γίνεται σε C++. Το DYASTIMA αποτελεί αυτόνομη εφαρμογή του γνωστού πακέτου προσομοιώσεων GEANT4 (Agostinelli et al., 2003; Allison et al., 2006, 2016). Το GEANT4 κρίνεται ως το απόλυτα κατάλληλο πακέτο για την ανάπτυξη της εφαρμογής, καθώς η χρήση του έχει καθιερωθεί σε διάφορους τομείς, όπως στη Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, στην πυρηνική φυσική, στη φυσική επιταχυντών, στην ιατρική και στη διαστημική επιστήμη. Μπορεί να μοντελοποιήσει αλληλεπιδράσεις για ένα ευρύ φάσμα ενερ-

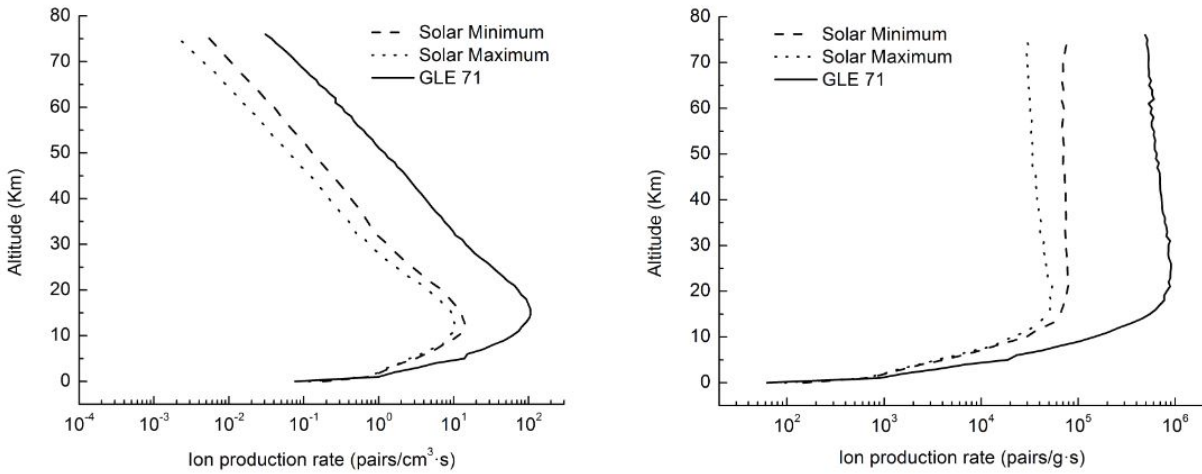
γειών με ιδιαίτερη ακρίβεια. Παρέχει υποστήριξη και ενημερώσεις, ενώ αυτή τη στιγμή έχει συνολικά πάνω από 16000 αναφορές. Το λογισμικό είναι διαθέσιμο μέσω της ιστοσελίδας <https://geant4.web.cern.ch/>.

Η πρώτη έκδοση του DYASTIMA απαιτούσε την παραμετροποίηση μέσω αρχείων κειμένου (.txt), ενώ υποστήριζε ατμόσφαιρα με σταθερή σύνθεση, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εφαρμογή του μόνο στην ατμόσφαιρα της Γης. Η έξοδος του λογισμικού ήταν με αρχεία .csv, ενώ δεν υπήρχε η δυνατότητα resume, με αποτέλεσμα αν για οποιοδήποτε λόγο η προσομοίωση σταματούσε, έπρεπε όλη η διαδικασία να ξεκινήσει από την αρχή.

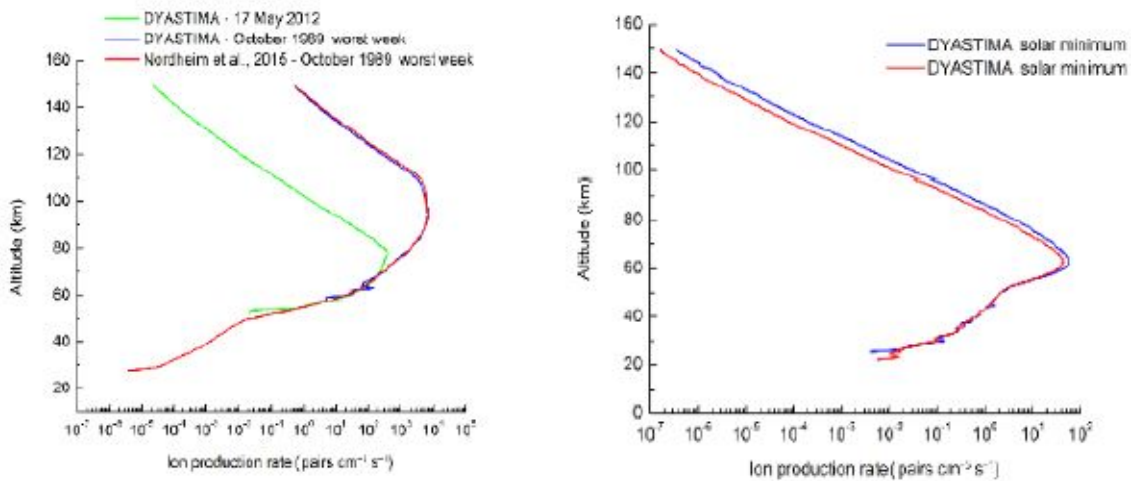
Η δεύτερη έκδοση ενισχύθηκε με ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας (Graphical User Interface - GUI), το οποίο δίνει τη δυνατότητα εύκολης παραμετροποίησης ακόμα και σε μη-έμπειρο χρήστη. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία resume. Παράλληλα, υποστήριζε ατμόσφαιρα με μεταβλητή σύνθεση. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις, η ατμόσφαιρα του εκάστοτε πλανήτη έχει σταθερή σύνθεση, το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμο καθώς επιτρέπει την ύπαρξη νεφών ή υγρασίας στα χαμηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Η έκδοση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ήδη με επιτυχία για τη μελέτη των δευτερογενών καταγισμών στην ατμόσφαιρα της Γης για διάφορες περιόδους ηλιακής δραστηριότητας (Dorman et al., 2015; Paschalis et al., 2014), καθώς και για τον υπολογισμό του ιονισμού της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης (Plainaki et al., 2016). Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα από τις δουλειές αυτές παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα (Σχήματα 3.1, 3.2 και 3.3).



Σχήμα 3.1: Υπολογισμοί με το DYASTIMA για τη γήινη ατμόσφαιρα (Paschalis et al., 2014).



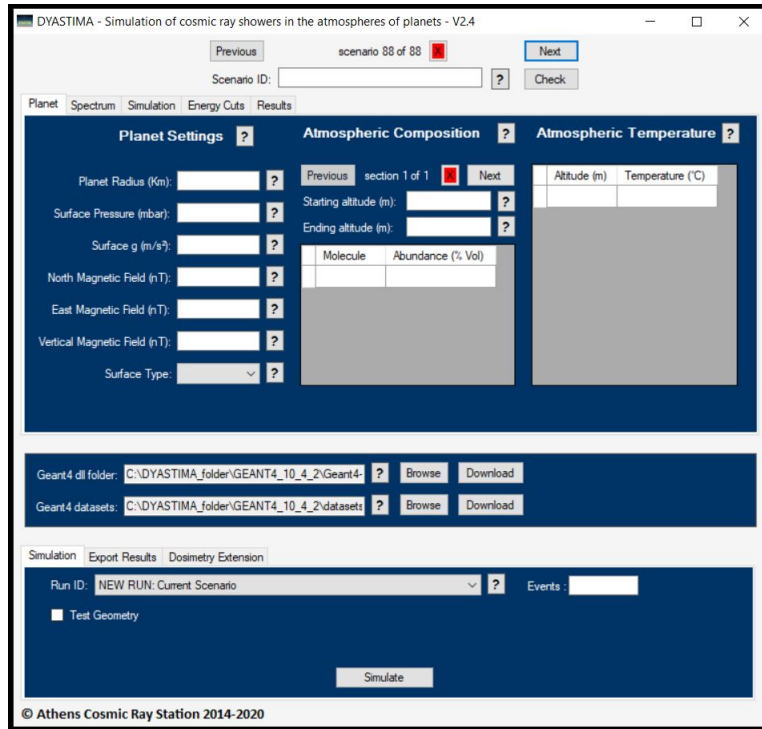
Σχήμα 3.2: Ο ιονισμός της ατμόσφαιρας όπως υπολογίστηκε από το DYASTIMA για το GLE71 (Dorman et al., 2015).



Σχήμα 3.3: Ο ιονισμός της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης όπως υπολογίστηκε από το DYASTIMA (Plainaki et al., 2016).

Η τρέχουσα έκδοση του DYASTIMA περιλαμβάνει τη λειτουργικότητα της προηγούμενης έκδοσης με καλύτερη οπτικοποίηση και πολλές βελτιώσεις, που αφορούν όχι μόνο τη γραφική διεπαφή του χρήστη αλλά και τον ίδιο τον κώδικα, καθώς και την ενσωμάτωση μίας βάσης δεδομένων SQLite. Υποστηρίζει εκτεταμένη παραμετροποίηση, καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δώσει τις κύριες παραμέτρους του πλανήτη, το ατμοσφαιρικό προφίλ και το πρωτογενές φάσμα κοσμικών σωματιδίων μέσα από μία σειρά διαθέσιμων μοντέλων, όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτό δίνει έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης της ατμόσφαιρας οποιουδήποτε

πλανήτη και οποιοδήποτε φάσματος εισόδου. Πέρα από αυτά, πραγματική καινοτομία της έκδοσης αυτής αποτελεί η ενσωμάτωση του νέου στοιχείου DYASTIMA-R, το οποίο επιτρέπει την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών μέσα στην ατμόσφαιρα (βλέπε επόμενη ενότητα). Η γραφική διεπαφή χρήστη του DYASTIMA παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI) του DYASTIMA (Paschalis and Tezari, 2019).

Η ανάπτυξη του DYASTIMA έχει γίνει με Microsoft Visual Studio, οπότε για τη χρήση του απαιτείται ένα λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows και η βιβλιοθήκη .NET. Επίσης, απαιτούνται η βιβλιοθήκη GEANT4 (GEANT4 library) και τα σύνολα δεδομένων GEANT4 (GEANT4 datasets). Το DYASTIMA κατεβάζει αυτόματα όλα τα απαιτούμενα αρχεία του GEANT4 και ορίζει τις απαραίτητες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Η τρέχουσα έκδοση του DYASTIMA χρησιμοποιεί την έκδοση GEANT4 10.4 και τα αντίστοιχα datasets. Για την χρήση του λογισμικού DYASTIMA, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μέσου υπολογιστή. Συνήθως, τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης απαιτούν περίπου 100 MB χώρου στο δίσκο, αυτό όμως εξαρτάται έντονα από την επιθυμητή έξοδο που επιλέγεται. Με τον τρόπο αυτό, ο απαιτούμενος χώρος στο δίσκο μπορεί να αυξηθεί σε περίπτωση πολλών στρωμάτων καταγραφής ή/και στην περίπτωση καταγραφής της οριζόντιας θέσης των σωματιδίων, καθώς και στην περίπτωση υπολογισμών δόσεων ακτινοβολίας.

Από το Δεκέμβριο του 2019, μετά από μία εκτεταμένη διαδικασία αξιολόγησης (validation) που θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο, το εργαλείο DYASTIMA αποτελεί federated product στην Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA), και πιο συγκεκριμένα στο Space Situational Awareness (SSA) Space Weather Service Network (SWE) Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC), όπου η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ συμμετέχει ως expert group. Στόχος του Κέντρου Διαστημικής Ακτινοβολίας (R-ESC) είναι να παρέχει και να αναπτύσσει τις λειτουργίες, τις δυνατότητες και την τεχνογνωσία στον τομέα της Διαστημικής Ακτινοβολίας που απαιτούνται στο δίκτυο ESA SSA SWE ώστε να επιτευχθεί η επίδειξη και η αξιολόγηση των επιρροών του Διαστημικού Καιρού, καθώς και η ενημέρωση και υποστήριξη των τελικών χρηστών μέσω της παροχής ακριβών, αξιόπιστων και έγκαιρων προϊόντων και υπηρεσιών, προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις τους. Το R-ESC διασφαλίζει ότι η παρακολούθηση, η μοντελοποίηση και η πρόβλεψη της διαστημικής ακτινοβολίας (περιβάλλον πλάσμα, ηλιακά ενεργητικά σωματίδια, ζώνες ακτινοβολίας, γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες), των μικροσωματιδίων (από μετεωροειδή και διαστημικά σκουπίδια), καθώς και όλων των φαινομένων με επιπτώσεις στην τεχνολογία και τα βιολογικά συστήματα, καλύπτονται πλήρως όσον αφορά το διαστημικό περιβάλλον κοντά στη Γη. Η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών συμμετέχει ενεργά στο κέντρο αυτό από το 2014, παρέχοντας πλέον τρεις εγκεκριμένες υπηρεσίες (GLE Alert ++ service, Multi-station neutron monitor data και DYASTIMA). Η ιστοσελίδα του DYASTIMA στο portal της ESA παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

Προκειμένου να αποκτήσει κανείς πρόσβαση στο λογισμικό DYASTIMA, είναι απαραίτητο είτε να εγγραφεί ως χρήστης στο ESA SWE ESC Space Radiation (<http://swe.ssa.esa.int/space-radiation>), ακολουθώντας τη διαδικασία Single Sign-On (SSO). Σε αυτή την ειδικά διαμορφωμένη ιστοσελίδα, είναι διαθέσιμες οι βασικές πληροφορίες για το DYASTIMA, οδηγίες για τη χρήση του καθώς και μία βάση δεδομένων με αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί ήδη. Ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα να ζητήσει την εκτέλεση κάποιου συγκεκριμένου σεναρίου, παρέχοντας κάποιες βασικές παραμέτρους εισόδου. Εναλλακτικά, ο χρήστης δεν θέλει πρόσβαση παρά μόνο στο λογισμικό, μπορεί να επισκεφθεί την ιστοσελίδα του A.Ne.Mo.S. (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>). Εκεί βρίσκονται διαθέσιμα δωρεάν τόσο το λογισμικό όσο και το Εγχειρίδιο χρήστη (Paschalis and Tezari, 2019), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6.

3.2 DYASTIMA-R

Όπως είπαμε ήδη, το DYASTIMA αποτελεί ένα εργαλείο μελέτης των καταιγισμών μέσα στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη, παρέχοντας όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες στο χρήστη

THE EUROPEAN SPACE AGENCY

Welcome to the SSA Space Weather Service Network

Please note that all SSA-SWE Services are under review/construction

esa

CURRENT SPACE WEATHER

Expert Service Centres / ESC Space Radiation / dyastima-federated /

SPACE WEATHER AT ESA

SERVICE DOMAINS

EXPERT SERVICE CENTRES

- ESC Solar Weather
- ESC Heliospheric Weather
- ESC Space Radiation
- ESC Ionospheric Weather
- ESC Geomagnetic Conditions

OTHER RESOURCES

CONTACT

REQUEST FOR REGISTRATION

Federated products from the Cosmic Ray Group (NKUA)

A.Ne.Ma.S

DYASTIMA

Home | FAQ | Database | Request | Publications | Acknowledgments

Dynamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application

Dynamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA) is a standalone software application for the simulation of the cascades produced in the atmosphere of a planet due to cosmic rays propagation. It is implemented in Geant4 by the Athens Cosmic Ray Group. The input, provided by the user, can be easily parameterized via a very user friendly Graphical User Interface (GUI). The output of DYASTIMA provides all the necessary information about the cascade, such as number, direction, arrival time, energy, and energy deposit of the secondary particles at different tracking layers. With DYASTIMA-R extension, Monte Carlo simulations can be performed on the ICRU sphere (International Commission on Radiation Units and Measurements) or on a human phantom in order to perform radiation dose calculations.

Figure: Cosmic ray cascades in the atmosphere

In this web page the user can find all the necessary information about DYASTIMA, distributed in the following sections:

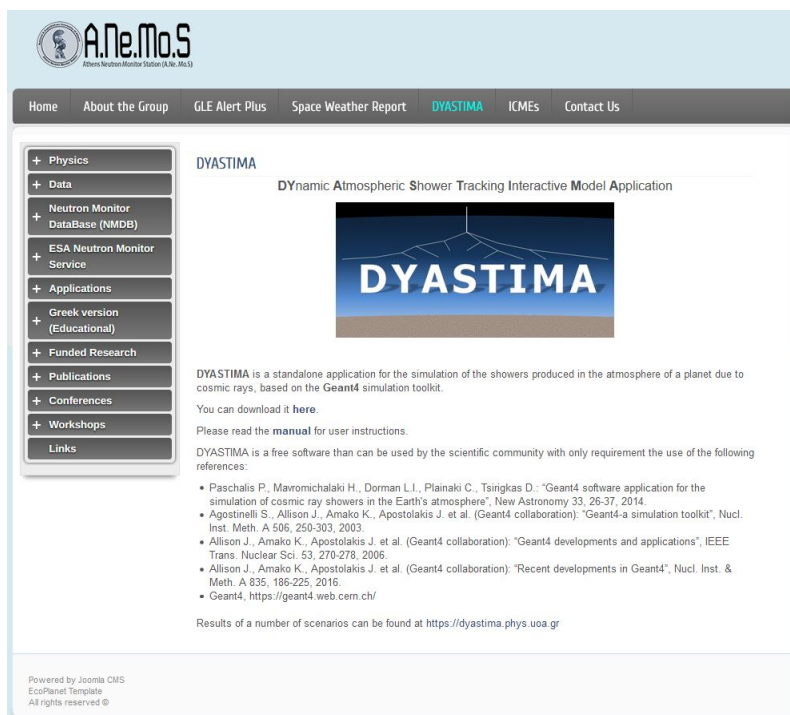
- "FAQ": Provides information about the most common issues. The link to DYASTIMA software is also available there.
- "Database": Provides results from previous runs of specific simulation scenarios.
- "Request": A form where the user is able to request a specific scenario run, not available in the database.
- "Publications": Provides a list of relevant publications as well as a link to the software user manual.
- "Acknowledgments": Acknowledgments and rules regarding the use of data.

SWE Portal [3.2], Copyright 2000 - 2021 © European Space Agency. All rights reserved.

Σχήμα 3.5: Η σελίδα του DYASTIMA στην ιστοσελίδα της ESA, όπου είναι διαθέσιμο ως federated product (<https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>).

για το καταιγισμό αυτό. Η μελέτη της διάδοση της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για θεωρητικούς σκοπούς όσο και για πρακτικές εφαρμογές. Η κυριότερη από τις εφαρμογές αυτές αποτελεί η πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία των πληρωμάτων αεροσκαφών ή/και διαστημικών σκαφών. Για το λόγο αυτό, το DYASTIMA ενισχύθηκε με ένα νέο στοιχείο, το DYASTIMA-R, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό διαφόρων ραδιοβιολογικών ποσοτήτων μέσα στην ατμόσφαιρα. Η λειτουργία του DYASTIMA / DYASTIMA-R παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.

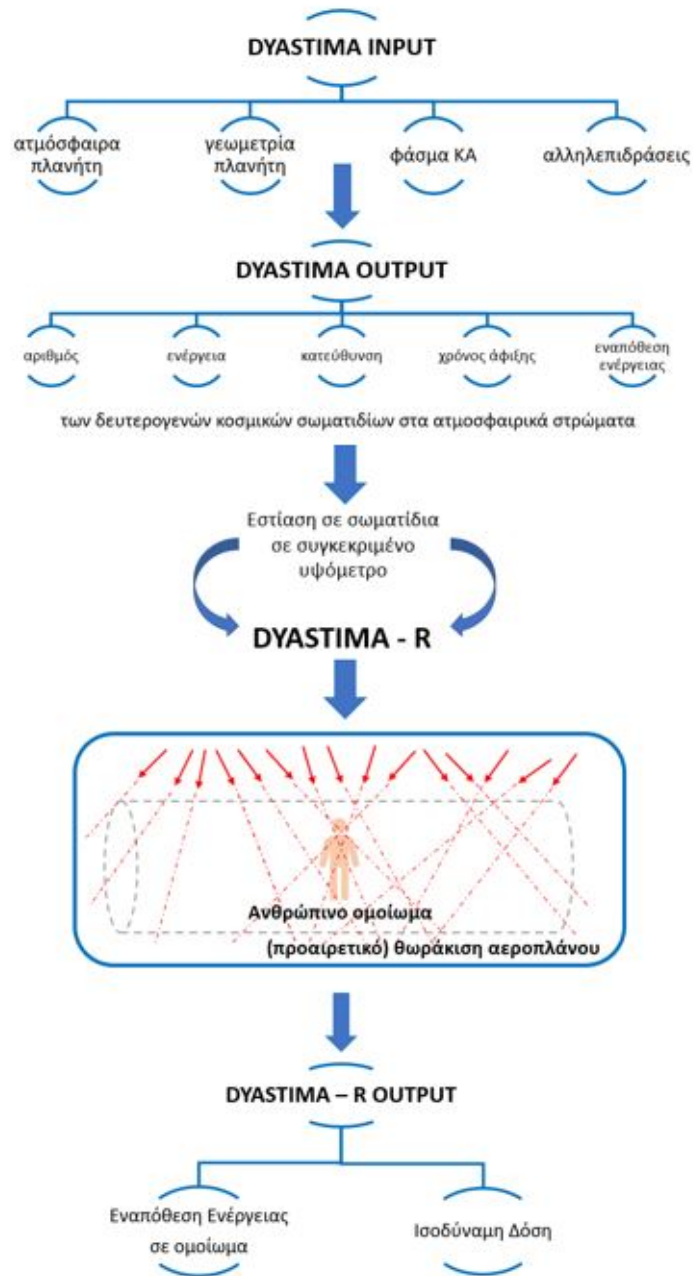
Το DYASTIMA-R χρησιμοποιεί την έξοδο που παρέχεται από το DYASTIMA, και εκτελεί μίας δεύτερη Monte Carlo προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων για τη διάδοση της πρωτογενούς και δευτερογενούς ακτινοβολίας μέσω της ύλης. Έτσι, υπολογίζεται η ενέργεια που εναποτίθεται στο ανθρώπινο σώμα με χρήση ενός κυλινδρικού ομοιώματος (phantom) ή σε ένα ομοίωμα αναφοράς (reference phantom). Το ομοίωμα αυτό μπορεί να τοποθετηθεί στα ατμοσφαιρικά υψόμετρα που ενδιαφέρουν το χρήστη, όπου και υπολογίζεται ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης dD/dt και ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης dH/dt . Πιο συγκεκριμένα, το dD/dt υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέση ενέργεια dE που αποτίθεται σε έναν όγκο μάζας dm σε κάθε βήμα κατά μήκος μιας τροχιάς σωματιδίων ενώ το dH/dt υπολογίζεται χρησιμοποιώντας



Σχήμα 3.6: Η σελίδα του DYASTIMA στην επίσημη ιστοσελίδα του A.Ne.Mo.S., όπου είναι διαθέσιμο το λογισμικό και το εγχειρίδιο χρήσης του (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>).

το dD/dt εξισωμένο πάνω στο ομοίωμα και πολλαπλασιάζοντας με τον παράγοντα ποιότητας της ακτινοβολίας w_R που σχετίζεται με τη βιολογική αποτελεσματικότητα της ακτινοβολίας. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για τον w_R είναι σύμφωνα με την ICRP (ICRP, 2007). Δεδομένου ότι το πεδίο έκθεσης σε ακτινοβολία αποτελείται από διαφορετικά σωματίδια και ενέργειες, η συνολικές τιμές της απορροφούμενης και της ισοδύναμης δόσης υπολογίζονται ως το άθροισμα των μεμονωμένων απορροφούμενων δόσεων και ισοδύναμων δόσεων αντίστοιχα. Το DYASTIMA-R δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των dD/dt και dH/dt τόσο αθροιστικά όσο και ξεχωριστά για κάθε είδος σωματιδίου. Στα μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνεται η ενσωμάτωση της γεωμετρίας και των υλικών θωράκισης των αεροσκαφών.

Έτσι, καθώς το DYASTIMA-R υπολογίζει τη δόση και την ισοδύναμη δόση διάφορων τύπων σωματιδίων σε διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες, διαφορετικά ατμοσφαιρικά επίπεδα και λαμβάνει υπόψη τις φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας, επιτρέπει τη μελέτη ποικίλων σεναρίων αεροπορικών πτήσεων. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα εύχρηστη διεπαφή χρήστη, μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο ερευνητικό και εκπαιδευτικό εργαλείο για τα πληρώματα αεροσκαφών (πιλότοι, αεροσυνοδούς), τους επιβάτες (συχνές ταξιδιώτες, έγκυες



Σχήμα 3.7: Λογικό διάγραμμα της λειτουργίας του λογισμικού DYASTIMA και DYASTIMA-R (Paschalis and Tezari, 2019).

γυναίκες, παιδιά), τις αεροπορικές εταιρείες και τους ταξιδιωτικούς πράκτορες, τους κατασκευαστές αεροσκαφών, καθώς και τους νομοθέτες και την Πολιτική Αεροπορία.

3.3 Παράμετροι Εισόδου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το DYASTIMA βασίζεται σε ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα ακόμα και από μη έμπειρους χρήστες. Η προσομοίωση με το εργαλείο DYASTIMA απαιτεί παραμετροποίηση μέσω του περιβάλλοντος αυτού από το χρήστη (Paschalis and Tezari, 2019). Οι κυριότερες παράμετροι εισόδου (input) είναι οι εξής:

- τα γενικά χαρακτηριστικά του πλανήτη,
- η δομή της ατμόσφαιρας,
- το φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας,
- οι ρυθμίσεις σχετικά με το GEANT4 και τη γεωμετρία της προσομοίωσης,
- ο καθορισμός των υψομέτρων ανίχνευσης των σωματιδίων,
- τα προαιρετικά κατώφλια ενέργειας για την παραγωγή, προσομοίωση και ανίχνευση των σωματιδίων, και
- οι ρυθμίσεις που αφορούν την πραγματοποίηση δοσιμετρικών υπολογισμών.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των παραμέτρων εισόδου, των κυριότερων μοντέλων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των παραμέτρων αυτών, ενώ δίνονται και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της Γης

Για την πραγματοποίηση της δοσιμετρίας είναι απαραίτητος ο καθορισμός των γενικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη πλανήτη. Αυτά αφορούν την ακτίνα του πλανήτη, την επιφανειακή πίεση, την επιτάχυνση της βαρύτητας, τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (B_X , B_Y , B_Z), καθώς και το είδος της επιφάνειας του πλανήτη.

Ενδεικτικά, για τη Γη χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

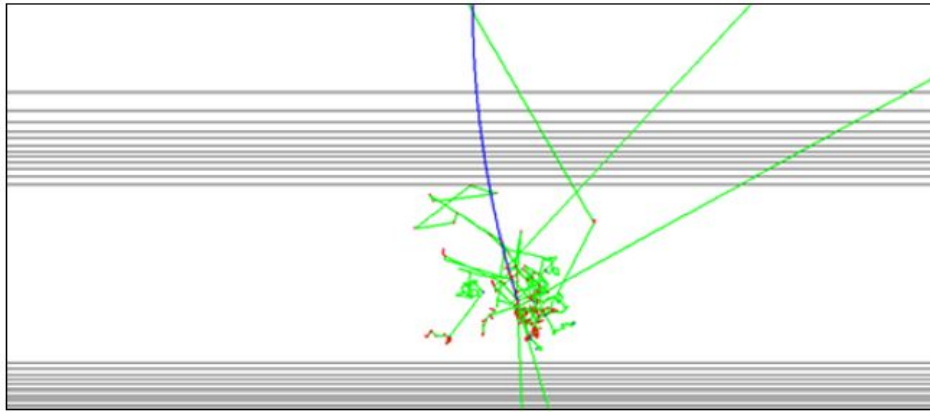
- μέση ακτίνα της Γης: $R_E = 6371 \text{ km}$,
- μέση επιφανειακή πίεση: $P = 1013.25 \text{ mbar}$, και
- επιτάχυνση της βαρύτητας: $g = 9.80665 \text{ m/sec}^2$

Περισσότερες πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά της Γης μπορούν να βρεθούν και στην ακόλουθη ιστοσελίδα <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.

Μία από τις παραμέτρους που συνεισφέρουν ιδιαίτερα την ακρίβεια των προσομοιώσεων είναι το μαγνητικό πεδίο, καθώς σε αυτό οφείλεται η απόκλιση της τροχιάς των φορτισμένων σωματιδίων (Σχήμα 3.8). Έτσι, όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχει τη μορφή διπόλου και περιγράφεται για ένα δεδομένο ύψος h από τη σχέση:

$$|\vec{B}_h| = |\vec{B}_0| \frac{R_E^3}{(R_E + h)^3} \quad (3.1)$$

όπου \vec{B}_0 η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης και \vec{B}_h η ένταση σε ύψος h . Η εξασθένιση του γεωμαγνητικού πεδίου με το ύψος είναι σχετικά μικρή, με τη διαφορά ανάμεσα στην επιφάνεια της Γης και το όριο της ατμόσφαιρας να είναι περίπου 5%. Στην προσομείωση χρησιμοποιούμε τις B_X , B_Y , και B_Z συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 3.8: Αναπαράσταση ενός πρωτονίου ενέργειας 1 GeV (μπλε γραμμή), το οποίο εισέρχεται κάθετα στη γήινη ατμόσφαιρα. Παρατηρείται η απόκλιση του ίχνους του εισερχόμενου πρωτονίου, λόγω του μαγνητικού πεδίου (Paschalis, 2014).

Το B_X (North Magnetic Field component) αφορά τη συνιστώσα Βορρά-Νότου (θετικές τιμές προς το Βορρά), το B_Y (East Magnetic Field component) αφορά τη ανατολική-δυτική συνιστώσα (θετικές τιμές προς την Ανατολή) και το B_Z (Vertical Magnetic Field component) είναι η κατακόρυφη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου (θετικές τιμές προς τα κάτω). Οι τιμές για τα B_X , B_Y , και B_Z στην επιφάνεια της Γης, είναι γνωστές για οποιαδήποτε χρονική στιγμή (από το 1590 έως το 2024) και οποιαδήποτε τοποθεσία πάνω στη Γη, με τη χρήση του μοντέλου IGRF, από την ιστοσελίδα του NOAA, με τη χρήση των Magnetic Field Calculators (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>).

Τέλος, μία λιγότερο σημαντική παράμετρος της προσομοίωσης, είναι η προσομείωση των σω-

ματιδίων που ανακλώνται από την επιφάνεια του πλανήτη. Το DYASTIMA δίνει τρεις επιλογές σχετικά με το είδος της επιφάνειας του πλανήτη κάτω από την ατμόσφαιρα: καμία (NONE) ή βάζει προαιρετικά ένα στρώμα κάτω από την ατμόσφαιρα, το οποίο αντιπροσωπεύει το έδαφος (GROUND) και τη θάλασσα (SEA). Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, έχει χρησιμοποιηθεί η επιλογή (NONE).

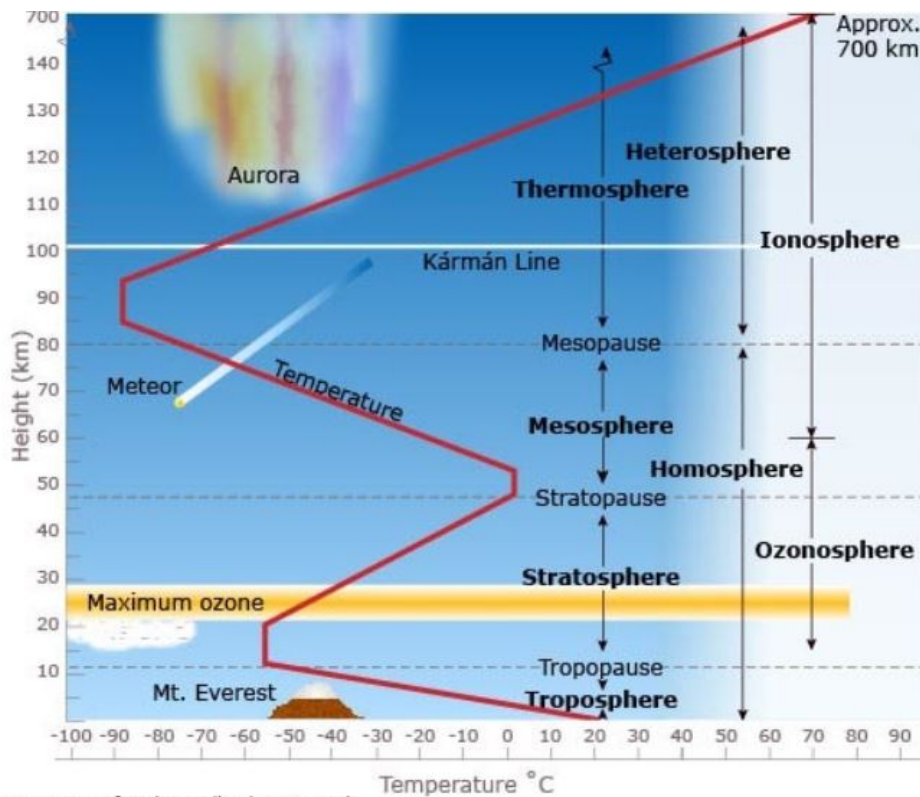
3.3.2 Γήινη Ατμόσφαιρα

Η Γη περιβάλλεται από ατμόσφαιρα, η οποία χωρίζεται σε πέντε κύρια στρώματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9. Ξεκινώντας από την επιφάνεια της Γης αυτά είναι:

- η **Τροπόσφαιρα**: Πρόκειται για το χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας μας, το οποίο εκτείνεται σε ύψος περίπου 10 km από τη στάθμη της θάλασσας. Σε αυτό το στρώμα εμφανίζεται η πληθώρα των καιρικών φαινομένων, ενώ εδώ βρίσκονται και τα περισσότερα σύννεφα, κυρίως επειδή το 99% των υδρατμών στην ατμόσφαιρα βρίσκεται στην τροπόσφαιρα. Η πίεση του αέρα και η θερμοκρασία μειώνονται με την αύξηση του ύψους. Σχεδόν το 80% της μάζας της ατμόσφαιρας βρίσκεται εδώ. Το ύψος της Τροπόσφαιρας είναι χαμηλότερο στους πόλους σε σχέση με τον Ισημερινό.
- η **Στρατόσφαιρα**: Αποτελεί το επόμενο ατμοσφαιρικό στρώμα και εκτείνεται από την Τροπόσφαιρα μέχρι το υψόμετρο των 50 km. Το όζον κυριαρχεί με τη στιβάδα του όζοντος να βρίσκεται εδώ στα 20 km. Το όζον απορροφά την υψηλής ενέργειας UV ακτινοβολία από τον ήλιο και τη μετατρέπει σε θερμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία να αυξάνεται με το ύψος, παρουσιάζοντας μία θερμοκρασιακή αναστροφή σε σχέση με τη Τροπόσφαιρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τον πολύ ξηρό αέρα, ο οποίος είναι περίπου χίλιες φορές πιο λεπτός απ' ό,τι στο επίπεδο της θάλασσας, κάνει τη στρατόσφαιρα ελάχιστα τυρβώδη. Για το λόγο αυτό, τα εμπορικά επιβατικά αεροσκάφη πετούν στην κατώτερη Στρατόσφαιρα.
- η **Μεσόσφαιρα**: Εκτείνεται πέρα από τη Στρατόσφαιρα και μέχρι τα 85 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Αντίθετα με τη Στρατόσφαιρα, η θερμοκρασία μειώνεται με το υψόμετρο, οπότε παρατηρείται μία δεύτερη θερμοκρασιακή αναστροφή. Ο αέρας είναι πολύ λεπτός, με την πίεση στο κατώτερο στρώμα της Μεσόσφαιρας να είναι λιγότερη από το 1% της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Στο στρώμα αυτό, 'καίγονται' οι μετεωρίτες.
- η **Θερμόσφαιρα**: Εκτείνεται μεταξύ των 85 km και των 500 km ή 1000 km. Όπως λέει και το όνομα της, είναι ιδιαίτερα θερμή με τη θερμοκρασία να αυξάνεται έως και 1500 °C.

Αν και αποτελεί μέρος της ατμόσφαιρας της Γης, η πυκνότητά της είναι ιδιαίτερα χαμηλή με αποτέλεσμα να θεωρείται ένα με το διάστημα. Στο στρώμα αυτό εμφανίζεται το φαινόμενο του Σέλαος (Aurora Borealis και Aurora Australis), ενώ εδώ βρίσκεται και ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός.

- η **Εξώσφαιρα**: Πρόκειται για το υψηλότερο στρώμα, όπου πρακτικά η ατμόσφαιρα συγχωνεύεται με το διαστημικό χώρο. Αποτελείται από πολύ διασκορπισμένα σωματίδια υδρογόνου και ηλίου. Δεν υπάρχει σαφές ανώτερο όριο, με την κορυφή της εξώσφαιρας να τοποθετείται μεταξύ των 100000 km έως τα 190000 km πάνω από την επιφάνεια της Γης.



© Copyright. 2013. University of Waikato. All rights reserved.

Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της κατακόρυφης δομής της ατμόσφαιρας (Πηγή: www.sciencelearn.org.nz).

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η **Ιονόσφαιρα**, η οποία δεν αποτελεί ευδιάκριτο ατμοσφαιρικό στρώμα. Εκτείνεται μέσα στη Μεσόσφαιρα και τη Θερμόσφαιρα, όπου η υψηλής ενέργειας ηλιακή ακτινοβολία έχει ιονίσει τα ατμοσφαιρικά μόρια και άτομα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ιόντων.

Είδος	Αφθονία (%)	Υψόμετρο (m)	Θερμοκρασία (°C)
		0	15
Άζωτο (N_2)	78	11019	-56.5
Οξυγόνο (O_2)	21	20063	-56.5
Αργό (Ar)	0.93	32162	-44.5
		47350	-2.5
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	0.04	51413	-2.5
Ιχνοστοιχεία, υδρατμοί	0.03	71802	-58.5
		86000	-86.28

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση (αριστερά) και ατμοσφαιρικό προφίλ (δεξιά) της γήινης ατμόσφαιρας.

Σε κάθε ένα από τα στρώματα αυτά, καθώς αυξάνεται το υψόμετρο, η ατμόσφαιρα γίνεται όλο και πιο αραιή, μέχρι τελικά να γίνεται ένα με το διαστημικό χώρο. Δεν υπάρχει κάποιο σαφώς διαχωρισμένο όριο μεταξύ ατμόσφαιρας και διαστήματος, παρά μία νοητή γραμμή σε ύψος 100 km από την επιφάνεια της θάλασσας, η οποία ονομάζεται γραμμή Κάρμάν, και βρίσκεται στην κατώτερη Θερμόσφαιρα (Sanz Fernández de Córdoba, 2004). Παρόλα αυτά, τα τρία πρώτα ατμοσφαιρικά στρώματα (Τροπόσφαιρα, Στρατόσφαιρα, Θερμόσφαιρα) εκτείνονται περίπου μέχρι τα 85 km , και περιέχουν πρακτικά όλη τη μάζα της ατμόσφαιρας ($\sim 99.9\%$). Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της μελέτης αυτής, θεωρούμε τα 85 km ως την κορυφή της ατμόσφαιρας.

Η σύσταση της ατμόσφαιρας δίνεται στο αριστερό τμήμα του Πίνακα 3.1. Καθώς η συγκέντρωση του CO_2 , των διάφορων ιχνοστοιχείων (He , Ne , Kr , H_2 , CH_4) και των υδρατμών είναι αθροιστικά μικρότερη του 1%, μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέα. Έτσι, στα πλαίσια των προσομοιώσεων που εκτελούνται στην εργασία αυτή, έχει χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη σύσταση: N_2 (78%), O_2 (21%) και Ar (1%).

Η δομή της ατμόσφαιρας δίνεται από το ατμοσφαιρικό προφίλ, το οποίο δίνει τη θερμοκρασία ως συνάρτηση του ύψους. Αν θεωρήσουμε ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας βρίσκεται σε υδροστατική ισορροπία και έχει τη συμπεριφορά ενός ιδανικού αερίου σε κάθε σημείο του, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την καταστατική εξίσωση των αερίων, προκειμένου να υπολογίσουμε την πυκνότητα του, ρ . Έτσι έχουμε:

$$pV = NkT \Rightarrow \rho = \frac{p}{kT} \quad (3.2)$$

όπου p η ατμοσφαιρική πίεση, T η θερμοκρασία και k η σταθερά Boltzmann. Στη συνέχεια, μέσω της υδροστατικής εξίσωσης, βλέπουμε πως η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης dp

ανάλογη με τη μεταβολή του ύψους dh από την επιφάνεια της Γης:

$$dp = -\rho g dh \quad (3.3)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Αντικαθιστώντας τη σχέση 3.2 στη σχέση 3.3 προκύπτει:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{kT} h \quad (3.4)$$

Ολοκληρώνουμε την παραπάνω σχέση, θέτουμε την πίεση στην επιφάνεια της Γης p_0 ως οριακή συνθήκη:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp'}{p'} = - \int_0^h \frac{g}{kT} dh' \Rightarrow \ln \frac{p}{p_0} = -\frac{g h}{kT} \quad (3.5)$$

Καταλήγουμε έτσι σε μία κατανομή Boltzmann, η οποία δίνει τη σχέση ανάμεσα στην ατμοσφαιρική πίεση και το ύψος:

$$p = p_0 e^{-gh/kT} \quad (3.6)$$

Προκειμένου να είναι εφικτή η παραπάνω ολοκλήρωση, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε πως συνδέεται η θερμοκρασία με το ύψος. Το προφίλ θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά μέσω ραδιοβολήσεων στην ατμόσφαιρα για συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική στιγμή. Παρόλα αυτά, έχουν διαμορφωθεί πολλά μοντέλα της ατμοσφαιρικής δομής, εξαιτίας της τεράστιας σημασίας της ατμόσφαιρας για πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα εξής:

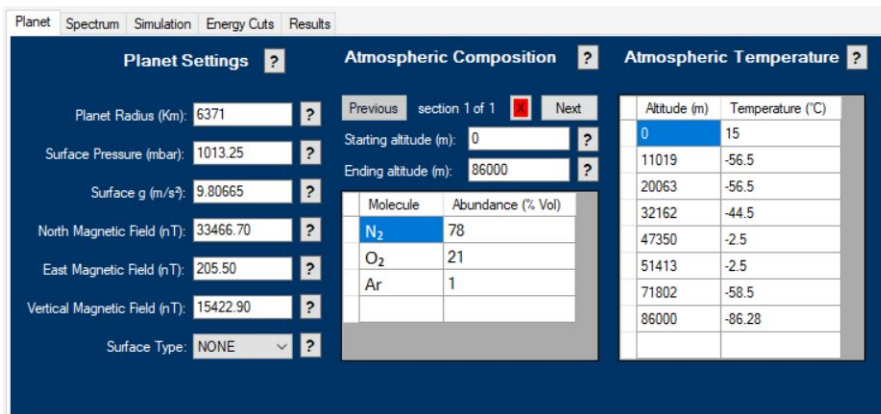
- **NRLMSISE-00**: πρόκειται για ένα εμπειρικό, παγκόσμιο μοντέλο αναφοράς της ατμόσφαιρας της Γης από το έδαφος έως το διάστημα που αναπτύχθηκε από το Naval Research Lab της Αμερικής (Picone et al., 2002). Βασίζεται σε in-situ δεδομένα από πλήθος δορυφόρων και πυραύλων, και αποτελείται από παραμετρικές αναλυτικές προσεγγίσεις της κατακόρυφης δομής της ατμόσφαιρας ως συνάρτηση της θέσης, του χρόνου, της ηλιακής δραστηριότητας και της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Παρέχει εκτίμηση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος, τις πυκνότητες των κύριων συστατικών της ατμόσφαιρας (N_2 , O , O_2 , Ar , He , H) σε θερμική ισορροπία, καθώς και την πυκνότητα του 'ανώμαλου οξυγόνου' που κυριαρχεί σε μεγάλα υψόμετρα και δεν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία. Για την ανώτερη ατμόσφαιρα γίνεται χρήση των προφίλ θερμοκρασίας Bates-Walker ως συνάρτηση του γεωδυναμικού ύψους και ενός αντίστροφου πολυωνύμου σε συνάρτηση με το γεωδυναμικό ύψος για την κάτω θερμόσφαιρα (spenvis.oma.be). Το λογισμικό είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>.

- **US Standard Atmosphere:** αποτελεί ένα σύνολο μεμονωμένων προφίλ που αντιπροσωπεύουν την ιδανική ατμόσφαιρα σταθερής κατάστασης για μέτρια ηλιακή δραστηριότητα (Office, 1976). Οι παράμετροι περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την πίεση, την πυκνότητα, το γεωδυναμικό ύψος, την πυκνότητα, τη μέση ταχύτητα σωματιδίων, τη μέση συχνότητα σύγκρουσης, τη μέση ελεύθερη διαδρομή, το μέσο μοριακό βάρος, την ταχύτητα του ήχου, το δυναμικό ιξώδες, το κινηματικό ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα. Η ανάλυση υψομέτρου κυμαίνεται από 0.05 km σε χαμηλά υψόμετρα έως 5 km σε μεγάλα υψόμετρα, για πέντε βόρεια γεωγραφικά πλάτη ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$).
- **ICAO Standard Atmosphere:** Πρόκειται για το πρότυπο ατμόσφαιρας που έχει δημοσιευθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO, 1993). Όλες οι τιμές έχουν υπολογιστεί υποθέτοντας ότι ο αέρας είναι ένα τέλειο αέριο απαλλαγμένο από υγρασία και σκόνη και βασίζεται σε συμβατικές αρχικές τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και πυκνότητας του αέρα στη μέση στάθμη της θάλασσας .
- **International Standard Atmosphere (ISA):** Το Διεθνές Πρότυπο Ατμόσφαιρας αποτελεί ένα στατικό ατμοσφαιρικό μοντέλο για τη μεταβολή της πίεσης, της θερμοκρασίας, της πυκνότητας και του ιξώδους της γήινης ατμόσφαιρας της Γης σε ένα ευρύ φάσμα υψομέτρων. Βασίζεται πρακτικά στα μοντέλα US Standard Atmosphere και ICAO Standard Atmosphere και παρέχει μια κοινή αναφορά για τη θερμοκρασία και την πίεση, ενώ έχει δημοσιευθεί από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) ως διεθνές πρότυπο, ISO 2533:1975 (ISO, 1975). Παρέχει μία καλή προσέγγιση του μέσου προφίλ θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, χωρίς όμως να παρέχει ένα αυστηρό μετεωρολογικό μοντέλο πραγματικών ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως για παράδειγμα μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης λόγω του ανέμου, ενώ δε λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις της υγρασίας (απουσία υδρατμών), θεωρώντας τον αέρα ξηρό και με σταθερή σύνθεση.

Αξίζει να σημειωθεί πώς τα τρία τελευταία μοντέλα συμπίπτουν μεταξύ τους αλλά και με το πρότυπο ατμόσφαιρας που προτείνεται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) ως προς τη δομή της ατμόσφαιρας σε υψόμετρο έως 32 km από την επιφάνεια της Γης.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή γίνεται χρήση της International Standard Atmosphere για τον καθορισμό του ατμοσφαιρικού προφίλ της Γης, καθώς σε αυτή βασίζονται τα αεροπορικά πρότυπα και οι κανόνες πτήσης. Σύμφωνα με την ISA, η ατμόσφαιρα χωρίζεται σε στρώματα με μια υποτιθέμενη γραμμική κατανομή της απόλυτης θερμοκρασίας T έναντι του γεωδυναμικού

υψομέτρου h (λαμβάνεται υπόψη η διακύμανση της βαρύτητας με το υψόμετρο). Οι υπολογισμοί των μεγεθών βασίζονται στις σχέσεις 3.2 και 3.3. Προκειμένου το μοντέλο να λάβει υπόψη τα χαμηλότερα σημεία της Γης, το γεωδυναμικό υψόμετρο ξεκινά στα 610 m κάτω από την επιφάνεια της Γης, με την τυπική θερμοκρασία να είναι 19°C . Με το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας να είναι περίπου 6.5°C km , η τιμή της θερμοκρασίας ανάγεται στους 15°C στη στάθμη της θάλασσας, με την πίεση να αντιστοιχεί σε 101.325 Pa (1 atm) και την πυκνότητα σε 1.225 kg/m^3 . Οι τιμές της θερμοκρασίας συναρτήσει του γεωμετρικού ατμοσφαιρικού υψομέτρου που χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις των καταιγισμών με το DYASTIMA δίνονται στο δεξί μέρος του Πίνακα 3.1. Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται το σημείο του GUI DYASTIMA στο οποίο συμπληρώνονται οι πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά της Γης, καθώς και για την ατμοσφαιρική σύσταση και θερμοκρασία.



Σχήμα 3.10: Το GUI του DYASTIMA όπου, δίνονται οι πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά της Γης, την ατμοσφαιρική σύσταση και το ατμοσφαιρικό προφίλ θερμοκρασίας (Paschalis and Tezari, 2019).

3.3.3 Πρωτογενές Φάσμα Κοσμικής Ακτινοβολίας

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της προσομοίωσης είναι το πρωτογενές φάσμα της εισερχόμενης κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, το οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την ηλιακή διαμόρφωση. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν διάφορα υπολογιστικά μοντέλα που δίνουν με αρκετά καλή προσέγγιση το φάσμα των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής:

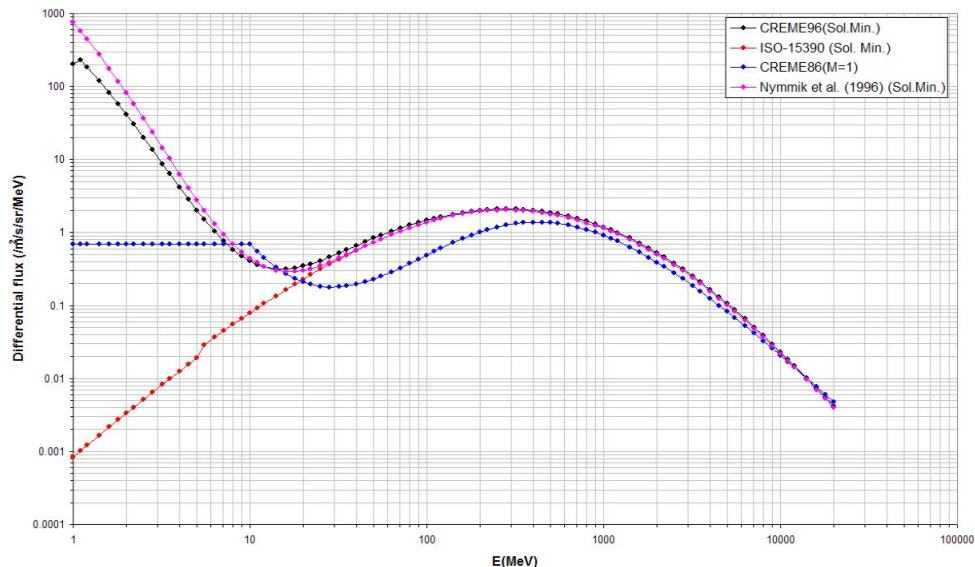
- **CREME 86:** Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τους δείκτες Διαστημικού Καιρού ($M = 1, 2, 3, 4$). Ο δείκτης $M = 1$ δίνει την καλύτερη προσέγγιση της γαλαξιακής ροής για

συγκεκριμένη ημερομηνία, ενώ περιλαμβάνεται και στα μοντέλα με $M = 2$ και $M = 4$. Ο δείκτης $M = 2$ αφορά την ανώμαλη συνιστώσα των κοσμικών ακτίνων (η οποία θεωρείται πλήρως ιονισμένη) και την προσθέτει στη γαλαξιακή ροή. Ο δείκτης $M = 3$ δίνει τη χειρότερη δυνατή περίπτωση ροής γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που επιτρέπουν αβεβαιότητες στα δεδομένα ροής και στην ηλιακή δραστηριότητα. Αυτές οι ροές είναι τόσο σοβαρές που υπάρχει μόνο 10% πιθανότητα να ξεπεραστούν από τις πραγματικές ροές ανά πάσα στιγμή. Τέλος, ο δείκτης $M = 4$ αναφέρεται σε μία μοναδική ανώμαλη συνιστώσα, η οποία θα έχει επηρεάζεται διαφορετικά από το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα πλήρως ιονισμένα σωματίδια. Η ηλιακή διαμόρφωση περιγράφεται απλοϊκά από ένα νόμο ημιτόνου (Adams, 1986).

- **CREME 96:** Το μοντέλο αυτό αφορά συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, δηλαδή συνθήκες μέγιστης έντασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτές παρατηρήθηκαν κατά τα έτη 1986-1987. Περιλαμβάνει και ροές ανώμαλων κοσμικών ακτίνων για He , N , O και Ne με ενέργειες της τάξης των $10 MeV$ ανά νουκλεόνιο (Mendenhall and Weller, 2012; Nymmik et al., 1992; Tylka et al., 1997, 2010).
- **ISO 15390:** Πρόκειται για ένα μοντέλο εκτίμησης της επίδρασης της ακτινοβολίας λόγω γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στα τεχνολογικά και βιολογικά συστήματα όταν βρίσκονται στο διάστημα (ISO, 2004). Βασίζεται στα ημι-εμπειρικά μοντέλα γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας του Κρατικού Πανεπιστημίου της Μόσχας. Για να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές της έντασης των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων λόγω του ενδεκαετούς ηλιακού κύκλου, χρησιμοποιούνται ετήσιοι μέσοι όροι του αριθμού Wolf, που συνδέεται με τις ηλιακές κηλίδες. Οι μεταβολές μεγάλης κλίμακας του ηλιοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου θεωρούνται ανάλογες με τις μεταβολές του ηλιακού πολικού μαγνητικού πεδίου, του οποίου η ένταση και η πολικότητα εξαρτώνται τόσο από την ηλιακή δραστηριότητα όσο και από το εάν ο ηλιακός κύκλος είναι άρτιος ή περιττός. Η χρονική υστέρηση των μεταβολών της γαλαξιακής ροής σε σχέση με τις μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας θεωρείται ότι εξαρτάται από τη μαγνητική δυσκαμψία των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων και από τη φάση του ηλιακού κύκλου. Καθορίζονται όλες οι παράμετροι του μοντέλου και τα χαρακτηριστικά των διάφορων μεταβολών για κοσμικά σωματίδια ενεργειών από $10^1 MeV$ έως $10^5 MeV$ (ηλεκτρονία, πρωτόνια και πυρήνες από $Z = 2$ έως $Z = 92$) στο περιβάλλον κοντά στη Γη και πέρα από τη μαγνητόσφαιρα. Το μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνει ανώμαλες κοσμικές ακτίνες.
- **Μοντέλο Nymmik:** Το μοντέλο αυτό είναι πρακτικά το ίδιο με το ISO 15390, με

τη μοναδική διαφορά ότι σε ενέργειες χαμηλότερες από 10 MeV ανά νουκλεόνιο, η ροή αυξάνεται με ελαττούμενη την ενέργεια (Nymmik et al., 1996).

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η ροή του ατόμου του H κοντά στη Γη, όπως αυτή προβλέπεται από τα παραπάνω μοντέλα. Παρατηρούμε πως τα μοντέλα CREME 96 και Nymmik μοιάζουν πολύ με το ISO 15390 για ενέργειες μεγαλύτερες των 10 MeV ανά νουκλεόνιο. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα της Γης, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ISO 15390, καθώς κρίνεται καταλληλότερο για το πεδίο της μελέτης μας. Τα μοντέλα CREME 96 και Nymmik δεν επιτρέπουν τον καθορισμό τροχιάς που να αντιστοιχεί σε μία μόνο τιμή κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας, σε αντίθεση με το ISO 15390. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν ειδικά Geomagnetic Transmission Routine αρχεία (GTRN), τα οποία δεν είναι διαθέσιμα για όλες τις επιθυμητές χρονικές περιόδους.



Σχήμα 3.11: Η ροή της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (άτομο H) κοντά στη Γη, όπως προβλέπεται από τα διαφορετικά μοντέλα ροής σωματιδίων στο ηλιακό ελάχιστο (Πηγή: www.spennis.oma.be/).

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας για διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το International Geomagnetic Reference Field (IGRF) για διάφορες χρονικές περιόδους (Epoch 1990.0, Epoch 1995.0, Epoch 2000.0, Epoch 2005.0, Epoch 2010.0, Epoch 2015.0) και δείχνουν τη συνεχή εξέλιξη του γεωμαγνητικού πεδίου. Είναι διαθέσιμες σε χάρτες και πίνακες στους οποίους αντιστοιχίζεται μία

τιμή κατωφλίου κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας σε συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες (Smart and Shea, 1997, 2008a,b, 2019). Στη συνέχεια, για την κατάλληλη επιλογή του φάσματος, οι τιμές αυτές της μαγνητικής δυσκαμψίας μετατρέπονται σε τιμές ενέργειας. Από τη θεωρία της σχετικότητας, η σχέση που συνδέει τη συνολική ενέργεια E ενός σωματιδίου με τη σχετικιστική ορμή p και την ενέργεια ηρεμίας E_0 είναι η εξής:

$$E^2 = (pc)^2 + E_0^2 \quad (3.7)$$

όπου $E_0 = mc^2$ και m η μάζα ηρεμίας του σωματιδίου. Αντίστοιχα, η μαγνητική δυσκαμψία, όπως είπαμε και παραπάνω, δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{pc}{Ze} \quad (3.8)$$

Συνδυάζουμε τις 3.7 και 3.8

$$R = \sqrt{E^2 + 2EE_0} \quad (3.9)$$

Η σχέση που προκύπτει συνδέει την ενέργεια ενός σωματιδίου με τη μαγνητική δυσκαμψία (Miroshnichenko, 2003).

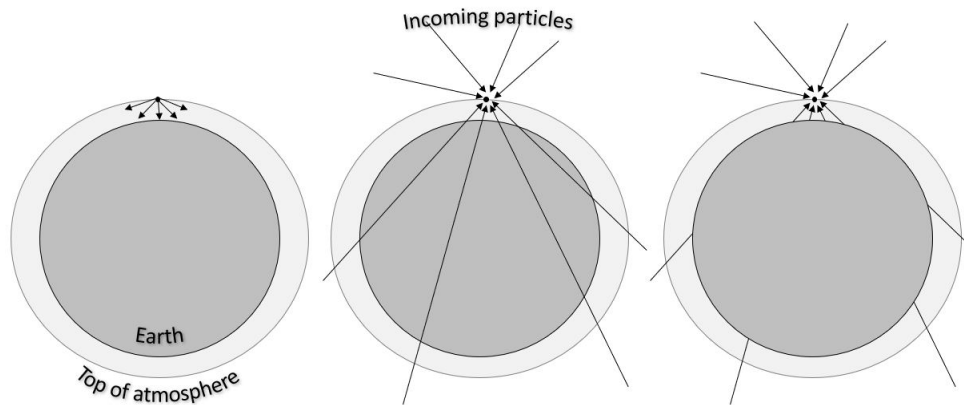
Στις πρώτες εκδόσεις του DYASTIMA, το διαφορικό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας για κάθε τύπο εισερχόμενου σωματιδίου δινόταν από τη σχέση:

$$J(E) = A (E + B)^a E^b \quad \left(\frac{\text{particles}}{m^2 \text{ sr sec MeV/nuc}} \right) \quad (3.10)$$

όπου E η ενέργεια ανά νουκλεόνιο του εισερχόμενου σωματιδίου και A , B , a , b αριθμητικές παράμετροι που εξαρτώνται από την ηλιακή δραστηριότητα. Ο παράγοντας $(E + B)^a$ εμπεριέχει την ηλιακή διαμόρφωση στις χαμηλές ενέργειες, ενώ αντίστοιχα ο όρος E^b κυριαρχεί σε μεγάλες ενέργειες, δίνοντας στο φάσμα τη χαρακτηριστική εκθετική μορφή που είδαμε και στο Κεφάλαιο 1. Στη νέα έκδοση του DYASTIMA δε γίνεται χρήση της παραμετροποίησης αυτής, καθώς θέτει σημαντικούς περιορισμούς στο φάσμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς αναφέρεται μόνο σε συγκεκριμένες ηλιακές συνθήκες. Στη νέα έκδοση, τα φάσματα των σωματιδίων περιγράφονται με καθορισμό των σημείων του διαφορικού φάσματός τους, τα οποία αντιστοιχούν σε ζεύγη ενέργειας-ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυνατή αναπαράσταση οποιωνδήποτε συνθηκών, είτε ήσυχων είτε διαταραγμένων.

Στην εφαρμογή DYASTIMA, η σημειακή πηγή των πρωτογενών σωματιδίων που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα τοποθετείται στην κορυφή της ατμόσφαιρας, δηλαδή σε υψόμετρο 85 km . Αυτό αποτελεί και το σημείο εκπομπής των σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια

εκπέμπονται μόνο προς τα κάτω, ενώ αντίστοιχα δεν υπάρχουν σωματίδια που να κινούνται προς τα πάνω, λόγω του όγκου της Γης, όπως φαίνεται και στο αριστερό μέρος του Σχήματος 3.12. Η δέσμη αυτή μπορεί να αποτελείται από σωματίδια διαφόρων ειδών. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ισότροπη ροή των εισερχόμενων πρωτογενών σωματιδίων χρησιμοποιείται ο νόμος συνημιτόνων του Lambert. Οι γωνίες στις οποίες γίνεται η εκπομπή των σωματιδίων ορίζονται από τα όρια της γωνίας ζενίθ θ και της γωνίας αζιμουθίου φ που θα ορίσει ο χρήστης.

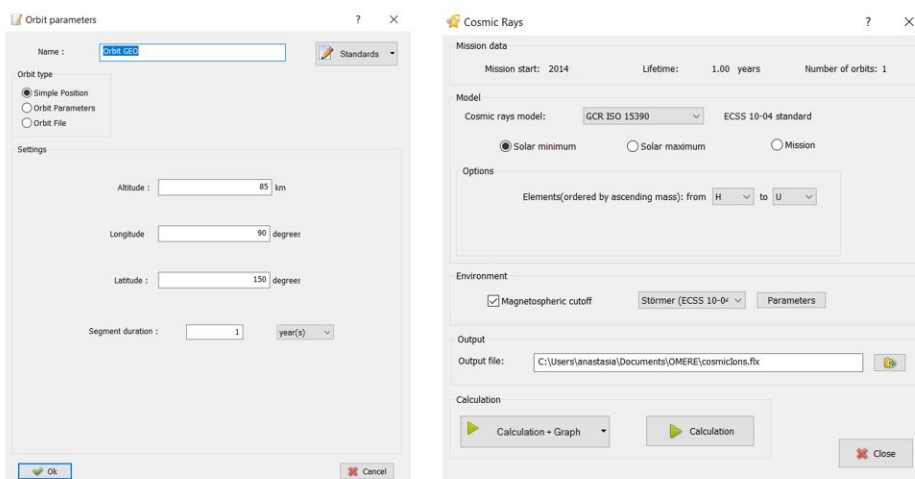


Σχήμα 3.12: Ο τρόπος που προσομοιώνονται τα σωματίδια μέσα στην ατμόσφαιρα με το DYASTIMA (αριστερά), ο τρόπος που παρέχεται το πρωτογενές φάσμα από τα διάφορα μοντέλα (κέντρο) και η επίδραση της σκιάς της Γης (δεξιά).

Εδώ πρέπει να σημειωθεί, πως τα διάφορα μοντέλα κοσμικής ακτινοβολίας παρέχουν το πρωτογενές φάσμα σε ένα συγκεκριμένο σημείο ολοκληρωμένο σε 4π . Για το DYASTIMA, χρειαζόμαστε το φάσμα ανά μονάδα στερεάς γωνίας (μέσο φάσμα σε σχέση με την κατεύθυνση). Λόγω του όγκου της Γης, ορισμένα σωματίδια δεν φτάνουν στο σημείο ενδιαφέροντος (Earth Shadow effect). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ολοκληρωμένη ροή άνω των 4π μειώνεται. Αυτό, όμως, δεν ισχύει για το DYASTIMA, καθώς τα σωματίδια που ‘μπλοκάρονται’ λόγω του φαινομένου της σκιάς της Γης δεν προσομοιώνονται έτσι κι αλλιώς. Έτσι, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα φάσμα στο οποίο να μην έχει πραγματοποιηθεί διόρθωση για τη σκιά της Γης (Tezari et al., 2019).

Ένα ιδιαίτερα εύχρηστο εργαλείο για την εξαγωγή του πρωτογενούς φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας είναι το OMERE, το οποίο αποτελεί ένα δωρεάν λογισμικό για τη μελέτη του διαστημικού περιβάλλοντος και των επιδράσεων της ακτινοβολίας στα τεχνολογικά συστήματα. Έχει αναπτυχθεί από την TRAD με την υποστήριξη των CNES, THALES ALENIA SPACE, AIRBUS DEFENSE & SPACE, ONERA, CEA, ESA και OHB. Είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα www.trad.fr/en/space/omere-software/.

Το OMERE δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του διαφορικού φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας για στοιχεία από το H έως το U με τα μοντέλα CREME 86, CREME 96 και ISO 15390. Διαθέτει ακόμα και κάποιες επιλογές για ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Το OMERE επιτρέπει τον ορισμό ενός σημείου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία μέσα στη μαγνητόσφαιρα για επιλεγμένα χρονικές περιόδους, καθορίζοντας τις παραμετρους της τροχιάς καθώς και τις γεωγραφικές συντεταγμένες (Σχήμα 3.13). Παρά το γεγονός ότι τα παραπάνω μοντέλα παρέχονται επίσης και μέσω του ιστότοπου του SPENVIS (www.spenvis.oma.be/), το SPENVIS δεν επιτρέπει ούτε τον ορισμό ενός μόνο σημείου μέσα στη μαγνητόσφαιρα της Γης, ούτε τον ορισμό των παραμέτρων της τροχιάς (απόγειο / περίγειο σε υψόμετρο μικρότερο των 100 km) (Tezari et al., 2019). Δίνει, επίσης, τη δυνατότητα επιλογής ήρεμων ή διαταραγμένων μαγνητοσφαιρικών συνθηκών. Τέλος, καθώς όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, το DYASTIMA ενσωματώνει εξ αρχής το φαινόμενο της σκιάς της Γης, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα φάσμα χωρίς να έχει προηγηθεί αυτή η γεωμετρική διόρθωση. Το OMERE παρέχει αυτήν την επιλογή σε αντίθεση με άλλα εργαλεία.



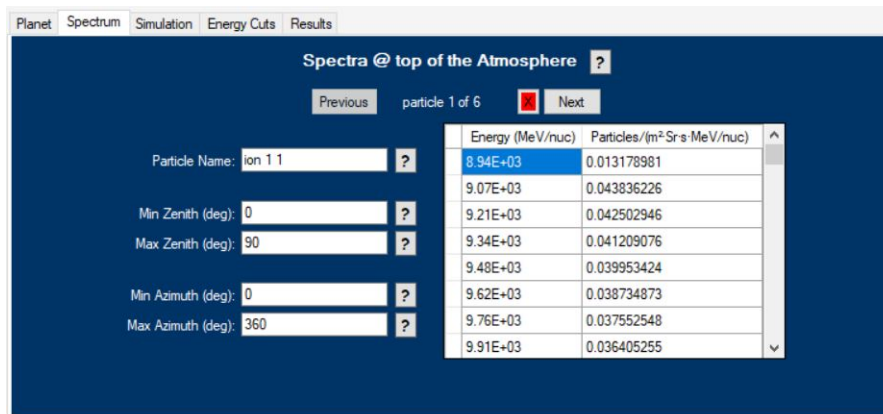
Σχήμα 3.13: Διεπαφή του λογισμικό OMERE (Πηγή: www.trad.fr/en/space/omere-software/).

Έτσι, σε κάθε περίπτωση, μέσω του GUI (Σχήμα 3.14), ο χρήστης καλείται να ορίσει:

- την ονοματολογία του πρωτογενούς σωματιδίου, σύμφωνα με την κωδικοποίηση που χρησιμοποιεί το GEANT4
- την ελάχιστη και μέγιστη ζενιθιακή γωνία των εισερχόμενων σωματιδίων
- την ελάχιστη και μέγιστη αζιμουθιακή γωνία των εισερχόμενων σωματιδίων

- το διαφορικό φάσμα σε ζεύγη ενέργειας ανά νουκλεόνιο και ροής, σε μονάδες MeV/nuc και $\#particles/(m^2 sr sec MeV/nuc)$ αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί, πως το διαφορικό φάσμα ολοκληρώνεται αριθμητικά προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική ροή, η οποία χρησιμοποιείται στην κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η αριθμητική ολοκλήρωση πραγματοποιείται με τη μέθοδο του τραpezίου. Για το λόγο αυτό, τα σημεία του φάσματος πρέπει να είναι αρκετά πυκνά καθορισμένα, προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Το φάσμα μπορεί να υπολογιστεί με οποιοδήποτε από τα μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

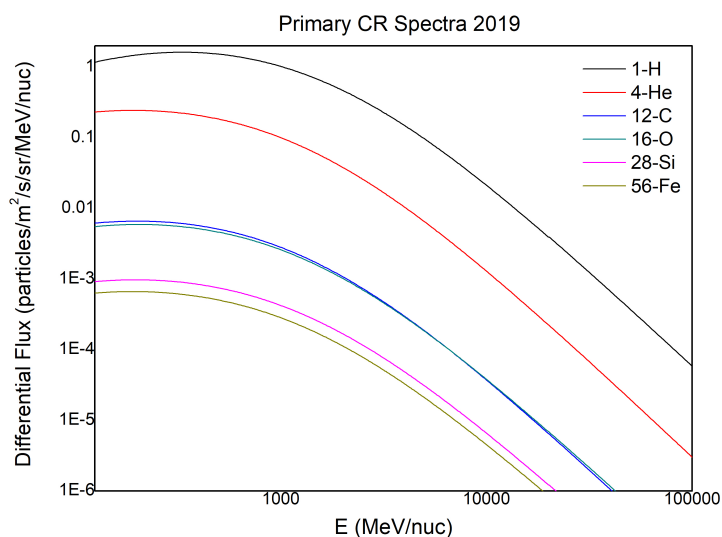


Σχήμα 3.14: Το GUI του DYASTIMA όπου, δίνονται οι πληροφορίες για το φάσμα της πρωτογενούς ακτινοβολίας (Paschalis and Tezari, 2019).

Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, χρησιμοποιήθηκε το πρωτογενές φάσμα των στοιχείων H ($Z = 1$, $A = 1$), He ($Z = 2$, $A = 4$), C ($Z = 6$, $A = 12$), O ($Z = 8$, $A = 16$), Si ($Z = 14$, $A = 28$) και Fe ($Z = 26$, $A = 56$), με ενέργειες έως GeV ανά νουκλεόνιο. Ουσιαστικά, τα έξι αυτά αντιστοιχεία αντιπροσωπεύουν πάνω από το 97% της ενέργειας του φάσματος των κοσμικών ακτίνων για τα διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας. Ένα χαρακτηριστικό φάσμα πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15. Οι τιμές αυτές έχουν εξαχθεί με το εργαλείο OMERE χρησιμοποιώντας το μοντέλο ISO. Το εύρος της ζενιθιακής γωνίας ορίστηκε από 0° έως 90° , ενώ αντίστοιχα το εύρος της αζιμουθιακής γωνίας από 0° έως 360° .

3.3.4 Γεωμετρία της προσομοίωσης

Όπως είδαμε ήδη, η ατμόσφαιρα του πλανήτη καθορίζεται από τη σύνθεσή του, το προφίλ θερμοκρασίας και την επιφανειακή πίεση. Ξεκινώντας από το κατώτερο σημείο της ατμόσφαιρας,

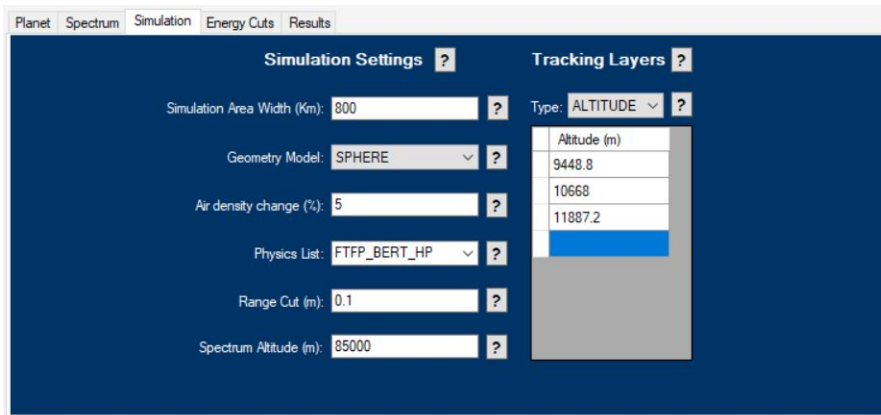


Σχήμα 3.15: Τυπικό παράδειγμα πρωτογενούς φάσματος κοσμικών ακτίνων με το μοντέλο ISO για κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV για το έτος 2019.

με τη χρήση της υδροστατικής εξίσωσης, το DYASTIMA διαιρεί την ατμόσφαιρα σε φέτες (slices), κάθε μία από τις οποίες διακρίνεται από σταθερή σύσταση και πυκνότητα. Ο διαμερισμός της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε η αλλαγή πυκνότητας των διαδοχικών φετών να είναι μικρότερη από το ποσοστό που ορίζεται από τον χρήστη. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης αυτής χρησιμοποιείται στον καθορισμό της περιοχής προσομοίωσης στο GEANT4.

Αν διαιρέσουμε τη γήινη ατμόσφαιρα με την εφαρμογή ενός κατωφλίου αλλαγής πυκνότητας της τάξης του 20%, 10% και 5%, τότε θα πάρουμε αντίστοιχα 55, 115 και 236 φέτες. Όσο μειώνεται το κατώφλι αλλαγής πυκνότητας, τόσο πιο ακριβής γίνεται και η προσομοίωση. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, η μεταβολή πυκνότητας μεταξύ των φετών, στην οποία διαιρείται η ατμόσφαιρα, για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, ορίζεται στο 5% (Σχήμα 3.16). Σε χαμηλότερες τιμές χαμηλότερες από αυτή, οι φέτες γίνονται πολύ στενές και τα βήματα προσομοίωσης στο GEANT4 περιορίζονται από τα όρια των φετών και όχι από τα μήκη αλληλεπίδρασης, οδηγώντας σε αύξηση του χρόνου προσομοίωσης χωρίς αντίστοιχη αύξηση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας για τη γεωμετρία της προσομοίωσης είναι το σχήμα που θα έχουν οι φέτες αυτές. Το DYASTIMA δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε ορθογώνια κουτιά ή σε σφαιρικά κελύφη. Αν και τα ορθογώνια κουτιά μειώνουν σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης, επιλέχθηκε η επιλογή του σφαιρικού κελύφους καθώς βελτιώνει την



Σχήμα 3.16: Το GUI του DYASTIMA όπου πραγματοποιούνται οι ρυθμίσεις σε σχέση με τη γεωμετρία της προσομοίωσης (Paschalis and Tezari, 2019).

ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα του πλανήτη.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το κατώφλι εμβέλειας (range cut), σύμφωνα με την οποία δεν παράγονται καθόλου σωματίδια με εκτιμώμενο εύρος μικρότερο από το κατώφλι εμβέλειας. Γενικά, το GEANT4 έχει ως προεπιλεγμένο κατώφλι εύρους το 1 mm για όλα τα σωματίδια, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Έτσι, το DYASTIMA επιτρέπει την αλλαγή της τιμής αυτής. Το κατώφλι εμβέλειας μεταφράζεται ουσιαστικά σε ενεργειακό κατώφλι, ανάλογα με το είδος του κάθε σωματιδίου και του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση μας, καθώς η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο. Ως βέλτιστη τιμή θεωρείται το 1 m (Paschalis, 2014).

Η επιλογή του παράγοντα υψομέτρου φάσματος (spectrum altitude) υποδηλώνει το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η πηγή των σωματιδίων. Με βάση το μοντέλο ατμόσφαιρας που χρησιμοποιήθηκε, το ύψος αυτό ορίζεται στα 85 km . Παράλληλα, οφείλει να προσδιοριστεί και το πλάτος της επιφάνειας προσομοίωσης (simulation area width), η οποία ορίζεται ως η οριζόντια διάσταση της περιοχής της προσομοίωσης. Η αντιπροσωπευτική τιμή είναι τα $500\text{ km} - 800\text{ km}$.

Προκειμένου να περιγραφούν ορθώς οι φυσικές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων του καταγισμού, εισάγονται οι physics listS του GEANT4. Καθώς τα εισερχόμενα πρωτογενή σωματίδια έχουν υψηλή ενέργεια, είναι απαραίτητη η χρήση μίας physics list που είναι κατάλληλη για φυσική υψηλών ενεργειών. Ως καταλληλότερες κρίνονται οι FTFP_BERT_HP, QGSP_BERT_HP και QGSP_BIC_HP. Στα πλαίσια των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, χρησιμοποιήθηκε η FTFP_BERT_HP, καθώς χρησιμοποιεί καταγισμό τύπου Bertini ($< 10\text{ GeV}$), υψηλής ακρίβειας μοντέλο νετρονίων ($< 20\text{ MeV}$) και μοντέλο Fritiof για υψηλές ενέργειες ($> 4\text{ GeV}$),

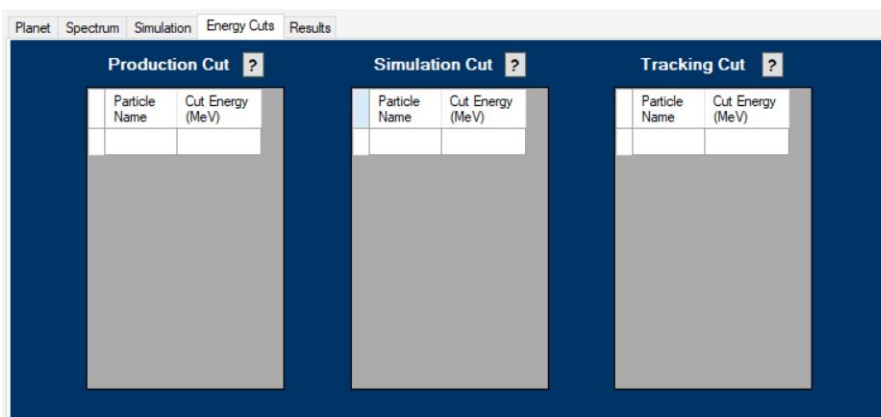
ενώ περιλαμβάνει και όλες τις τυπικές ηλεκτρομαγνητικές διεργασίες (Plainaki et al., 2016).

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο καθορισμός των επιπέδων ανίχνευσης, των σημείων δηλαδή όπου πραγματοποιείται η ανίχνευση και καταγραφή των σωματιδίων του καταιγισμού. Στα επίπεδα αυτά, θα πραγματοποιηθούν και όλοι οι υπολογισμοί που μας ενδιαφέρουν. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τα επίπεδα ανίχνευσης είτε με τη χρήση υψομέτρου (m) είτε με τη χρήση ατμοσφαιρικού βάθους (g/cm^2). Για πιο κατανοητή οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, έχει χρησιμοποιηθεί η επιλογή του υψομέτρου. Η αύξηση των επιπέδων ανίχνευσης ενδέχεται να αυξήσει και το χρόνο της προσομοίωσης.

3.3.5 Κατώφλια Ενέργειας

Το DYASTIMA δίνει τη δυνατότητα χρήσης τριών ενεργειακών κατωφλίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17. Το πρώτο ενεργειακό κατώφλι (production cut) αφορά αποκλειστικά την παραγωγή των δευτερογενών σωματιδίων (και όχι την περαιτέρω προσομοίωσή τους). Η ενέργεια ενός σωματιδίου, όταν πρόκειται να παραχθεί, ελέγχεται από το ίδιο το GEANT4 και αν είναι κάτω από ένα καθορισμένο εύρος, τότε η παραγωγή του απορρίπτεται.

Ο δεύτερος και ο τρίτος τύπος ενεργειακών κατωφλίων αφορούν τις τιμές ενέργειας κάτω από τις οποίες τα σωματίδια εξαιρούνται από την προσομοίωση (simulation cut) και την ανίχνευση (tracking cut) αντίστοιχα. Η εξαίρεση σωματιδίων είτε από την προσομοίωση είτε από την ανίχνευση πραγματοποιείται με έλεγχο της ενέργειάς τους σε κάθε απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αλληλεπιδράσεων. Στα δύο αυτά κατώφλια, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού τιμών για κάθε είδος σωματιδίου. Στις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή αυτή, δεν έχει χρησιμοποιηθεί κάποιο κατώφλι ενέργειας.



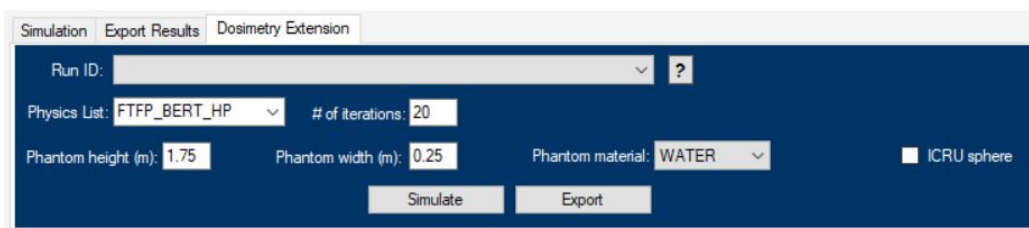
Σχήμα 3.17: Το GUI του DYASTIMA για τα ενεργειακά κατώφλια παραγωγής, προσομοίωσης και ανίχνευσης (Paschalis and Tezari, 2019).

3.3.6 Ρυθμίσεις Δοσιμετρικών Υπολογισμών

Όπως είπαμε και παραπάνω, προκειμένου να πραγματοποιηθεί υπολογισμός δόσεων ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μία δεύτερη προσομοίωση με την επέκταση DYASTIMA-R, η οποία βασίζεται στην έξοδο της προσομοίωσης του καταγισμού με το DYASTIMA. Το DYASTIMA-R δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρυθμού δόσης (σε Gy/sec) και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης (σε Sv/sec) σε κάθε ατμοσφαιρικό στρώμα. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για τους παράγοντες ποιότητας ακτινοβολίας είναι με βάση τα πρωτόκολλα της ICRP (ICRP, 2007). Για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών, ένα ομοίωμα τοποθετείται στα επίπεδα ανίχνευσης που έχει ορίσει ο χρήστης.

Οι ρυθμίσεις της προσομοίωσης αυτής (Σχήμα 3.18) αφορούν:

- τον αριθμός επαναλήψεων (iterations), ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό αλληλεπιδράσεων των συλλεχθέντων σωματιδίων με το ομοίωμα κάθε επίπεδο ανίχνευσης.
- τη reference physics list του GEANT4 που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, με τις βέλτιστες physics lists να είναι, όπως και παραπάνω, οι FTFP_BERT_HP, QGSP_BERT_HP και QGSP_BIC_HP.
- το ομοίωμα που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Ο χρήστης είναι σε θέση να καθορίσει τις διαστάσεις (ύψος και πλάτος) ενός κυλινδρικού ομοιώματος, καθώς το υλικό του. Διατίθεται, επίσης, και η επιλογή ενός ομοιώματος αναφοράς (ICRU sphere).



Σχήμα 3.18: Η επέκταση DYASTIMA-R όπου πραγματοποιούνται οι ρυθμίσεις για την πραγματοποίηση των δοσιμετρικών υπολογισμών (Paschalis and Tezari, 2019).

3.4 Παράμετροι εξόδου

Η έξοδος του DYASTIMA και του DYASTIMA-R παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την ακριβή μελέτη του ατμοσφαιρικού καταγισμού. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Ενέργεια νέων σωματιδίων στην παραγωγή
- Ενέργεια, χρόνος, κατεύθυνση, θέση και ενεργειακή εναπόθεση των δευτερογενών σωματιδίων στα επίπεδα ανίχνευσης (Σχήμα 3.19)
- Ρυθμός δόσης και ισοδύναμη δόσης για κάθε είδος σωματιδίου του καταιγισμού στα επίπεδα ανίχνευσης (Σχήμα 3.19).

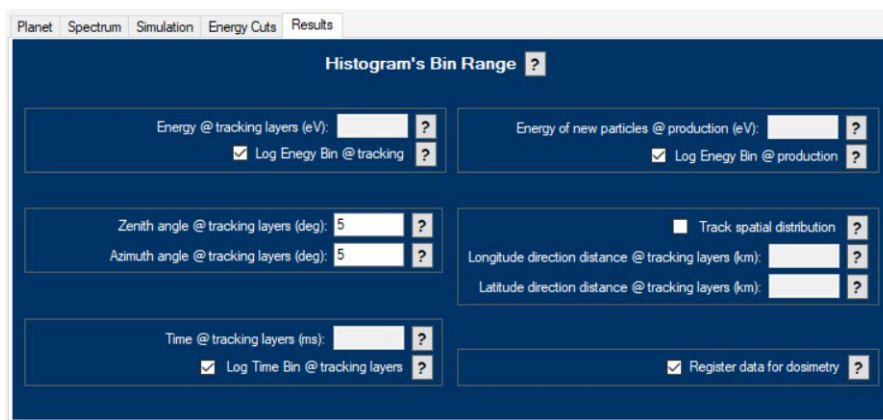


Σχήμα 3.19: Το output του DYASTIMA / DYASTIMA-R (Paschalis and Tezari, 2019).

Προκειμένου να είναι δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων, πρέπει να καθοριστούν οι εξής παράμετροι (Σχήμα 3.20):

- το ενεργειακό εύρος των σωματιδίων σε κάθε επίπεδο ανίχνευσης. Η επιλογή Log Energy Bin παρέχει την ευκαιρία κατηγοριοποίησης των σωματιδίων σε λογαριθμική κλίμακα.
- το εύρος της γωνίας ζενίθ και της αζιμουθιακής γωνίας για κάθε σωματίδιο στα επίπεδα ανίχνευσης.
- το εύρος του χρόνου άφιξης των σωματιδίων στα επίπεδα ανίχνευσης. Η επιλογή Log Time Bin παρέχει την ευκαιρία κατηγοριοποίησης των σωματιδίων σε λογαριθμική κλίμακα.
- το ενεργειακό εύρος των σωματιδίων κατά το χρόνο παραγωγής τους και το υψόμετρο. Και εδώ, υπάρχει η δυνατότητα κατηγοριοποίησης των σωματιδίων σε λογαριθμική κλίμακα.

- η χωρική κατανομή, η οποία αντιστοιχεί στην ανίχνευση της οριζόντιας θέσης των σωματιδίων. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για κατευθυντικές ακτίνες, όπου μπορεί να μελετηθεί η οριζόντια διάσταση του καταιγισμού. Η επιλογή αυτή αυξάνει σημαντικά τον απαιτούμενο χώρο στον δίσκο, και για το λόγο αυτό, δεν έχει χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της διατριβής.
- το εύρος της απόστασης γεωγραφικού πλάτους και μήκους στα επίπεδα ανίχνευσης
- την αποθήκευση των δεδομένων για τη χρήση τους σε δεύτερη προσομοίωση με την επέκταση DYASTIMA-R.



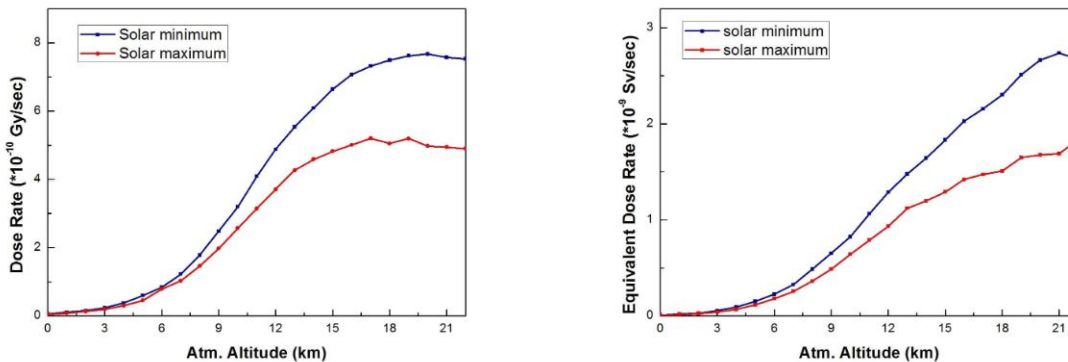
Σχήμα 3.20: Το GUI του DYASTIMA όπου ρυθμίζονται διάφορες παράμετροι σχετικά με την έξοδο των αποτελεσμάτων (Paschalis and Tezari, 2019).

Η διαδικασία προσομοίωσης με το DYASTIMA και το DYASTIMA-R εκτελείται μέσω μιας εφαρμογής κονσόλας (Σχήμα 3.21). Ο χρήστης ρυθμίζει τον αριθμό πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων (events) που θέλει να 'τρέξει'. Για κάθε 'event', η κονσόλα υποδεικνύει το σωματίδιο που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, την ενέργεια, τον χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία του συμβάντος και τον εκτιμώμενο χρόνο που απομένει. Προφανώς, η αύξηση των events αυξάνει την ακρίβεια της προσομοίωσης, αλλά και τη χρονική διάρκειά της. Έτσι, για κάθε προσομοίωση δημιουργούνται τρία αρχεία: το αρχείο της βάσης (SQLite database file), ένα αρχείο .txt με τις παραμέτρους εισόδου του σεναρίου και ένα αρχείο .txt με την έξοδο του DYASTIMA. Η προσομοίωση με το DYASTIMA-R θα προσθέσει με τη σειρά της άλλα δύο αρχεία: ένα αρχείο βάσης για τους δοσιμετρικούς υπολογισμούς και ένα αρχείο .txt με την έξοδο του DYASTIMA-R.

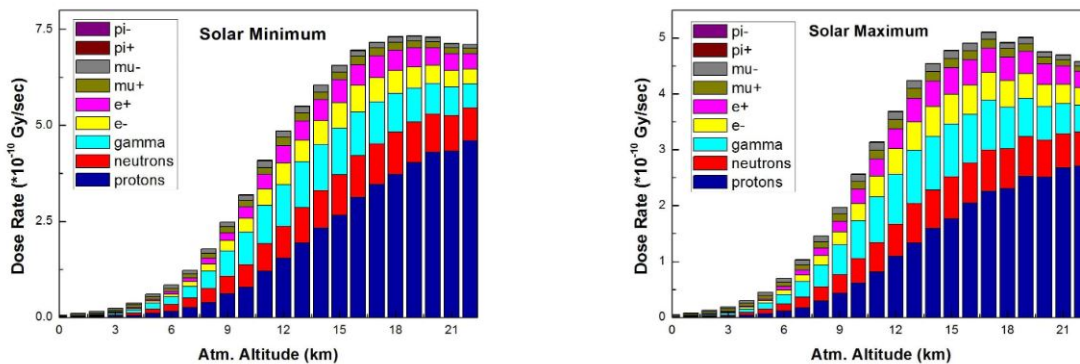
Τέλος, τα αποτελέσματα της εκάστοτε προσομοίωσης συγκεντρώνονται στο αντίστοιχο αρχείο της βάσης δεδομένων SQLite. Ένας έμπειρος χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε

παρουσιάζονται παρακάτω (Paschalis et al., 2016a, 2017a,b,c,d, 2016b; Tezari et al., 2018a,b,c).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης και ισοδύναμης δόσης για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και ηλιακού μεγίστου για υψόμετρο έως 22 km από την επιφάνεια της Γης, με βήμα 1 km (Σχήμα 3.23) καθώς και ο υπολογισμός της συνεισφοράς κάθε είδους σωματιδίου του ατμοσφαιρικού καταγισμού στα υψόμετρα αυτά, τόσο στο συνολικό ρυθμό δόσης (Σχήμα 3.24) όσο και στο ρυθμό ισοδύναμης δόσης (Σχήμα 3.25).

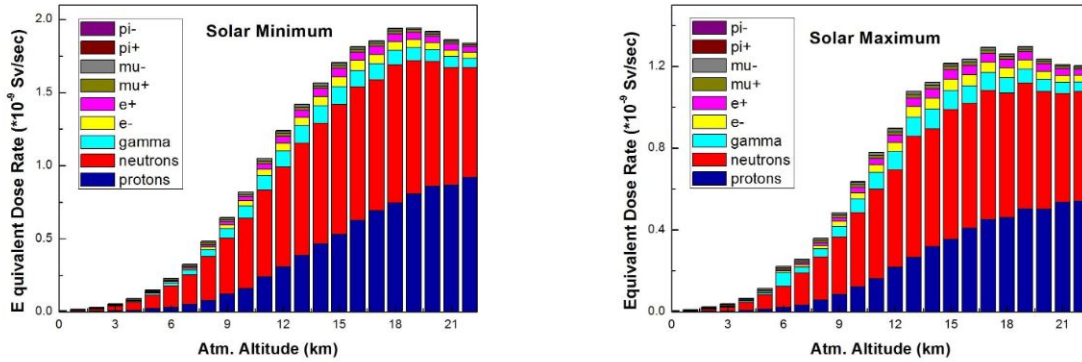


Σχήμα 3.23: Ρυθμός δόσης (αριστερά) και ρυθμός ισοδύναμης δόσης (δεξιά) για διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα κατά τη διάρκεια ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (Paschalis et al., 2016b).



Σχήμα 3.24: Συμβολή διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας στο συνολικό ρυθμό δόσης κατά τη διάρκεια του ηλιακού (αριστερά) και του ηλιακού μεγίστου (δεξιά), όπως υπολογίστηκαν με το DYASTIMA-R (Paschalis et al., 2016b).

Για την πραγματοποίηση των απαραίτητων προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε το πρωτογενές φάσμα γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που εξήχθη από το CREME2009 για συνθήκες ηλιακής ελαχίστου και ηλιακού μεγίστου, οι οποίες αντιπροσωπεύουν ήμερες περιβαλλοντικές συνθήκες με απουσία SEPs (Mendenhall and Weller, 2012; Tylka et al., 1997, 2010). Οι



Σχήμα 3.25: Συμβολή διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας στο συνολικό ρυθμό ισοδύναμης δόσης κατά τη διάρκεια του ηλιακού (αριστερά) και του ηλιακού μεγίστου (δεξιά), όπως υπολογίστηκαν με το DYASTIMA-R (Paschalis et al., 2016b).

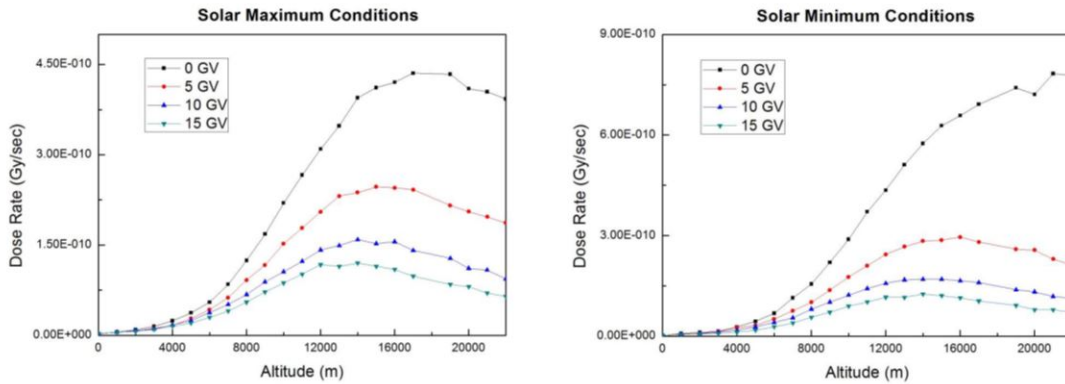
υπολογισμοί αυτοί έχουν πραγματοποιηθεί για κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV ($90^\circ\text{ N}, 0^\circ\text{ E}$), το οποίο αντιστοιχεί σε πολικές περιοχές, ενώ δεν έχει ληφθεί υπόψη το γεωμαγνητικό πεδίο ($B_X = 0, B_Y = 0, B_Z = 0$). Για την περιγραφή της ατμόσφαιρας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της International Standard Atmosphere (ISO, 1975). Για τον υπολογισμό της δόσης και ισοδύναμης δόσης χρησιμοποιήθηκε ένα κυλινδρικό ομοίωμα με ύψος 1.75 m και 0.25 m που αποτελείται από νερό.

Παρατηρούμε πως η δόση και η ισοδύναμη δόση σχετίζονται άμεσα με την ένταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, η οποία με τη σειρά της συνδέεται άρρηκτα με τον 11-ετή ηλιακό κύκλο και τον 22-ετή μαγνητικό ηλιακό κύκλο. Καθώς, λοιπόν, η ένταση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων βρίσκεται σε αντισυσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα, η έκθεση λόγω αυτής είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής δραστηριότητας και αντίστοιχα, χαμηλότερη κατά το ηλιακό μέγιστο (Σχήμα 3.23).

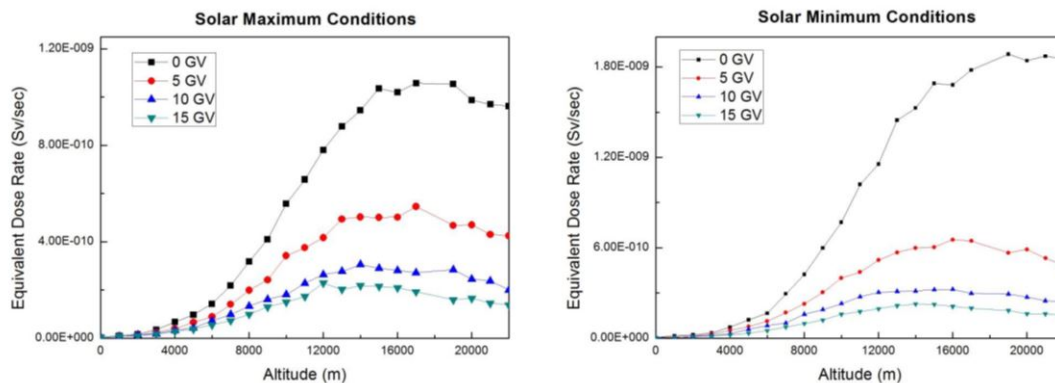
Στα επόμενα σχήματα, γίνεται φανερό πως τα κυριότερα σωματίδια του ατμοσφαιρικού καταιγισμού στα διάφορα υψόμετρα είναι τα πρωτόνια, τα νετρόνια, τα φωτόνια-γ και στη συνέχεια ακολουθούν τα ηλεκτρόνια, τα ποζιτρόνια, τα μίονια και τα πιόνια. Η κύρια συμβολή στο συνολικό ρυθμό δόσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στα πρωτόνια (Σχήμα 3.24), λαμβάνοντας όμως υπόψη τη βιολογική δραστηριότητα κάθε είδους ακτινοβολίας, τα νετρόνια κυριαρχούν στον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης, με την κύρια συμβολή στη συνολική ισοδύναμη δόση να οφείλεται σε αυτά (Σχήμα 3.25).

Στη συνέχεια, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για περισσότερα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας, όπως βλέπουμε στα Σχήματα 3.26 και 3.27. Παρατηρούμε ότι οι ρυθμοί δόσης και ισοδύναμης δόσης είναι υ-

ψηλότεροι στις πολικές περιοχές (0 GV), σε αντίθεση με τις περιοχές γύρω από τον Ισημερινό (Tezari et al., 2018b). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ελαττωμένη θωράκιση που προσφέρει το γεωμαγνητικό πεδίο και η ατμόσφαιρα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.



Σχήμα 3.26: Ρυθμός δόσης για το ηλιακό μέγιστο (αριστερά) και το ηλιακό ελάχιστο (δεξιά) για διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα για διάφορες τιμές κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας (Tezari et al., 2018b).



Σχήμα 3.27: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης για το ηλιακό μέγιστο (αριστερά) και το ηλιακό ελάχιστο (δεξιά) για διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα για διάφορες τιμές κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας (Tezari et al., 2018b).

Η εξέλιξη και η βελτιστοποίηση της εφαρμογής DYASTIMA-R συνεχίστηκε κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης, οπότε και έλαβε την τελική μορφή της. Στο επόμενο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία αυτή, η οποία οδήγησε και στην αποδοχή του DYASTIMA ως federated product της ESA.

4 Αξιολόγηση DYASTIMA-R

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία αξιολόγησης (validation) του DYASTIMA / DYASTIMA-R σύμφωνα με τα δεδομένα αναφοράς που προτείνονται από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) και τη Διεθνή Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας (ICRU). Η διαδικασία αυτή αποτελεί απαραίτητο βήμα και διασφαλίζει την ορθότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του DYASTIMA / DYASTIMA-R, και τη χρήση τους για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία των πληρωμάτων αεροσκαφών. Πραγματοποιείται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης του DYASTIMA / DYASTIMA-R με αυτά που προκύπτουν από άλλα διεθνώς αναγνωρισμένα μοντέλα.

4.1 Πρωτόκολλα Αξιολόγησης

Η Διεθνής Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) ανέφερε για πρώτη φορά στη Δημοσίευση 9 (ICRP, 1966), την έκθεση που προκύπτει από πτήση σε μεγάλο υψόμετρο, ενώ στη Δημοσίευση 26 (Παράγραφος 88) (ICRP, 1977) αναφέρει ότι η πτήση σε μεγάλο υψόμετρο μπορεί να αυξήσει την έκθεση σε φυσική ακτινοβολία. Αντίστοιχα, στη Δημοσίευση 39 (Παράγραφος 10) (ICRP, 1984), η πτήση με τον παρόντα τρόπο παρουσιάστηκε ως παράδειγμα μίας υπάρχουσας κατάστασης έκθεσης. Οι πρώτες συστάσεις της Επιτροπής σχετικά με την προστασία από την κοσμική ακτινοβολία ήρθαν με τη Δημοσίευση 60 (ICRP, 1991), μόλις το 1991, όπου συνέστησε το πλήρωμα αεροσκαφών να θεωρείται στις επαγγελματικά εκτιθέμενες σε ακτινοβολία ομάδες. Η χρήση δοσίμετρων για ατομική παρακολούθηση δεν κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι δόσεις δεν είναι πιθανό να υπερβούν μία καθορισμένη τιμή. Στη Δημοσίευση 75 (ICRP, 1997), καθορίστηκε πως μόνο το πλήρωμα αεροσκαφών εκτίθεται επαγγελματικά σε αυξημένα επίπεδα κοσμικής ακτινοβολίας, και όχι άλλοι επαγγελματίες ταξιδιώτες, καθώς η ετήσια ενεργός δόση τους εξακολουθεί να είναι στο εύρος του $1 \mu Sv$. Αντίστοιχα, ο έλεγχος της έκθεσης των πληρωμάτων διασφαλίζεται κυρίως από περιορισμούς στη διάρκεια πτήσης και τη διαδρομή.

Πρόσφατα, το 2013, η Επιτροπή δημοσίευσε και συστάσεις σχετικά με τον έλεγχο της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία στο διάστημα στη Δημοσίευση 123 (ICRP, 2013). Τέλος, το 2016, με τη Δημοσίευση 132 (ICRP, 2016), η Επιτροπή ενημερώνει και αποσαφηνίζει όλες τις προηγούμενες συστάσεις της σχετικά με την έκθεση σε κοσμική ακτινοβολίας στην αεροπορία. Λαμβάνει υπόψη τις γενικές συστάσεις, όπως αυτές παρατίθενται στη Δημοσίευση 103 (ICRP, 2007), κάνει αναφορά πλέον και στους συχνούς επιβάτες πέρα από τα μέλη του πληρώματος, ενώ θέτει και όρια για την έκθεση των εγχύων μελών του πληρώματος.

Το 2010, η ICRP μαζί με τη Διεθνή Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας

Reference Data January 1998

R_C (GV)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)		
	FL310	FL350	FL390
0	4.3	5.9	7.6
1	4.2	5.8	7.4
2	4.0	5.5	7.0
3	3.8	5.2	6.6
4	3.5	4.8	6.0
5	3.2	4.4	5.5
6	2.9	4.0	5.0
7	2.7	3.6	4.5
8	2.5	3.3	4.1
9	2.2	3.0	3.7
10	2.1	2.7	3.3
11	1.9	2.5	3.0
12	1.8	2.3	2.8
13	1.7	2.1	2.6
14	1.6	2.0	2.5
15	1.5	1.9	2.3
16	1.5	1.9	2.2
17	1.5	1.8	2.2

Πίνακας 4.1: Τα δεδομένα αναφοράς του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης FL310, FL350 και FL390, για τον Ιανουάριο του 1998 (ICRU, 2010).

(ICRU) από κοινού την Έκθεση 84 (ICRU, 2010), στην οποία περιγράφεται το πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας σε υψόμετρο αεροσκαφών και παρέχονται δεδομένα αναφοράς (reference data) για την επικύρωση / αξιολόγηση (validation των δόσεων λόγω έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία του πληρώματος αεροσκαφών για τη διευκόλυνση της διεθνούς εναρμόνισης των εκτιμήσεων δόσης του πληρώματος από αεροπορικές εταιρείες και τους αντίστοιχους ρυθμιστές τους. Το βασικό σημείο της έκθεσης αυτής είναι ο καθορισμός ενός συνόλου τιμών αναφοράς της έκθεσης του πληρώματος αεροσκαφών λόγω κοσμικής ακτινοβολίας, έναντι των οποίων μπορούν να συγκριθούν οι αντίστοιχες τιμές που παρέχονται από τους διάφορους κώδικες και λογισμικά αξιολόγησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία για λόγους επικύρωσης / αξιολόγησης. Οι τιμές αναφοράς δίνονται σε όρους ισοδύναμης δόσεων περιβάλλοντος, που είναι λειτουργικό μέγεθος (operational quantity), καθώς βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις, και δίνονται στους Πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3.

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα αναφοράς έχουν προκύψει ύστερα από ενδελεχή ανάλυση ε-

Reference Data January 2000

R_C (GV)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)		
	FL310	FL350	FL390
0	4.0	5.2	6.4
1	3.9	5.1	6.3
2	3.7	4.8	6.0
3	3.5	4.6	5.6
4	3.3	4.2	5.2
5	3.0	3.9	4.8
6	2.8	3.6	4.4
7	2.5	3.3	4.0
8	2.3	3.0	3.6
9	2.2	2.7	3.3
10	2.0	2.5	3.0
11	1.9	2.3	2.8
12	1.7	2.2	2.6
13	1.7	2.1	2.5
14	1.6	2.0	2.4
15	1.5	1.9	2.3
16	1.5	1.9	2.2
17	1.5	1.8	2.1

Πίνακας 4.2: Τα δεδομένα αναφοράς του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης FL310, FL350 και FL390, για τον Ιανουάριο του 2000 (ICRU, 2010).

νός μεγάλου και περιεκτικού συνόλου δεδομένων που περιλαμβάνει περίπου 20000 μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από διάφορες ομάδες με διαφορετικούς τύπους ανιχνευτών και υπό διαφορετικές συνθήκες σε αεροπορικές πτήσεις κατά την περίοδο 1996 έως 2006, η οποία αντιστοιχεί πρακτικά σε ολόκληρο τον ηλιακό κύκλο 23. Για την προσαρμογή των δεδομένων, ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος διαμορφώνεται με την εφαρμογή μίας Bayesian προσέγγισης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης επιλογής παραμέτρων. Καθώς το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε διαφορετικά βαρομετρικά υψόμετρα και διαφορετικά κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας, εξετάζονται αρχικά αυτές οι παράμετροι.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η φάση του ηλιακού κύκλου, χρησιμοποιήθηκε μια συνάρτηση η οποία εξαρτάται από το ρυθμό ροής των δευτερογενών νετρονίων στο επίπεδο του εδάφους, όπως μετράται τους επίγειους μετρητές νετρονίων, και πιο συγκεκριμένα από το σταθμό της Oulu στη Φινλανδία. Η παραμετροποίηση είναι πρακτικά ανεξάρτητη από την επιλογή ενός συγκεκριμένου μετρητή νετρονίων, καθώς η σχετική επίδραση της είναι μικρότερη του 5%.

Reference Data January 2002

R_C (GV)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)		
	FL310	FL350	FL390
0	3.7	4.7	5.7
1	3.6	4.6	5.6
2	3.4	4.4	5.3
3	3.3	4.1	5.0
4	3.0	3.9	4.7
5	2.8	3.6	4.3
6	2.6	3.3	4.0
7	2.4	3.0	3.7
8	2.2	2.8	3.4
9	2.1	2.6	3.1
10	1.9	2.4	2.9
11	1.8	2.2	2.7
12	1.7	2.1	2.5
13	1.6	2.0	2.4
14	1.6	1.9	2.3
15	1.5	1.9	2.2
16	1.5	1.8	2.2
17	1.4	1.8	2.1

Πίνακας 4.3: Τα δεδομένα αναφοράς του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης FL310, FL350 και FL390, για τον Ιανουάριο του 2002 (ICRU, 2010).

Μία απλή συνάρτηση μπορεί να προσαρμοστεί σε δεδομένα που έχουν διορθωθεί ως προς ένα κοινό υψόμετρο. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται εδώ έχει ένα γραμμικό όρο για την ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος και ένα εκθετικό όρο για την κατακόρυφη μαγνητική δυσκαμψία. Ο ρυθμός της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος εκφράζεται με αναπτύγματα Taylor, όπου διατηρούνται μόνο οι όροι χαμηλότερης τάξης. Όλοι οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού Monte Carlo προσομοιώσεων WinBUGS, κάνοντας χρήση του θεωρήματος Bayes.

Το σύνολο των δεδομένων αναλύθηκε, λοιπόν, πολλές φορές χρησιμοποιώντας κάθε φορά μία διαφορετική υπόθεση, με στόχο να βρεθεί σε ποιο βαθμό οι ρυθμοί ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος είναι ευαίσθητοι στις διάφορες υποθέσεις. Συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι ισχυρά, με σχετική συμφωνία περίπου στο 5% για τις διάφορες παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν.

Έτσι, τα δεδομένα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν:

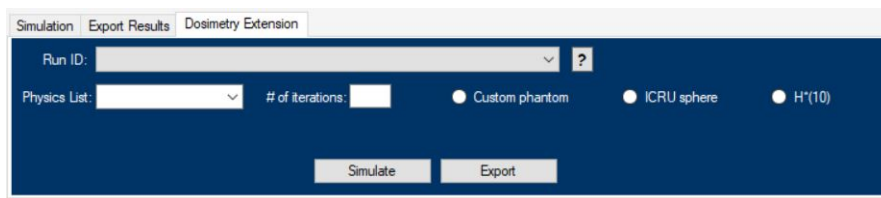
- Τρία υψόμετρα, τα οποία καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος των υψομέτρων πτήσης των εμπορικών επιβατικών αεροσκαφών. Αυτά είναι τα *FL310* (31000 *ft* ή 9.45 *km*), *FL350* (35000 *ft* ή 10.67 *km*) *FL390* (39000 *ft* ή 11.89 *km*).
- Δεκαοκτώ τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας, από 0 *GV* έως 17 *GV* (με βήμα 1 *GV*), καλύπτοντας το πλήρες εύρος των τιμών γεωγραφικού πλάτους.
- Τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιόδους του ηλιακού κύκλου 23, συμπεριλαμβάνοντας έτσι μεγάλο ποσοστό τιμών ηλιακής διαμόρφωσης, με διαφορετικές περιόδους πολικότητας του ηλιομαγνητικού πεδίου. Αυτές είναι ο Ιανουάριος του 1998, ο Ιανουάριος του 2000 και ο Ιανουάριος του 2002.

Σύμφωνα με την έκθεση αυτή, οι τιμές που προκύπτουν από οποιοσδήποτε λογισμικό ή κώδικα που πραγματοποιεί δοσιμετρικούς υπολογισμούς για την αξιολόγηση της έκθεσης του πληρώματος αεροσκαφών, συνίσταται η αποδεκτή απόκλισή τους από τα δεδομένα αναφοράς να μην υπερβαίνουν μία μέγιστη τιμή της τάξης του $\pm 30\%$ (ICRU, 2010).

4.2 Αξιολόγηση του DYASTIMA-R

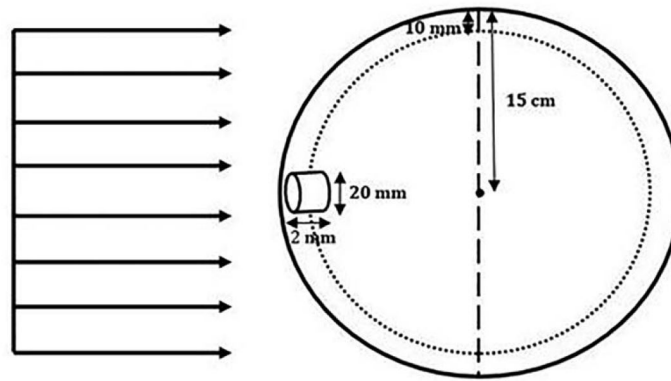
Καθώς το DYASTIMA-R αποτελεί ένα καινούριο εργαλείο υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, με απώτερο στόχο την εκτίμηση δόσεων λόγω κοσμικής ακτινοβολίας των πληρωμάτων αεροσκαφών, ήταν απαραίτητη η πιστοποίησή του.

Αποκλειστικά για τους σκοπούς και τη διαδικασία της επικύρωσης, δημιουργήθηκε μια ειδική έκδοση του DYASTIMA-R, η οποία δεν είναι διαθέσιμη για ευρεία χρήση, η οποία δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1. Αυτή η έκδοση έχει χρησιμοποιηθεί για όλους τους υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της διατριβής αυτής.



Σχήμα 4.1: Το GUI του DYASTIMA-R για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος (Paschalis and Tezari, 2019).

Πιο συγκεκριμένα, το ανθρώπινο ομοίωμα αντικαταστάθηκε από μία σφαίρα ICRU, η οποία αποτελεί ένα ομοίωμα αναφοράς με διάμετρο 30 cm και πυκνότητας 1 g/cm^3 , φτιαγμένο από υλικό που προσομοιώνει ανθρώπινο ιστό (ICRU, 1980). Η σφαίρα αυτή ακτινοβολήθηκε με τα σωματίδια που συλλέχθηκαν σε κάθε ατμοσφαιρικό υψόμετρο, από την προσομοίωση με το DYASTIMA. Το πεδίο ακτινοβολίας παράγεται από το αντίστοιχο διευρυμένο και ευθυγραμμισμένο πεδίο ακτινοβολίας. Ένας κυλινδρικός όγκος με ακτίνα 1 cm και πλάτος 2 mm ορίστηκε σε βάθος 10 mm από την επιφάνεια της σφαίρας και τοποθετήθηκε επί της διανυσματικής ακτίνας που αντιτίθεται στην κατεύθυνση του ευθυγραμμισμένου πεδίου, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος. Η διάταξη της δοσιμετρίας έχει ήδη χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε άλλες μελέτες (Pelliccioni, 2000). Μια σχηματιστική απεικόνιση της διάταξης αυτής δίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Μια σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοσιμετρίας που χρησιμοποιήθηκε για την επικύρωση του DYASTIMA-R (Tezari et al., 2020).

Το πρωτογενές φάσμα κοσμικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στο μοντέλο ISO 15390 (ISO, 2004) για τα στοιχεία H , He , C , O , Si και Fe . Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας για διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες, όπως αυτές έχουν προκύψει από το IGRF Epoch 2000.0 (Smart and Shea, 2008b), ενώ για τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0 ($B_X = 0$, $B_Y = 0$, $B_Z = 0$). Η ατμόσφαιρα περιγράφηκε από το μοντέλο της International Standard Atmosphere (ISO, 1975).

Οι προσομοιώσεις με το DYASTIMA-R πραγματοποιήθηκαν για όλα τα σενάρια που προτείνονται στην Έκθεση 84. Έτσι, πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο 48 προσομοιώσεων για τρία διαφορετικά υψόμετρα (FL310, FL350, FL390), 18 τιμές κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας ($0 - 17\text{ GV}$) και τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (Ιανουάριος 1998, Ιανουάριος 2000,

DYASTIMA-R January 1998

R_C (GV)	<i>FL310</i>		<i>FL350</i>		<i>FL390</i>	
	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)
0	4.0	-6.5	5.3	-10.2	6.8	-10.8
1	3.9	-8.8	5.1	-11.4	6.9	-6.7
2	3.9	-2.8	4.8	-11.9	6.3	-10.5
3	3.2	-15.4	4.3	-16.7	5.4	-17.9
4	2.9	-17.7	3.8	-20.2	4.7	-21.7
5	2.5	-22.3	3.3	-25.0	4.0	-28.1
6	2.2	-22.6	2.9	-28.4	3.6	-29.0
7	2.0	-26.5	2.5	-31.5	3.1	-32.2
8	1.7	-31.7	2.2	-32.0	2.6	-35.7
9	1.6	-29.5	1.9	-35.3	2.4	-36.4
10	1.5	-29.3	1.9	-31.0	2.2	-34.5
11	1.3	-33.7	1.7	-33.5	2.0	-34.2
12	1.2	-32.7	1.6	-30.4	1.9	-33.2
13	1.1	-35.8	1.4	-31.6	1.7	-35.2
14	1.1	-33.0	1.3	-37.0	1.5	-38.8
15	1.0	-35.3	1.2	-36.3	1.4	-40.7
16	1.9	-39.1	1.2	-36.9	1.3	-39.9
17	1.9	-41.2	1.1	-37.5	1.3	-41.4

Πίνακας 4.4: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης *FL310*, *FL350* και *FL390*, για τον Ιανουάριο του 1998 (Tezari et al., 2020). Το *Diff* (%) δηλώνει την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές του DYASTIMA-R και τα δεδομένα αναφοράς.

Ιανουάριος 2002), όπου υπολογίστηκε ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 (Ιανουάριος 1998), στον Πίνακα 4.5 (Ιανουάριος 2000), και στον Πίνακα 4.6 (Ιανουάριος 2002).

Αντίστοιχα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα δεδομένα αναφοράς, ενώ με μπλε χρώμα οι τιμές του $dH^*(10)/dt$ που έχουν προκύψει από το DYASTIMA-R. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές αυτές με τη μορφή ραβδοδιαγράμματος, η οποία έχει προκύψει από τη σχέση:

$$Diff(\%) = \frac{H_{Model} - H_{Ref.}}{H_{Ref.}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο ανώτερο επιτρεπτό όριο απόκλισης ($\pm 30\%$).

DYASTIMA-R January 2000

R_C (GV)	FL310		FL350		FL390	
	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)
0	3.3	-17.4	4.4	-15.6	5.7	-10.9
1	3.3	-15.7	4.5	-12.5	5.5	-12.6
2	3.1	-16.6	4.3	-11.0	5.2	-13.4
3	2.9	-16.6	3.7	-18.5	5.6	-18.4
4	2.5	-22.8	3.5	-16.7	4.1	-22.1
5	2.4	-20.7	3.1	-21.1	3.7	-22.9
6	2.1	-25.7	2.7	-26.1	3.2	-27.1
7	1.8	-27.8	2.3	-30.1	2.8	-30.1
8	1.6	-29.1	2.1	-29.2	2.6	-27.3
9	1.5	-30.6	2.0	-27.4	2.3	-31.7
10	1.4	-31.7	1.7	-31.0	2.1	-29.9
11	1.2	-35.7	1.6	-29.8	1.9	-32.4
12	1.1	-33.5	1.5	-34.1	1.7	-34.4
13	1.0	-38.5	1.3	-37.6	1.6	-36.4
14	1.0	-40.4	1.2	-38.2	1.5	-37.8
15	0.9	-40.3	1.1	-39.6	1.4	-40.5
16	0.9	-42.6	1.0	-41.8	1.3	-42.1
17	0.8	-43.8	1.0	-42.0	1.2	-43.2

Πίνακας 4.5: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης FL310, FL350 και FL390, για τον Ιανουάριο του 2000 (Tezari et al., 2020). Το *Diff* (%) δηλώνει την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές του DYASTIMA-R και τα δεδομένα αναφοράς.

Πιο συγκεκριμένα, για το έτος 1998 (Σχήμα 4.3) το οποίο αντιστοιχεί στην ανοδική φάση του ηλιακού κύκλου 23, παρατηρείται πως οι τιμές που δίνει το DYASTIMA-R είναι σχεδόν ίδιες με τα δεδομένα αναφοράς έως και τα 2 GV (υψηλά γεωγραφικά πλάτη με απόκλιση που δεν υπερβαίνει το 12%. Η ποσοστιαία διαφορά αυξάνεται με την αύξηση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας και κυμαίνεται μεταξύ 30% και 40% στο εύρος 10 GV έως 2 GV. Η απόκλιση αυτή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του υψηλότερου εξεταζόμενου υψομέτρου πτήσης FL390.

Στη συνέχεια, για το έτος 2000 (Σχήμα 4.4), το οποίο αντιστοιχεί συνθήκες υψηλής ηλιακής δραστηριότητας (με βάση τις μέσες τιμές ηλιακών κηλίδων ως μέγιστου του ηλιακού κύκλου 23 θεωρείται το 2001), η απόκλιση μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν με το DYASTIMA-R και τα δεδομένα αναφοράς είναι σχεδόν σταθερή σε όλο το εύρος τιμών μαγνητικής δυσκαμψίας.

Τέλος, για το έτος 2002 (Σχήμα 4.5), το οποίο είναι αμέσως μετά το ηλιακό μέγιστο, παρατηρείται μία αρκετά καλή προσέγγιση μεταξύ των τιμών του DYASTIMA-R και των δεδομένων

DYASTIMA-R January 2002

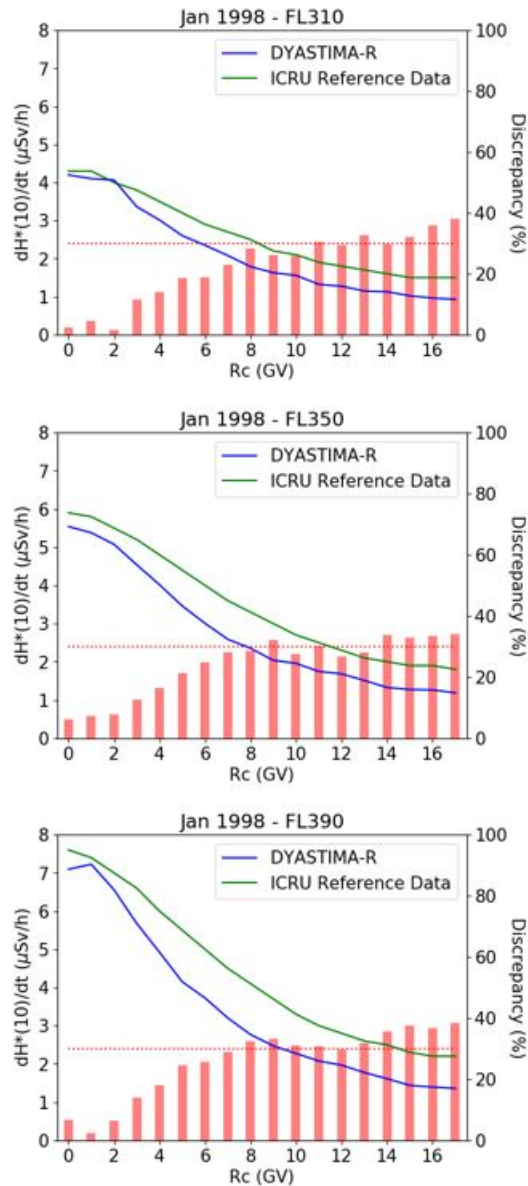
R_C (GV)	FL310		FL350		FL390	
	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)	$dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)	Diff (%)
0	3.3	-10.2	4.5	-4.1	5.2	-8.5
1	3.2	-11.5	4.3	-6.9	5.3	-5.5
2	3.0	-11.1	3.9	-10.2	5.1	-3.8
3	2.8	-14.6	3.9	-5.5	4.7	-6.6
4	2.4	-20.5	3.3	-15.1	3.9	-16.1
5	2.3	-28.6	2.9	-19.5	3.7	-14.7
6	2.0	-25.0	2.6	-19.8	3.1	-22.0
7	1.8	-25.1	2.3	-24.7	2.7	-27.6
8	1.6	-25.6	2.1	-23.8	2.5	-26.4
9	1.5	-30.8	1.9	-26.4	2.2	-29.5
10	1.3	-31.9	1.7	-28.1	2.0	-30.4
11	1.2	-32.7	1.6	-27.1	1.9	-30.4
12	1.2	-29.9	1.5	-30.5	1.7	-33.0
13	1.1	-36.7	1.4	-31.8	1.6	-34.1
14	1.1	-37.0	1.2	-37.4	1.5	-32.9
15	0.9	-38.7	1.2	-37.7	1.4	-38.2
16	0.9	-42.1	1.1	-37.7	1.3	-42.2
17	0.8	-42.5	1.0	-43.2	1.2	-43.5

Πίνακας 4.6: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 17 GV για τρία επίπεδα πτήσης FL310, FL350 και FL390, για τον Ιανουάριο του 1998 (Tezari et al., 2020). Το *Diff* (%) δηλώνει την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές του DYASTIMA-R και τα δεδομένα αναφοράς.

αναφοράς, ιδιαίτερα στις πολικές περιοχές με δυσκαμψίες 0 GV έως 3 GV. Επιπλέον, η απόκλιση είναι σημαντικά χαμηλότερη με αυτή που παρατηρείται τα έτη 1998 και 2000, με τις τιμές του DYASTIMA-R να βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα δεδομένα αναφοράς έως και τα 12 GV.

Από τα Σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5, παρατηρούμε εύκολα πως σε τιμές κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας 0 – 10 GV, δηλαδή σε πολικά, μεγάλα και μεσαία γεωγραφικά πλάτη, οι υπολογισμένες με το DYASTIMA-R βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τα δεδομένα αναφοράς, χωρίς να γίνεται υπέρβαση της αποδεκτής αβεβαιότητας του 30%, όπως προτείνεται και από την Έκθεση 84. Αξίζει να σημειωθεί πως οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν περίπου στο 75% της συνολικής επιφάνειας της Γης.

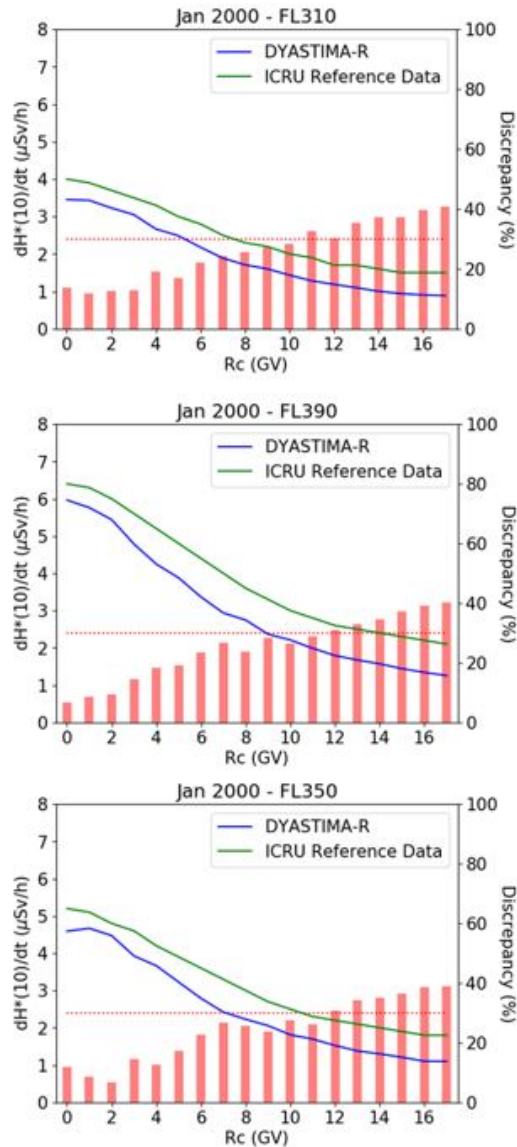
Πάνω από τα 10 GV, δηλαδή στις ισημερινές περιοχές, παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση, με μέγιστη αβεβαιότητα περίπου το 42%, πιθανώς λόγω του πιο περίπλοκου γεωμαγνητικού πεδίου κοντά στις περιοχές του Ισημερινού. Οι περιοχές αυτές δεν παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον από



Σχήμα 4.3: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R (μπλε) και τα δεδομένα αναφοράς (πράσινο) για τον Ιανουάριο 1998. Το ραβδόγραμμα δίνει την ποσοστιαία διαφορά, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη μέγιστη αποδεκτή απόκλιση (Tezari et al., 2019).

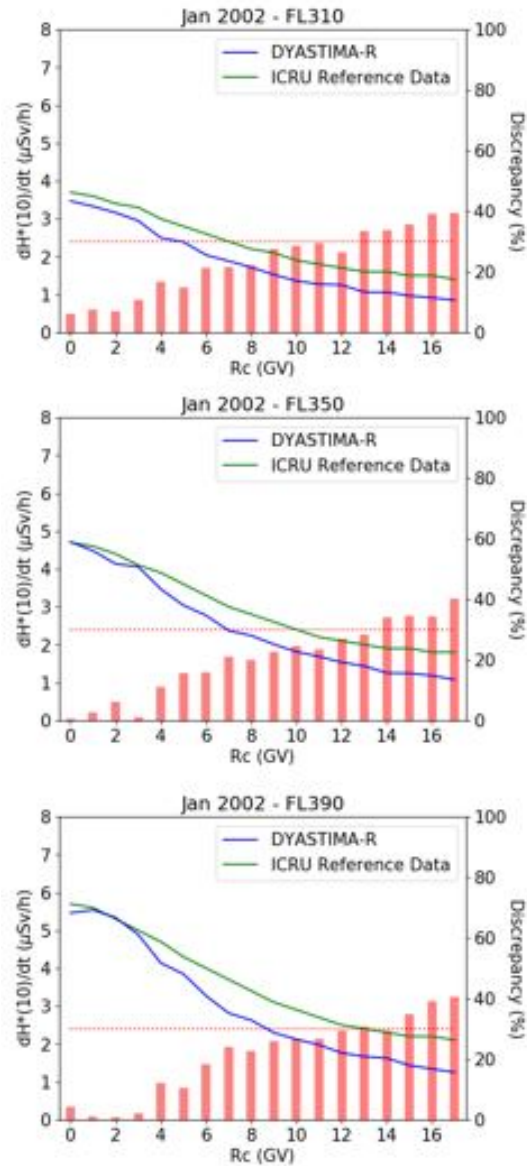
βιολογική σκοπιά, καθώς κυριαρχεί η θωράκιση από το γεωμαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα οι δόσεις ακτινοβολίας να είναι έτσι κι αλλιώς πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τις πολικές περιοχές.

Η απόκλιση που παρατηρείται σε όλα τα σενάρια πτήσης που εξετάζονται εδώ μπορεί επίσης να αποδοθεί στις παραμέτρους εισόδου της εκάστοτε προσομοίωσης, καθώς τόσο το ατμοσφαιρικό προφίλ όσο και το πρωτογενές φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας βασίζονται σε διαφορετικά



Σχήμα 4.4: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R (μπλε) και τα δεδομένα αναφοράς (πράσινο) για τον Ιανουάριο 2000. Το ραβδόγραμμα δίνει την ποσοστιαία διαφορά, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη μέγιστη αποδεκτή απόκλιση (Tezari et al., 2019).

μοντέλα. Για παράδειγμα, η ISA δεν είναι κατάλληλη για χρήση στις πολικές και ισημερινές περιοχές, καθώς βασίζεται σε μέσες καιρικές συνθήκες για τη μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Αντίστοιχα, άλλα μοντέλα ατμόσφαιρας, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τη σχέση θερμοκρασίας-υψομέτρου για τη γήινη ατμόσφαιρα, είναι ημι-εμπειρικά. Επιπλέον, δεδομένου ότι το φάσμα των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων μπορεί να προκύψει μέσω διαφόρων μοντέλων και εργαλείων λογισμικού, σημαντικές διαφορές μπορεί να υπάρχουν όχι μόνο στις



Σχήμα 4.5: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R (μπλε) και τα δεδομένα αναφοράς (πράσινο) για τον Ιανουάριο 2002. Το ραβδόγραμμα δίνει την ποσοστιαία διαφορά, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη μέγιστη αποδεκτή απόκλιση (Tezari et al., 2019).

χαμηλότερες ενέργειες αλλά και σε υπολογιστικές πτυχές, όπως για παράδειγμα στον ορισμό μιας τροχιάς που να αντιστοιχεί σε μοναδικό R_c . Για αυτούς τους λόγους, το DYASTIMA / DYASTIMA-R βελτιώνεται διαρκώς ενώ παράλληλα επιδιώκεται η εύρεση των πιο κατάλληλων παραμέτρων εισόδου για την παροχή ακριβών αποτελεσμάτων.

Από την ανάλυση αυτή, συμπεραίνουμε ότι το εργαλείο DYASTIMA / DYASTIMA-R πληροί ικανοποιητικά τα κριτήρια που προτείνονται από τις ICRU / ICRP και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της έκθεσης του πληρώματος και των επιβατών αεροσκαφών σε ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία.

4.3 Σύγκριση με άλλα μοντέλα

Σύγκριση των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης του DYASTIMA-R με βάση τα δεδομένα αναφοράς πραγματοποιήθηκε και με τα αποτελέσματα της ίδιας διαδικασίας για άλλα μοντέλα που είναι ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία των πληρωμάτων αεροσκαφών. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το NAIRAS (Mertens et al., 2013, 2009, 2007), το CARI-7 (Copeland, 2017) και το AVIDOS (Latocha and Beck, 2016; Latocha et al., 2009).

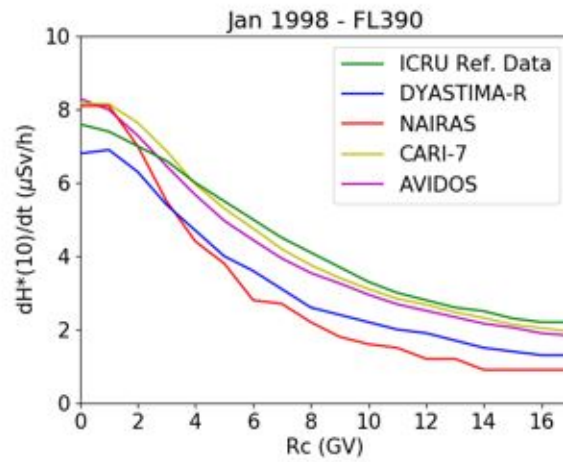
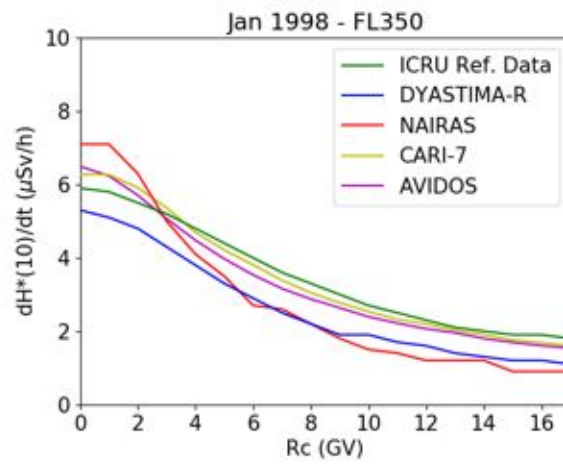
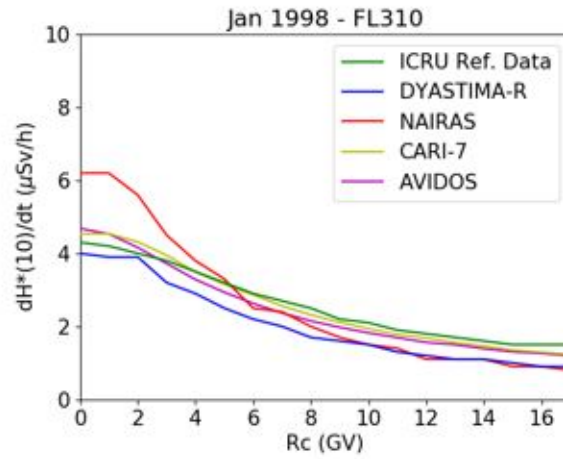
Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις τρεις χρονικές περιόδους (Ιανουάριος 1998, Ιανουάριος 2000 και Ιανουάριος 2002), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα (FL310, FL350, FL390) και για τα δεκαοχτώ κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV έως 17 GV), σύμφωνα με την Έκθεση 84 (ICRU, 2010).

Στα Σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8, παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα τα δεδομένα αναφοράς, με μπλε χρώμα οι τιμές που έχουν υπολογιστεί από το λογισμικό DYASTIMA / DYASTIMA-R, με κόκκινο χρώμα οι τιμές από το NAIRAS, με κίτρινο χρώμα οι τιμές από το CARI-7, και τέλος με μωβ χρώμα οι τιμές από το AVIDOS. Τα δεδομένα αναφοράς είναι διαθέσιμα στους Πίνακες 4.1 - 4.3 ενώ οι τιμές που έχουν προκύψει από το DYASTIMA / DYASTIMA-R στους Πίνακες 4.4 - 4.6 του κεφαλαίου αυτού.

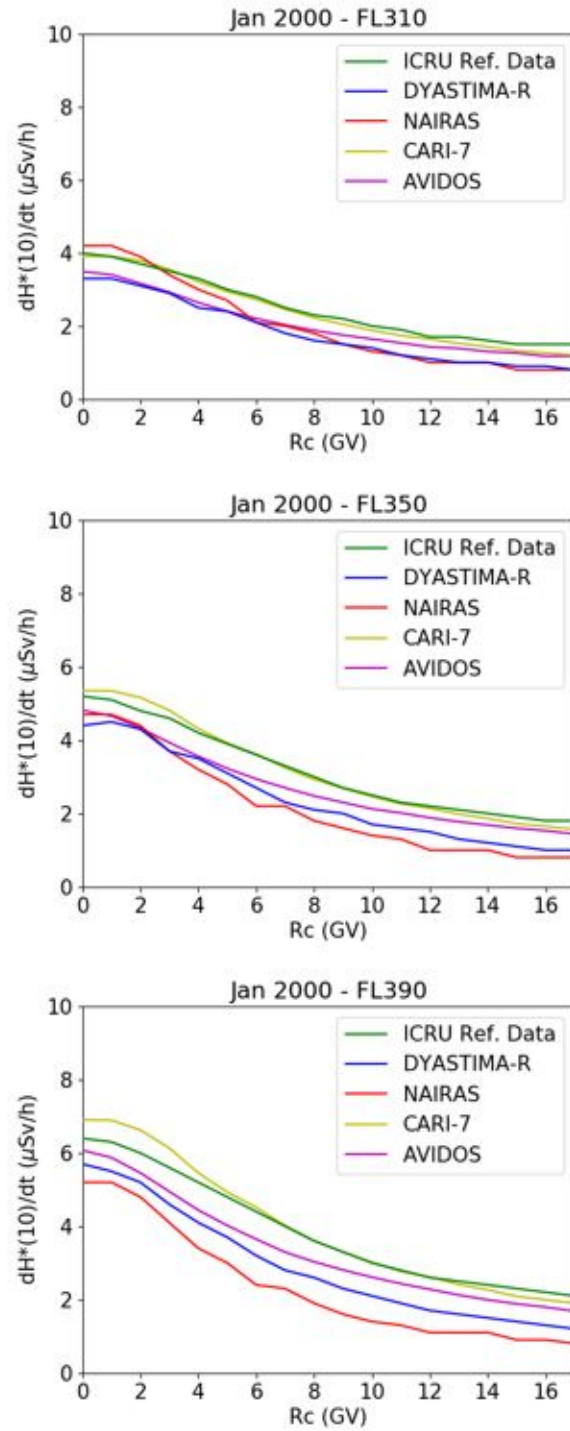
Ακόμα στα Σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11, παρουσιάζονται σε ραβδογράμματα οι αποκλίσεις των μοντέλων αυτών από τα δεδομένα αναφοράς για τα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα και κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για τις τρεις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

Παρατηρούμε πως το DYASTIMA-R δίνει σταθερά μικρότερες τιμές του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ και στα τρία ύψη και στις τρεις χρονικές περιόδους. Η απόκλιση σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς είναι μικρή για μικρές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας, ενώ γίνεται μεγαλύτερη για μεγάλες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας. Έτσι, το DYASTIMA-R είναι πιο ευαίσθητο στις πολικές περιοχές όπου καταγράφονται σωματίδια ακόμα και χαμηλότερων ενεργειών, παρά στις ισημερινές περιοχές, όπου το μαγνητικό πεδίο έχει μεγαλύτερη επίδραση.

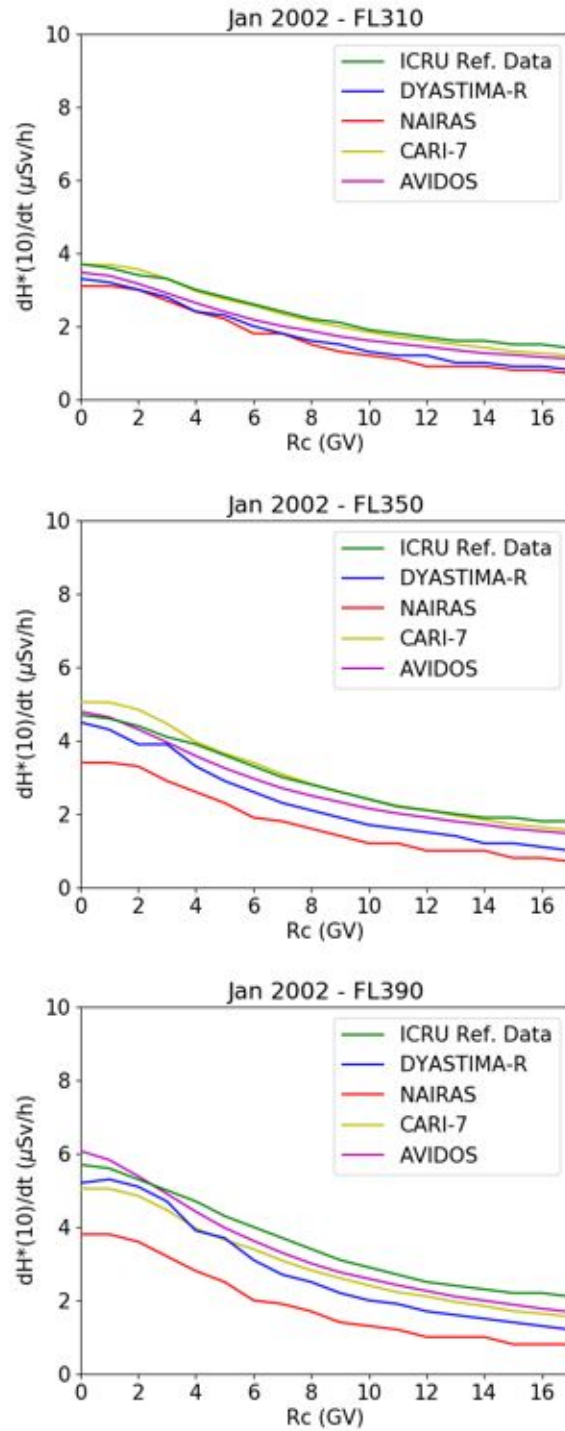
Στα Σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8, παρατηρούμε πως όλα τα μοντέλα ακολουθούν κατά βάση τα δεδομένα αναφοράς, είτε με μικρότερες είτε με μεγαλύτερες αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, είναι φανερό πως στα χαμηλά ύψη (FL310) οι αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων είναι μικρές, σε



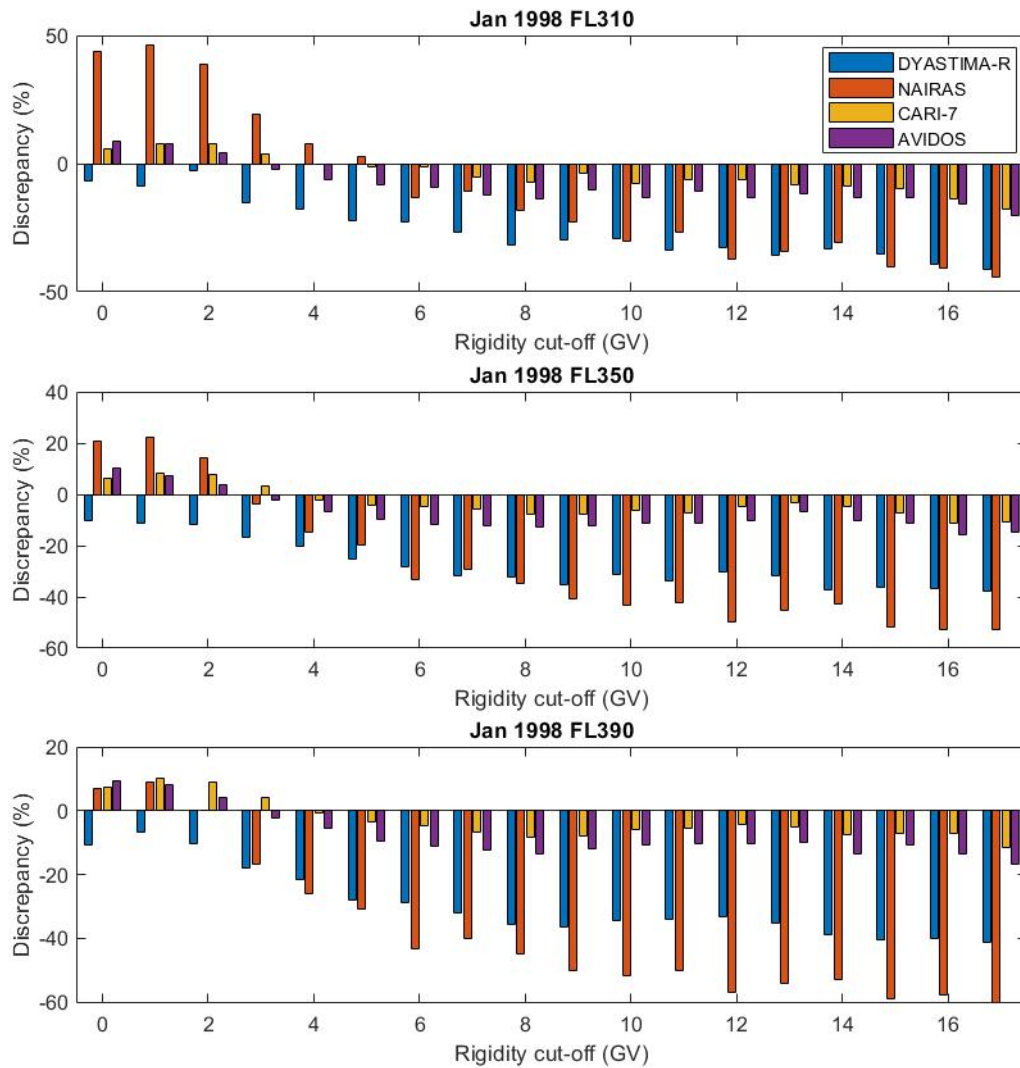
Σχήμα 4.6: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R, το NAIRAS, το CARI-7 και το AVIDOS για τον Ιανουάριο 1998. Δίνονται επίσης τα δεδομένα αναφοράς.



Σχήμα 4.7: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R, το NAIRAS, το CARI-7 και το AVIDOS για τον Ιανουάριο 2000. Δίνονται επίσης τα δεδομένα αναφοράς.

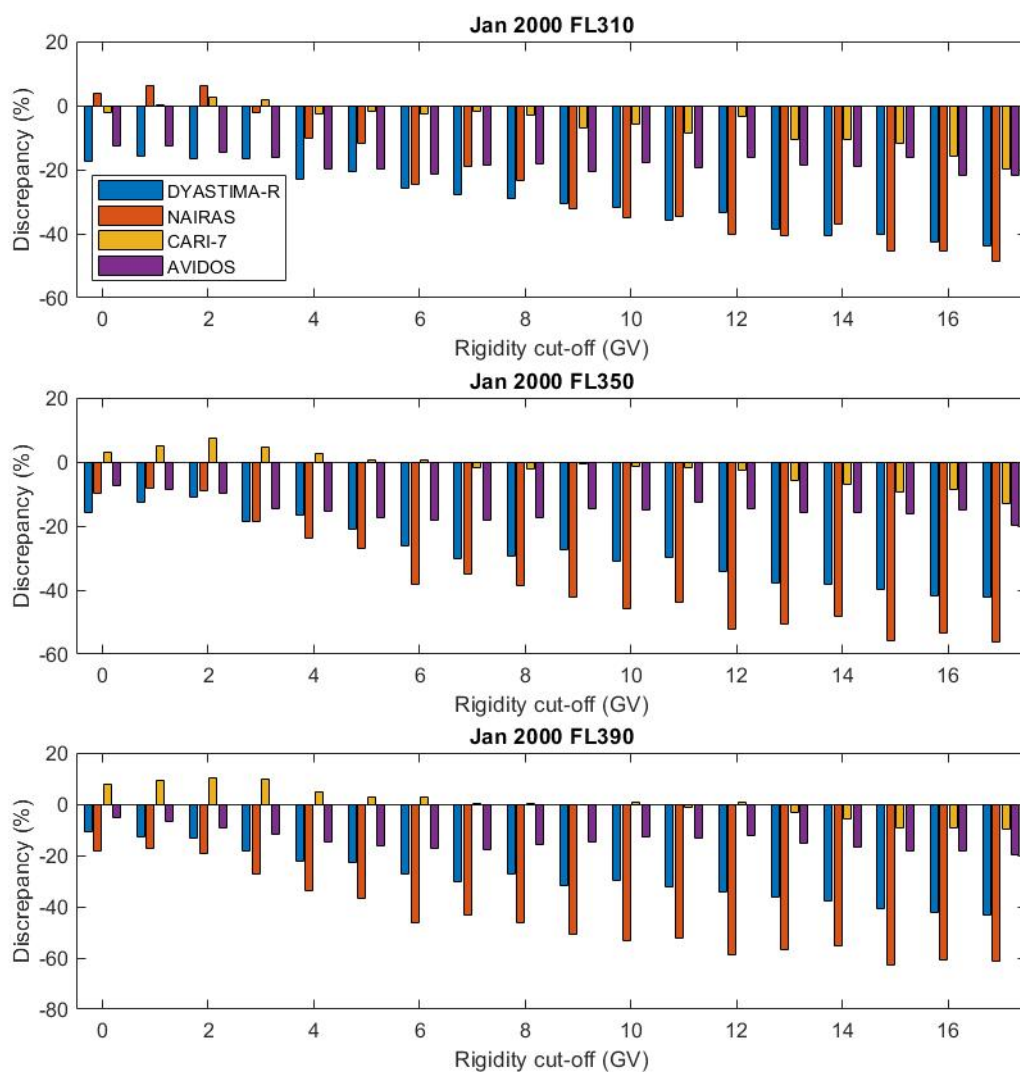


Σχήμα 4.8: Σύγκριση των τιμών $dH^*(10)/dt$ από το DYASTIMA-R, το NAIRAS, το CARI-7 και το AVIDOS για τον Ιανουάριο 2002. Δίνονται επίσης τα δεδομένα αναφοράς.



Σχήμα 4.9: Ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές των διάφορων μοντέλων και των δεδομένων αναφοράς για τον Ιανουάριο 1998.

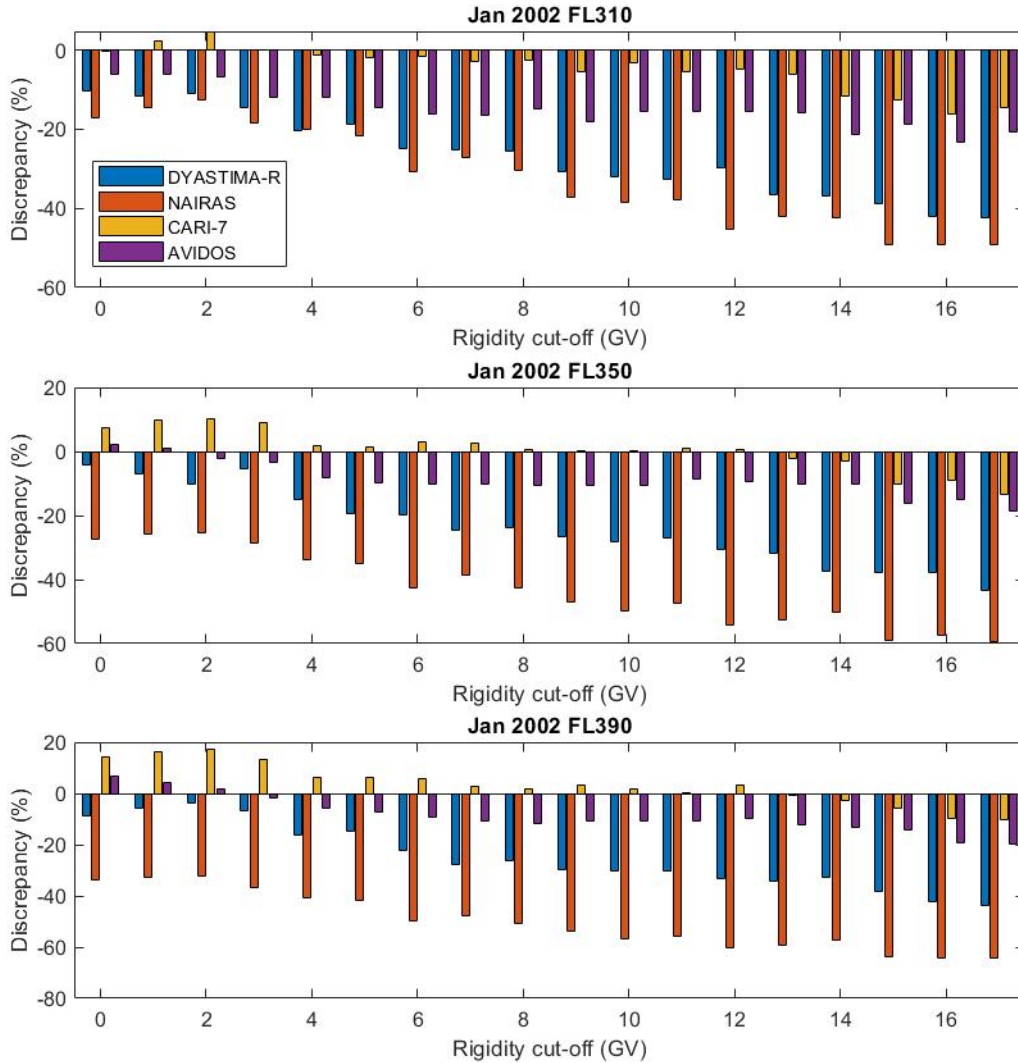
αντίθεση με τα μεγαλύτερα ύψη (FL390), όπου οι τιμές από τα διάφορα μοντέλα παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Γενικά, τα μοντέλα CARI-7 και AVIDOS παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλίσεις, με το CARI-7 να μην υπερβαίνει το 19.8%, και το AVIDOS το 23.2% αντίστοιχα. Αντίθετα, το μοντέλο NAIRAS παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις, αγγίζοντας την τιμή του 64.3%.



Σχήμα 4.10: Ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές των διάφορων μοντέλων και των δεδομένων αναφοράς για τον Ιανουάριο 2000.

Στα Σχήματα 4.9, 4.10 και 4.11, παρατηρούμε πως η πλειοψηφία των μοντέλων παρέχουν μία σταθερή υποεκτίμηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς. Εξαιρέση, παρουσιάζεται κυρίως σε μικρές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV έως 3 GV όπου τα μοντέλα NAIRAS, CARI-7 και AVIDOS παρέχουν μία υπερεκτίμηση του ρυθμού δόσης. Το NAIRAS παρουσιάζει γενικά τις μεγαλύτερες αποκλίσεις σε όλα τα ύψη για όλες τις τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας και για τις τρεις χρονικές περιόδους, ενώ αντίθετα το CARI-7 τις

μικρότερες. Το DYASTIMA-R, αντίστοιχα, παρουσιάζει μικρότερες αποκλίσεις από το NAI-RAS, και παρέχει μία καλή εκτίμηση του ρυθμού δόσης σε μικρές δυσκαμψίες, όπου άλλωστε εντοπίζεται και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τη σκοπιά της ακτινοπροστασίας. Οι αποκλίσεις του DYASTIMA-R στις περιοχές αυτές είναι άμεσα συγκρίσιμες με αυτές των άλλων μοντέλων, και σε πολλές περιπτώσεις είναι μικρότερες.



Σχήμα 4.11: Ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τιμές των διάφορων μοντέλων και των δεδομένων αναφοράς για τον Ιανουάριο 2002.

Το DYASTIMA-R δίνει γενικά καλά αποτελέσματα σε σύγκριση με ήδη προϋπάρχοντα και αξιολογημένα μοντέλα, όπως το NAIRAS, το CARI-7 και το AVIDOS, και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκτίμηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για όλο το εύρος τιμών μαγνητικής δυσκαμψίας για τα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης.

5 Εφαρμογές και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το DYASTIMA / DYASTIMA-R που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής. Αρχικά, δίνονται τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων 23 και 24 για διάφορα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα και διάφορες τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια έντονων φαινομένων του Διαστημικού Καιρού, τα οποία αποτελούν εν δυνάμει κίνδυνο τόσο για τα τεχνολογικά συστήματα στον επίγειο, εναέριο και διαστημικό χώρο, όσο και για την υγεία των πληρωμάτων αεροσκαφών και διαστημικών σκαφών. Ακόμα, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, πραγματοποιείται εκτίμηση δόσεων ακτινοβολίας για διάφορες αεροπορικές πτήσεις. Τέλος, παρουσιάζεται μία πρώτη προσπάθεια υπολογισμού δόσεων ακτινοβολίας στις ατμόσφαιρες άλλων πλανητών του ηλιακού μας συστήματος, και πιο συγκεκριμένα στην Αφροδίτη και τον Άρη.

5.1 Ηλιακοί Κύκλοι 23 & 24

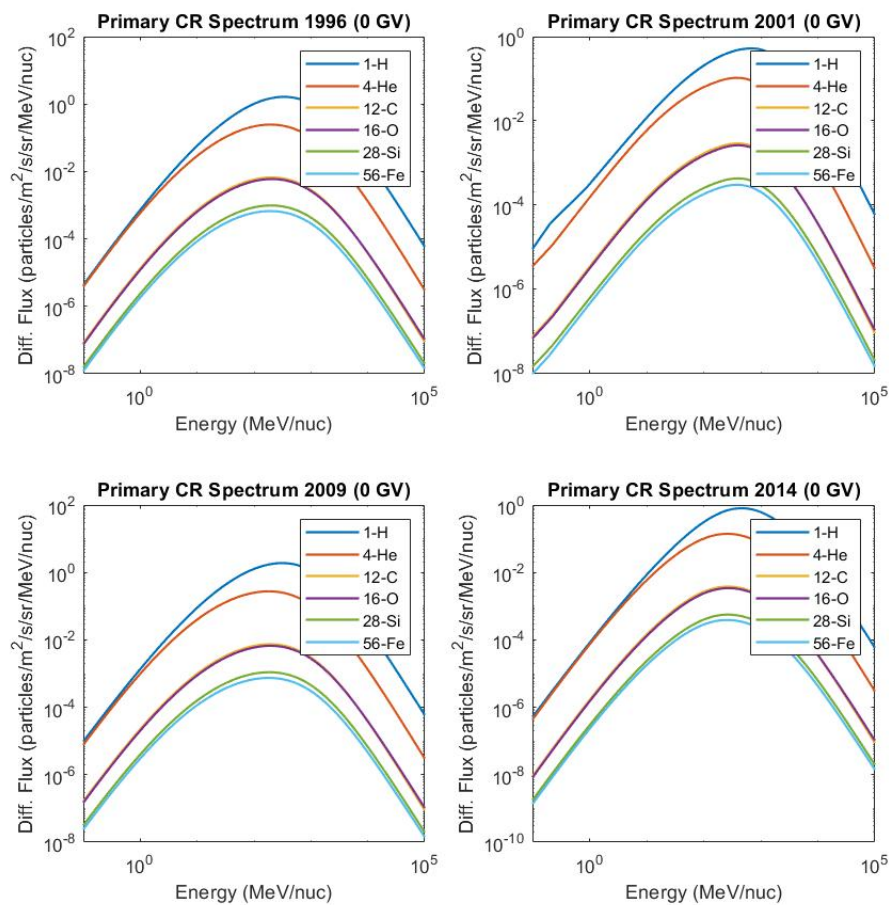
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην ατμόσφαιρα της Γης κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ηλιακών κύκλων 23 και 24, καλύπτοντας έτσι μία χρονική περίοδο 24 ετών (1996 έως 2019).

Όπως έχει αναφερθεί ήδη στο Κεφάλαιο 1, ο ηλιακός κύκλος 23 είχε διάρκεια 12.3 χρόνια, από τον Αύγουστο του 1996 έως τον Δεκέμβριο του 2008, ενώ ο ηλιακός κύκλος 24 διήρκησε από τον Δεκέμβριο του 2008 μέχρι τον Δεκέμβριο του 2019. Τα ηλιακά μέγιστα παρατηρήθηκαν το Νοέμβριο του 2001 και τον Απρίλιο του 2014, αντίστοιχα. Ο κύκλος 23 αποτελεί έναν ιδιαίτερα ενεργητικό κύκλο με πλήθος φαινομένων, ενώ αντίστοιχα ο κύκλος 24 αποτελεί έναν από τους πιο ήρεμους κύκλους με χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα. Επιπροσθέτως, ανάμεσα στους δύο αυτούς κύκλους παρατηρήθηκε ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο ελάχιστο, με ασυνήθιστα χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα κατά τα έτη 2007 έως 2009.

Το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων στα πλαίσια της εργασίας αυτής βασίζεται στο μοντέλο ISO, το οποίο έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 (ISO, 2004). Χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία *H*, *He*, *C*, *O*, *Si* και *Fe*, που παρατηρούνται στις αφθονίες της κοσμικής ακτινοβολίας. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας για διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες από το IGRF (Smart and Shea, 2008b), ενώ για τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές από την ιστοσελίδα του NOAA. Η ατμόσφαιρα περιγράφηκε από το μοντέλο ISA (ISO, 1975).

5.1.1 Φάσματα Κοσμικής Ακτινοβολίας

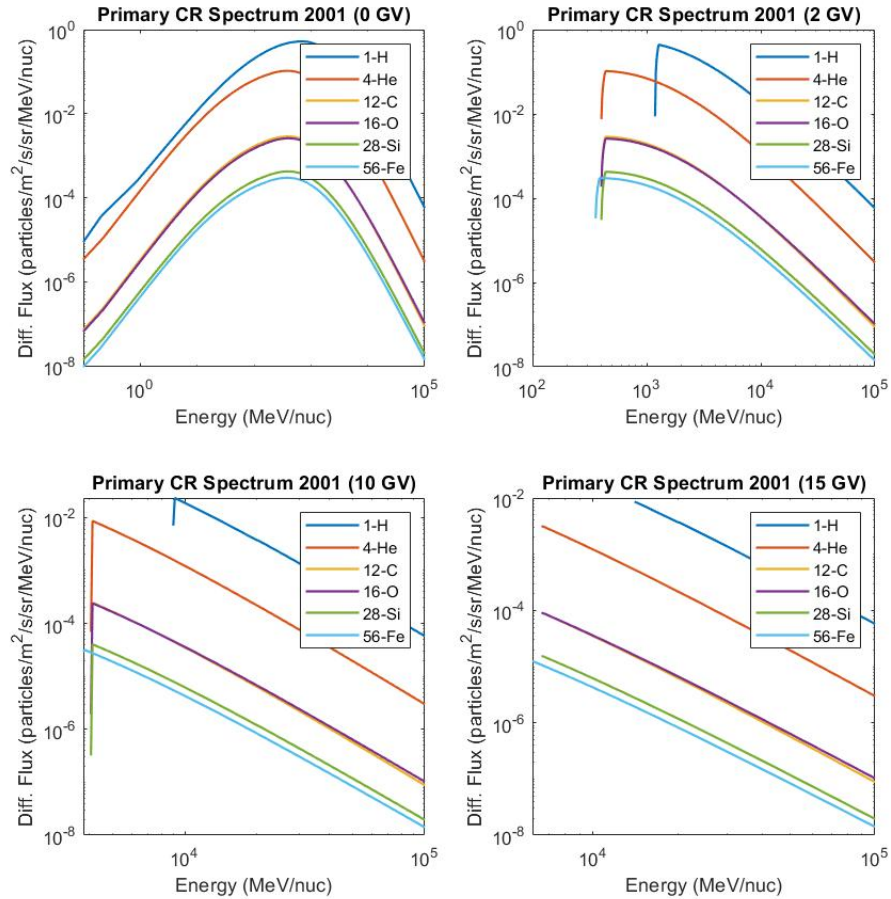
Η διαφορική ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ενέργειας των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων που φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας στις πολικές περιοχές (0 GV) για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας για τους δύο πρόσφατους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 δίνεται στο Σχήμα 5.1. Πιο συγκεκριμένα, στα πάνω διαγράμματα, παρουσιάζονται τα φάσματα των ετών 1996 και 2001, που αντιστοιχούν στο ελάχιστο και στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου 23, ενώ στα κάτω διαγράμματα, δίνονται τα φάσματα των ετών 2009 και 2014, αντίστοιχα για τον ηλιακό κύκλο 24.



Σχήμα 5.1: Φάσμα πρωτογενών κοσμικών ακτίνων με το μοντέλο ISO για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας για τον ηλιακό κύκλο 23 (επάνω) και τον ηλιακό κύκλο 24 (κάτω) για κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV.

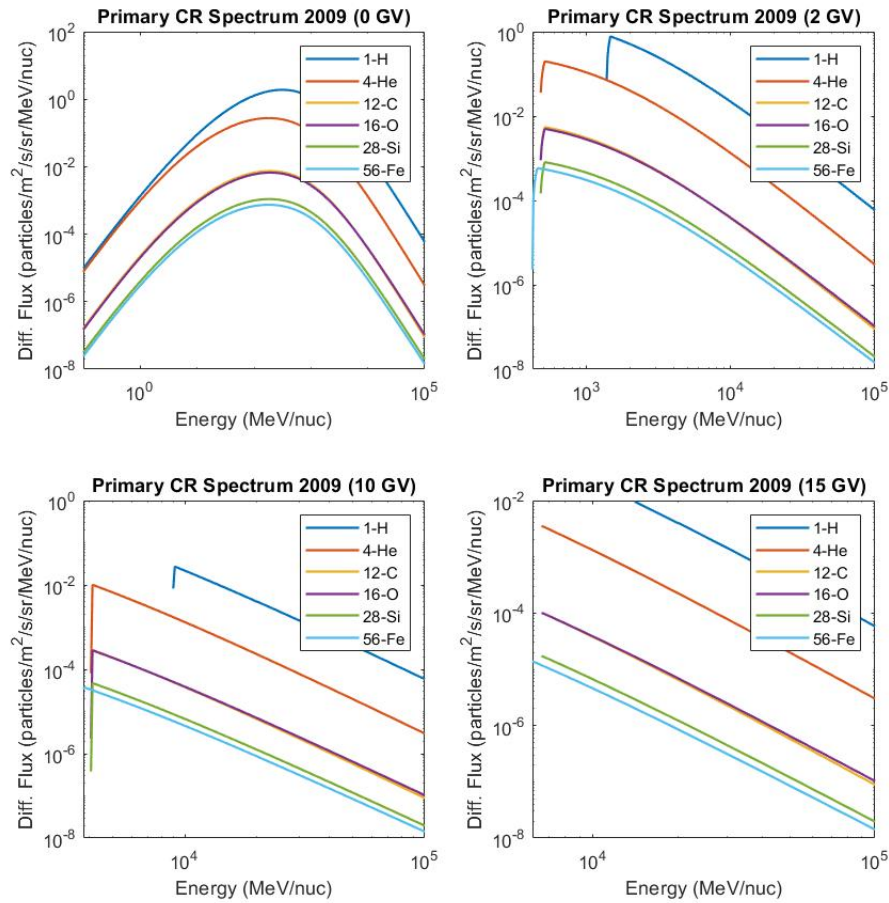
Σε συνθήκες μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (έτη 2001 και 2014), παρατηρούμε μία με-

τατόπιση του μεγίστου της διαφορικής ροής των πρωτογενών σωματιδίων προς μεγαλύτερες ενέργειες από το ελάχιστο προς το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας. Αυτό συμβαίνει καθώς κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου, λαμβάνουν χώρα έντονα ηλιακά φαινόμενα, όπως ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας, με αποτέλεσμα να εκπέμπονται σωματίδια υψηλότερων ενεργειών. Αντίθετα, η διαφορική ροή παίρνει τις μέγιστες τιμές της κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου, γεγονός που οφείλεται στην αρνητική συσχέτιση της ηλιακής δραστηριότητας με την ένταση των κοσμικών ακτίνων (Forbush, 1958). Ειδικότερα, κατά το έτος 2014 παρατηρείται ελαφρώς υψηλότερη διαφορική ροή σε σχέση με το έτος 2001. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο τελευταίος ηλιακός κύκλος 24 είναι κύκλος χαμηλής δραστηριότητας και έντασης, σε αντίθεση με τον ιδιαίτερα ενεργό ηλιακό κύκλο 23 (Mavromichalaki et al., 2005b; Paouris et al., 2012; Tomova et al., 2017).



Σχήμα 5.2: Μεταβολή του φάσματος πρωτογενών ακτίνων ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (έτος 2001).

Στα Σχήματα 5.2 και 5.3, δίνεται η μεταβολή του φάσματος των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων που φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας για το 2001 (ηλιακό μέγιστο) και το 2009 (ηλιακό ελάχιστο), αντίστοιχα.

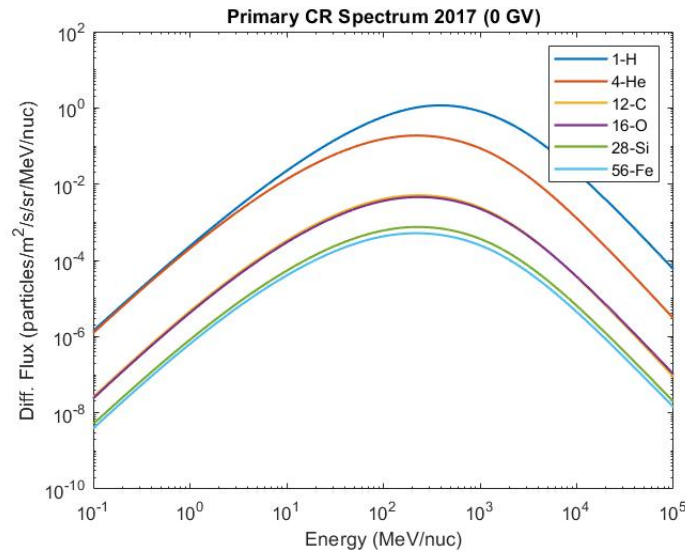


Σχήμα 5.3: Μεταβολή του φάσματος πρωτογενών ακτίνων ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (έτος 2009).

Παρατηρούμε πως με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, μόνο σωματίδια με μεγάλες ενέργειες εισέρχονται στην ατμόσφαιρα της Γης. Στις πολικές περιοχές (0–2 GV), οι δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου είναι ‘ανοιχτές’, με αποτέλεσμα να καταγράφονται σωματίδια ακόμα και με μικρές ενέργειες. Αντίθετα, προς τον Ισημερινό, τα σωματίδια μικρών ενεργειών ‘αποκόπτονται’ από το γεωμαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές τόσο σε συνθήκες μέγιστης όσο και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (Mertens et al., 2012).

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 5.4 δίνεται το φάσμα για το έτος 2017, το οποίο ανήκει στην καθοδική

φάση του ηλιακού κύκλου 24. Καθώς η ηλιακή δραστηριότητα ελαττώνεται, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυξάνεται, με αποτέλεσμα να παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, μία υψηλότερη ροή σε σχέση με το μέγιστο του έτους 2014.



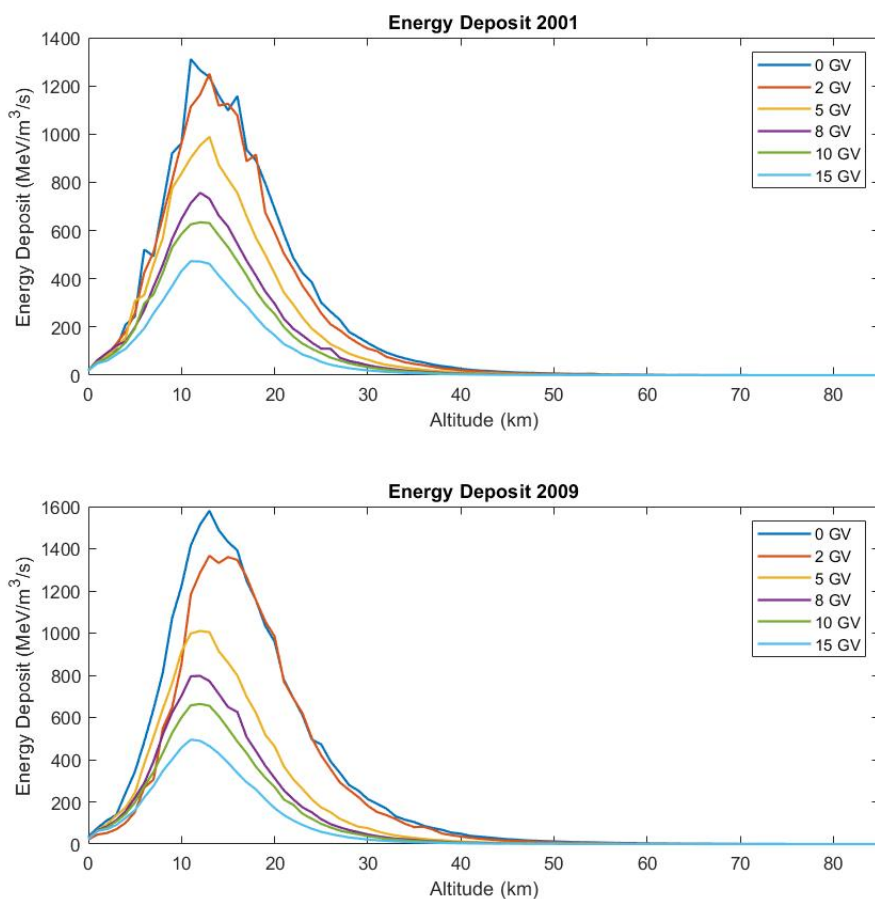
Σχήμα 5.4: Φάσμα πρωτογενών ακτίνων με το μοντέλο ISO για το έτος 2017 για κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV.

Σημειώνεται ότι σε όλα Σχήματα (5.1, 5.2, 5.3 και 5.4) παρατηρούμε πως το *H* και το *He* εμφανίζουν υψηλότερες ενέργειες και ροές, καθώς βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στις κοσμικές ακτίνες σε σχέση με τα άλλα σωματίδια (Longair, 2011).

5.1.2 Ενεργειακή Εναπόθεση

Μέσω των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με το εργαλείο DYASTIMA, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που εναποτίθεται μέσα στην ατμόσφαιρα από τα δευτερογενή κοσμικά σωματίδια για διάφορες συνθήκες ηλιακής δραστηριότητας.

Η ενεργειακή εναπόθεση στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα για συνθήκες μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας παρουσιάζεται στο 5.5 (αριστερά), καθώς το έτος 2001 αντιστοιχεί στο μέγιστο του ηλιακού κύκλου 23. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ενεργειακή εναπόθεση συμβαίνει στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (μικρές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας), ενώ η εναπόθεση μειώνεται πηγαίνοντας σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη και ισημερινές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, η εναποτιθέμενη ενέργεια στα 0 GV και στα 2 GV είναι σχεδόν ταυτόσημες, ενώ αντίστοιχα η ενέργεια που εναποτίθεται στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα λόγω του καταιγιισμού μειώνεται με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, εξαιτίας της αποκοπής σωματιδίων από το



Σχήμα 5.5: Ενεργειακή εναπόθεση ως συνάρτηση του ατμοσφαιρικού υψομέτρου, για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας για τα έτη 2001 (ηλιακό μέγιστο) και 2009 (ηλιακό ελάχιστο).

γεωμαγνητικό πεδίο.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για στο έτος 2009, το οποίο αντιστοιχεί στις συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας ανάμεσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (Σχήμα 5.5, δεξιά). Η εναπόθεση στα 2 GV είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με τα 0 GV, ενώ αντίστοιχα η ενέργεια για μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας παρουσιάζεται μειωμένη. Το ποσοστό μείωσης για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα 0 GV για τα έτη 2001 και 2009 δίνεται στον Πίνακα 5.1. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά των τιμών μεταξύ των ετών 2001 και 2009 για τις διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας. Κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης για τις διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας σε σχέση με τις συνθήκες μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας το

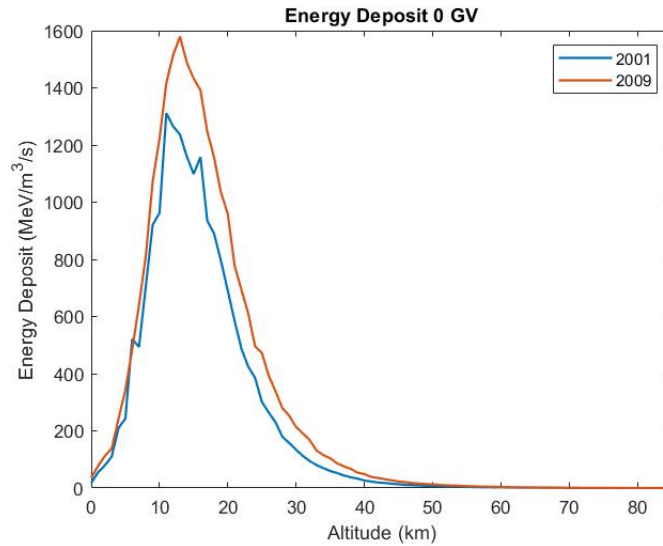
Rc (GV)	2001	2009	2001 - 2009
	% Μείωση σε σχέση με τα 0GV	% Μείωση σε σχέση με τα 0GV	% Διαφορά
0	-	-	17.0
2	4.6	13.5	8.5
5	24.6	36.1	2.1
8	42.3	49.5	5.1
10	51.6	58.0	4.5
15	64.0	68.7	4.5

Πίνακας 5.1: Ποσοστιαία μείωση της εναπόθεσης ενέργειας λόγω του ατμοσφαιρικού καταιγισμού για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα 0GV για τα έτη 2001 και 2009, καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της ενεργειακής απόθεσης για τα αντίστοιχα έτη.

2001. Αντίστοιχα, παρατηρείται πως η εναποτιθέμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη πρακτικά για όλες τις τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας το 2009 σε σχέση με το 2001. Πιο συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση παρατηρείται στα 0GV σε ποσοστό 17%, ενώ η μικρότερη απόκλιση παρατηρείται σε μικρά γεωγραφικά πλάτη (10GV–15GV) σε ποσοστό 4.5%.

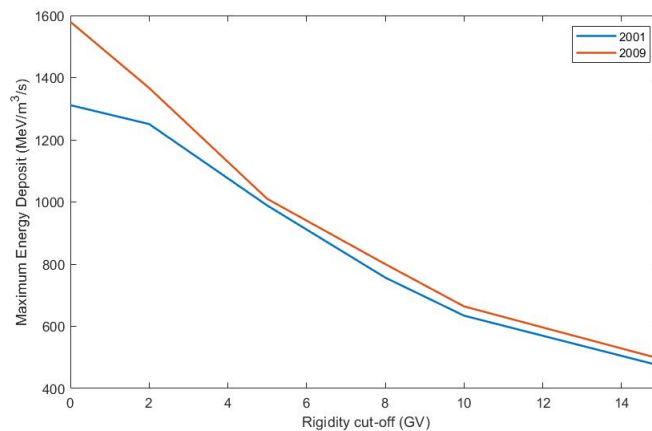
Η εναπόθεση ενέργειας για τα 0GV για τα έτη 2001 και 2009 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6. Συγκρίνοντας τις τιμές, παρατηρούμε πως το 2009, δηλαδή σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, η εναποτιθέμενη ενέργεια μέσα στην ατμόσφαιρα είναι υψηλότερη σε σχέση με το 2001. Αυτό οφείλεται στην αντισυσχέτιση που παρουσιάζεται μεταξύ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και της ηλιακής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα το 2009 να υπάρχει υψηλότερη ροή γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Παρατηρούμε, επίσης, πως η κορυφή της καμπύλης είναι πιο πεπλατυσμένη στο ηλιακό μέγιστο, πιθανόν εξαιτίας της ιδιομορφίας που παρουσιάζει ο ηλιακός κύκλος 23.

Στο Σχήμα 5.7, αναπαρίσταται γραφικά η μέγιστη εναπόθεση ενέργειας λόγω των δευτερογενών σωματιδίων ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας. Παρατηρούμε πως στο ηλιακό μέγιστο 2001, η εναπόθεση ενέργειας είναι σχεδόν σταθερή από 0GV έως 2GV, το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της σχεδόν σταθερής απορρόφησης σωματιδίων στις πολικές περιοχές, ενώ μειώνεται στις μεγαλύτερες δυσκαμψίες. Με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, δηλαδή πηγαίνοντας προς τις ισημερινές περιοχές, το γεωμαγνητικό πεδίο συμπεριφέρεται ως ασπίδα ενάντια στα φορτισμένα σωματίδια, λειτουργώντας ως φασματογράφος μάζας και ενέργειας. Καθώς ένα πρωτογενές κοσμικό σωματίδιο πλησιάζει προς τη Γη, η τροχιά του κάμπτεται λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου. Αν το σωματίδιο συγκρουστεί με ένα μόριο της ατμόσφαιρας, οδηγώντας έτσι σε έναν ατμοσφαιρικό καταιγισμό, καθένα από τα δευτερογενή σωματίδια θα υποστούν επίσης παραμόρφωση της τροχιάς τους. Η κάμψη αυτή αυξάνει την πιθανότητα τα σωματίδια να ανακλαστούν στο γεωμαγνητικό πεδίο, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη μέση διαδρομή



Σχήμα 5.6: Σύγκριση της ενεργειακής εναπόθεσης στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα για μαγνητική δυσκαμψία 0 GV για διαφορετικές συνθήκες ηλιακής δραστηριότητας.

του καταιγισμού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα τα σωματίδια να φτάσουν σε χαμηλά ατμοσφαιρικά υψόμετρα (Ziegler, 1998). Στο ηλιακό ελάχιστο 2009 παρατηρείται ακόμα κι από τις πολικές περιοχές μία σχεδόν εκθετική μείωση της εναποτιθέμενης ενέργειας.



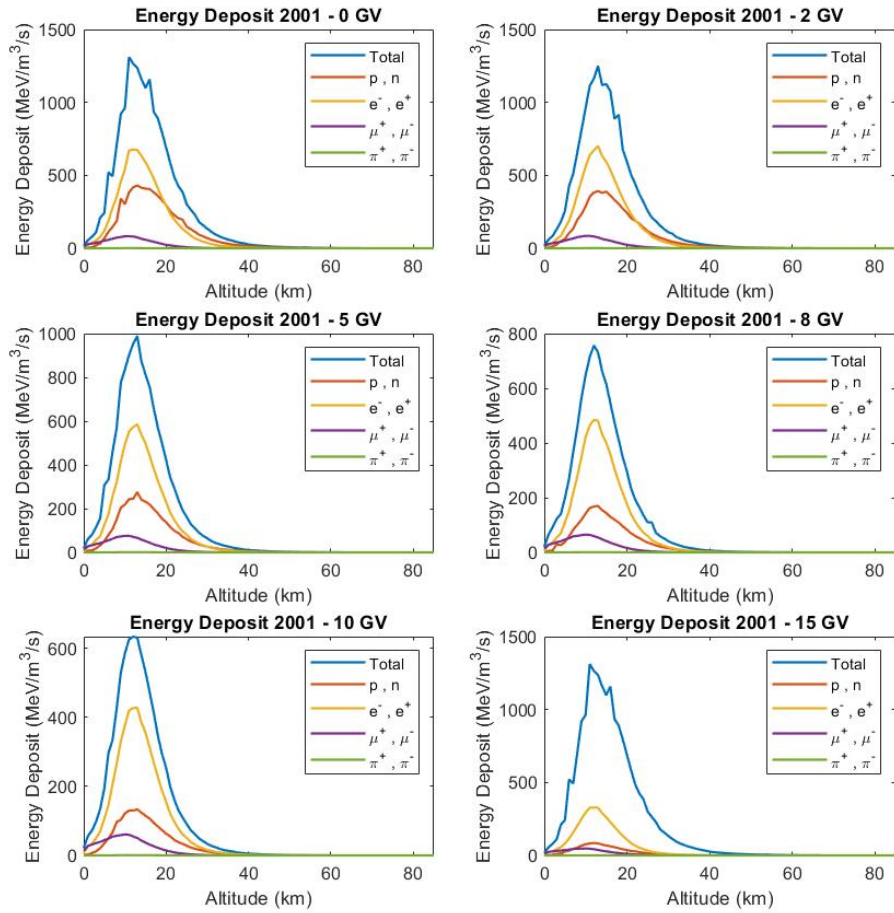
Σχήμα 5.7: Σύγκριση της ενεργειακής εναπόθεσης στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα για μαγνητική δυσκαμψία 0 GV για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας.

Σημειώνεται και στις δύο περιπτώσεις, πως η εναπόθεση ενέργειας ξεκινά περίπου σε ύψος 45 km, ενώ παίρνει τη μέγιστη τιμή της περίπου στα 12 km έως 15 km από την επιφάνεια της Γης. Από εκεί και κάτω, η εναπόθεση ενέργειας λόγω του καταιγισμού μειώνεται σχεδόν εκθετικά, μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Γενικά, λιγότερο από το 1% των πρωτογενών γαλαξιακών σω-

ματιδίων μπορούν να δημιουργήσουν καταιγισμό που να φτάνει στη στάθμη της θάλασσας, ενώ οι καταιγισμοί δεν συνεχίζουν να αυξάνονται σε μέγεθος καθώς διεισδύουν στην ατμόσφαιρα, εξαιτίας πολλών μηχανισμών απορρόφησης. Τα περισσότερα από τα σωματίδια είτε αποσυντίθενται αυθόρμητα (για παράδειγμα τα πιόνια έχουν μέσο χρόνο ζωής μερικά νανοδευτερόλεπτα, τα μίονια περίπου ενός μικροδευτερολέπτου) είτε χάνουν ενέργεια και φτάνουν σε θερμικές ενέργειες πριν φτάσουν στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να χάνονται από τον καταιγισμό.

Με την αύξηση του ατμοσφαιρικού βάθους, ο καταιγισμός των δευτερογενών σωματιδίων εξελίσσεται έως ότου επιτευχθεί το λεγόμενο μέγιστο Pfozter (Regener and Pfozter, 1935). Στο σημείο αυτό εμφανίζεται και η μέγιστη πυκνότητα του καταιγισμού, περίπου στα 15 km, ακριβώς πάνω από τα συνήθη υψόμετρα πτήσης των αεροπλάνων (Ziegler, 1998). Μετά το μέγιστο Pfozter, η μέση ενέργεια των δευτερογενών σωματιδίων δεν επαρκεί για να οδηγήσει σε περαιτέρω παραγωγή νέων δευτερογενών σωματιδίων. Κατά συνέπεια, ο καταιγισμός αρχίζει να μειώνεται μετά την επίτευξη αυτού του σημείου. Το μέγιστο Pfozter και το μέγιστο του ατμοσφαιρικού ιονισμού που προκαλείται από την κοσμική ακτινοβολία συμπίπτουν. Στη Γη, αυτό το μέγιστο εμφανίζεται σε υψόμετρα μεταξύ 16 km και 25 km, ανάλογα με την ισχύ του γεωμαγνητικού πεδίου και την ηλιακή δραστηριότητα (Herbst et al., 2020). Έτσι, κάτω από αυτό, υπάρχει μια καθαρή απώλεια των αδρονίων από τον καταιγισμό. Τα 15 km αποτελούν επίσης το τυπικό ύψος στο οποίο παράγονται τα δευτερογενή μίονια, τα οποία αποτελούν τα πολυπληθέστερα φορτισμένα σωματίδια στη στάθμη της θάλασσας (περίπου το 80% της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας). Τα μίονια χάνουν ενέργεια μέσα στην ατμόσφαιρα έως και 2 GeV λόγω ιονισμού. Για το λόγο αυτό, απαγορεύονται οι αεροπορικές πτήσεις στα υψόμετρα αυτά (Biermann et al., 1995; Gaisser and Stanev, 1995).

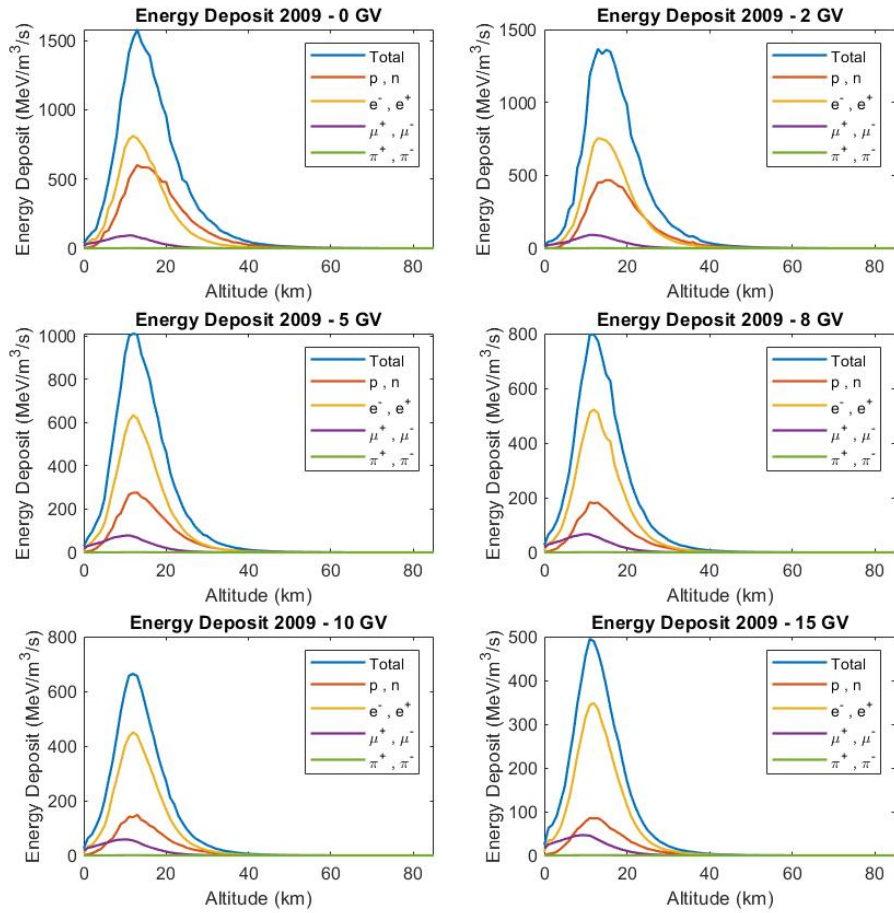
Η συνεισφορά των βασικών συνιστωσών του καταιγισμού στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (2001 και 2009 αντίστοιχα) παρουσιάζεται στα 5.8 και 5.9. Οι κυριότερες συνιστώσες είναι η αδρονική (πρωτόνια p , νετρόνια n), τα λεπτόνια ηλεκτρόνιο (e^-) και ποζιτρόνιο (e^+), τα μίονια και τα αντισωματία τους (μ^+ , μ^-) και τα πιόνια (π^+ , π^-) (Gaisser and Stanev, 1995). Ο καταιγισμός περιέχει και άλλα σωματίδια, όπως φωτόνια (γ), σωματία α , καόνια και μερικά βαρύτερα ιόντα, που όμως λόγω του μικρού πληθυσμού τους, δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην εναπόθεση ενέργειας στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα. Παρατηρούμε πως τα ηλεκτρόνια και τα αδρόνια είναι αυτά που συνεισφέρουν ως επί το πλείστον στην εναπόθεση ενέργειας μέσα στην ατμόσφαιρα, ενώ τα μίονια και τα πιόνια έχουν πολύ μικρότερη συνεισφορά.



Σχήμα 5.8: Ενεργειακή εναπόθεση ως συνάρτηση του ατμοσφαιρικού υψομέτρου, για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας για τις κυριότερες συνιστώσες του καταιγισμού για το έτος 2001, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ηλιακού μεγίστου.

Rc (GV)	p, n (%)	e ⁻ , e ⁺ (%)	μ ⁻ , μ ⁺ (%)	π ⁻ , π ⁺ (%)	Άλλα (%)
0	29.3	51.1	6.3	0.1	13.2
2	31.4	56.0	6.0	0.1	6.5
5	27.8	59.2	6.7	0.1	6.1
8	22.1	64.0	7.9	0.1	5.9
10	20.5	67.3	8.7	0.1	3.4
15	17.4	69.2	9.7	0.1	3.6

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία συνεισφορά των κύριων συνιστωσών του καταιγισμού στη συνολική μέγιστη εναπόθεση ενέργειας για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για το 2001.



Σχήμα 5.9: Ενεργειακή εναπόθεση ως συνάρτηση του ατμοσφαιρικού υψομέτρου, για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας για τις κυριότερες συνιστώσες του καταγισμού για το έτος 2009, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου.

Rc (GV)	p, n (%)	e ⁻ , e ⁺ (%)	μ ⁻ , μ ⁺ (%)	π ⁻ , π ⁺ (%)	Άλλα (%)
0	38.0	50.2	5.2	0.1	6.5
2	33.0	55.2	6.5	0.1	5.2
5	27.2	62.7	7.3	0.1	2.7
8	22.5	65.6	7.5	0.1	4.3
10	21.0	67.8	8.2	0.1	2.9
15	17.2	69.4	9.1	0.1	4.1

Πίνακας 5.3: Ποσοστιαία συνεισφορά των κύριων συνιστωσών του καταγισμού στη συνολική μέγιστη εναπόθεση ενέργειας για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για το 2009.

Η ποσοστιαία συνεισφορά κάθε συνιστώσας για τα έτη 2001 και 2009 παρουσιάζονται αντίστοιχα στους Πίνακες 5.2 και 5.3. Με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας μειώνεται η συνεισφορά των πρωτονίων και νετρονίων, ενώ αντίστοιχα αυξάνεται η συνεισφορά των ηλεκτρονίων και των μιονίων. Τα πόνια παραμένουν πρακτικά σταθερά με ποσοστό 0.1%. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές τόσο σε συνθήκες ηλιακού μεγίστου (2001) όσο και ηλιακού ελαχίστου (2009). Σημειώνεται, επίσης, η μεγαλύτερη συνεισφορά των αδρονίων στα 0 GV κατά το 2009.

5.1.3 Δοσιμετρικοί Υπολογισμοί

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA-R, χρησιμοποιώντας το ίδιο setup που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της αξιολόγησης, προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$. Πιο συγκεκριμένα, στο επιθυμητό κάθε φορά ατμοσφαιρικό στρώμα, τοποθετείται μία σφαίρα ICRU, η οποία αποτελεί ένα ομοίωμα αναφοράς με υλικό που προσομοιώνει ανθρώπινο ιστό (ICRU, 1980). Η σφαίρα ακτινοβολείται με τα σωματίδια που συλλέχθηκαν στο εκάστοτε ατμοσφαιρικό υψόμετρο, από τις προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA, ενώ το πεδίο ακτινοβολίας παράγεται από το αντίστοιχο διευρυμένο και ευθυγραμμισμένο πεδίο ακτινοβολίας (Pelliccioni, 2000; Tezari et al., 2020). Για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν 20 iterations. Οι παρακάτω προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί με βάση το γαλαξιακό φάσμα πρωτογενών σωματιδίων που περιγράφεται παραπάνω, το οποίο αφορά ήρεμες συνθήκες, με απουσία έντονων ηλιακών γεγονότων.

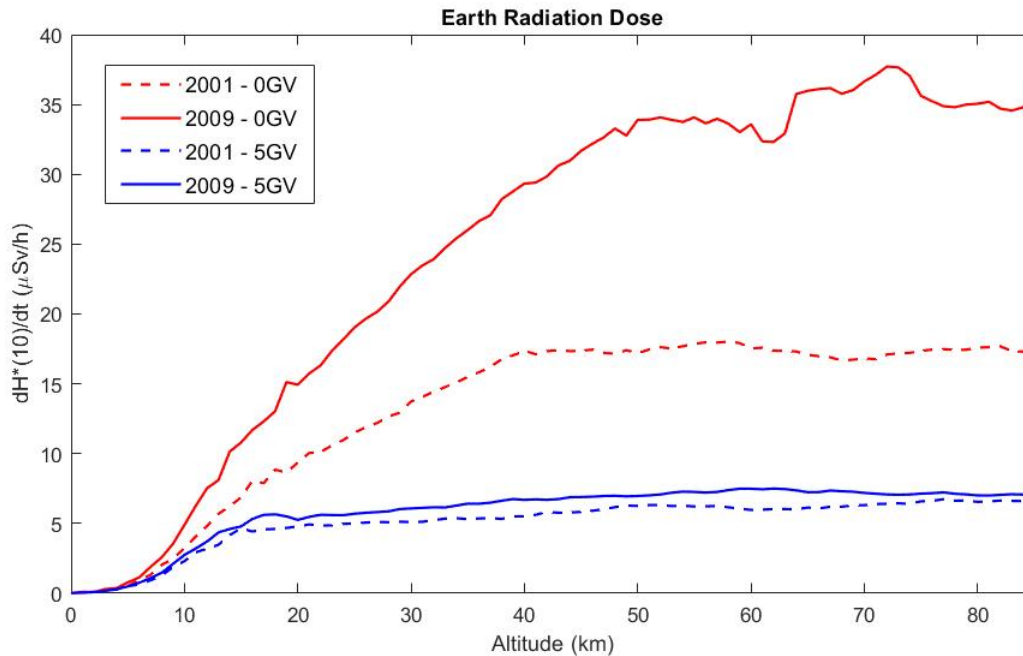
- **Δοσιμετρικοί υπολογισμοί στην ατμόσφαιρα**

Αρχικά, υπολογίστηκε ο $dH^*(10)/dt$ για όλο το ύψος της ατμόσφαιρας της Γης (0 km έως 85 km) για τα έτη 2001 και 2009, δηλαδή για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10, όπου απεικονίζεται ο $dH^*(10)/dt$ για πολικές περιοχές (0 GV) και για περιοχές μεγάλου πλάτους (5 GV).

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή των 0 GV, σε συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας, έχουμε υψηλότερη δόση, όπως είναι αναμενόμενο, σε σχέση με το μέγιστο του ηλιακού κύκλου, αναδεικνύοντας έτσι την αρνητική συσχέτιση μεταξύ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και της ηλιακής δραστηριότητας (Beck et al., 2006; Meier et al., 2009; Singh et al., 2011). Ο ρυθμός δόσης αυξάνεται απότομα σε υψόμετρο 0 km έως 10 km, πιο ομαλά στα 10 km έως 40 km (που αντιστοιχεί περίπου στο ύψος που ξεκινάει ο δευτερογενής καταγισμός), ενώ παραμένει σχετικά σταθερός στα μεγαλύτερα υψόμετρα (40 km και άνω). Στο ύψος των 18 km με 20 km παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο, το οποίο αντιστοιχεί στην περιοχή δημιουργίας των

μιονίων. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά τη διάρκεια του 2009 παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις του ρυθμού δόσης ψηλά στην ατμόσφαιρα, πιθανώς εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού σωματιδίων διαφόρων ενεργειών που καταφτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας.

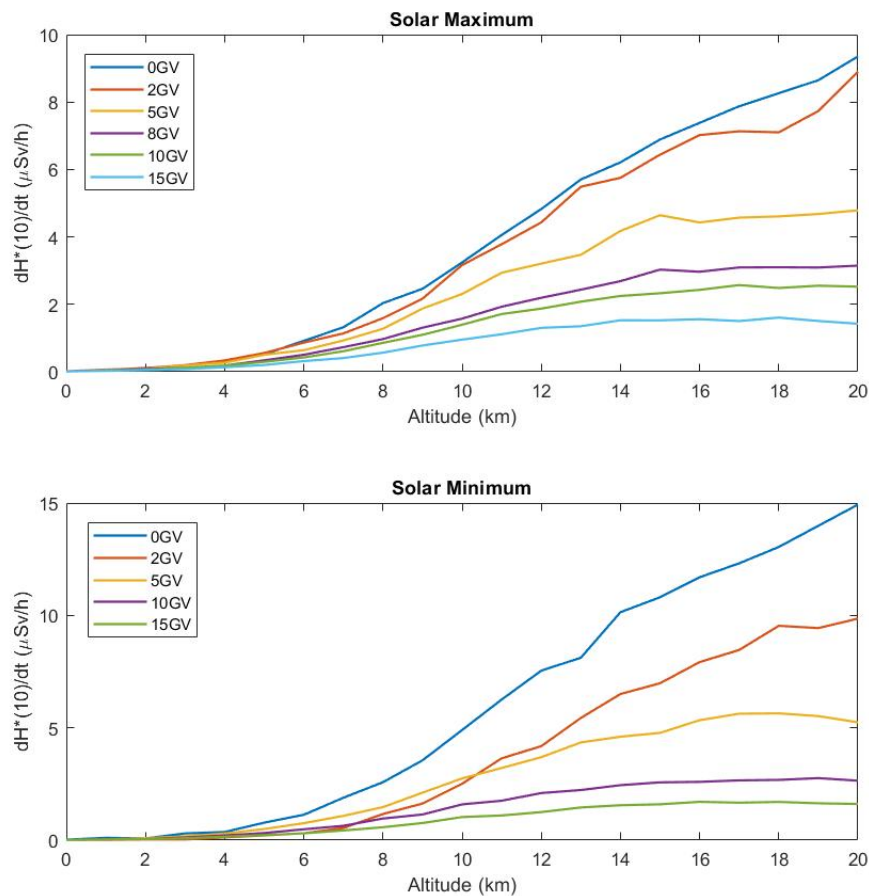
Στα 5 GV, ο ρυθμός δόσης είναι εμφανώς μειωμένος σε σχέση με τα 0 GV, υποδεικνύοντας έτσι την έντονη εξάρτηση της δόσης από το γεωγραφικό πλάτος, καθώς ο $dH^*(10)/dt$ μειώνεται με την αύξηση του κατώφλιου μαγνητικής δυσκαμψίας (Tezari et al., 2020). Ο ρυθμός δόσης αυξάνεται από το έδαφος μέχρι τα 18 km, δηλαδή το ύψος παραγωγής των μιονίων, και μετά παραμένει σταθερός χωρίς διακυμάνσεις μέχρι τα 85 km (Hands et al., 2016). Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια τόσο για συνθήκες μέγιστης όσο και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας, με το ρυθμό δόσης να είναι πρακτικά ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως ο μέγιστος $dH^*(10)/dt$ στα 0 GV στο ηλιακό ελάχιστο είναι έως και επτά φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τα 5 GV, και στο ηλιακό μέγιστο έως τρεις φορές μεγαλύτερος, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.10: Ρυθμός δόσης στην ατμόσφαιρα της Γης για ύψη 0 km έως 85 km για κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV και 5 GV.

Στο Σχήμα 5.11 εστιάζουμε στην κατώτερη γήινη ατμόσφαιρα και πιο συγκεκριμένα στα 0 km έως 20 km, για το 2001 και το 2009, λαμβάνοντας υπόψη μας περισσότερα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV, 2 GV, 5 GV, 8 GV, 10 GV και 15 GV). Για ακόμα μία φορά, είναι εμφανής η εξάρτηση του ρυθμού δόσης από το γεωγραφικό πλάτος και τη μαγνητική δυσκαμψία (Meier et al., 2020).

Παρατηρούμε πως στο ηλιακό ελάχιστο ο ρυθμός δόσης μειώνεται πιο απότομα με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, ιδιαίτερα στην περιοχή 0 GV έως 2 GV. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται σε συνθήκες μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας, όπου ο $dH^*(10)/dt$ για τα 0 GV και τα 2 GV είναι σχεδόν ταυτόσημος. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και από τις παρατηρήσεις του Σχήματος 5.7, όπου η εναπόθεση ενέργειας ήταν σχεδόν σταθερή στο ηλιακό μέγιστο (2001), για την περιοχή 0 GV έως 2 GV, ενώ στο ηλιακό ελάχιστο (2009), η σχεδόν εκθετική μείωση της εναποτιθέμενης ενέργειας ξεκινούσε ήδη από τις πολικές περιοχές (0 GV). Έτσι, γενικότερα, στο ηλιακό μέγιστο υπάρχει μία καλύτερη κατανομή στο ρυθμό δόσης.



Σχήμα 5.11: Ρυθμός δόσης στην ατμόσφαιρα της Γης για ύψη 0 km έως 20 km για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες ηλιακού μεγίστου (έτος 2001) και ηλιακού ελαχίστου (έτος 2009).

Γενικά, η αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας συνεπάγεται και μείωση του ρυθμού δόσης, με την έκθεση να είναι πολύ μεγαλύτερη στους πόλους και τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, σε σχέση

με τις ισημερινές περιοχές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, στις συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, παρατηρείται μία αντιστροφή αυτού του κανόνα στα χαμηλά ατμοσφαιρικά υψόμετρα (4 km έως 10 km), με το ρυθμό δόσης στα 5 GV να είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των 2 GV στην περιοχή αυτή. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς οφείλεται στη μεγαλύτερη διαπερατότητα της ηλιόσφαιρας κατά το ηλιακό ελάχιστο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροές σωματιδίων τόσο υψηλής όσο και χαμηλής έντασης, καθώς και μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, πως στην περιοχή των 10 GV με 15 GV, δηλαδή στις Ισημερινές περιοχές, ο ρυθμός δόσης είναι πρακτικά ο ίδιος τόσο στο ηλιακό ελάχιστο όσο και στο μέγιστο, είναι ανεξάρτητος δηλαδή της φάσης της ηλιακής δραστηριότητας (Singh et al., 2011).

• Ετήσιοι Δοσιμετρικοί υπολογισμοί

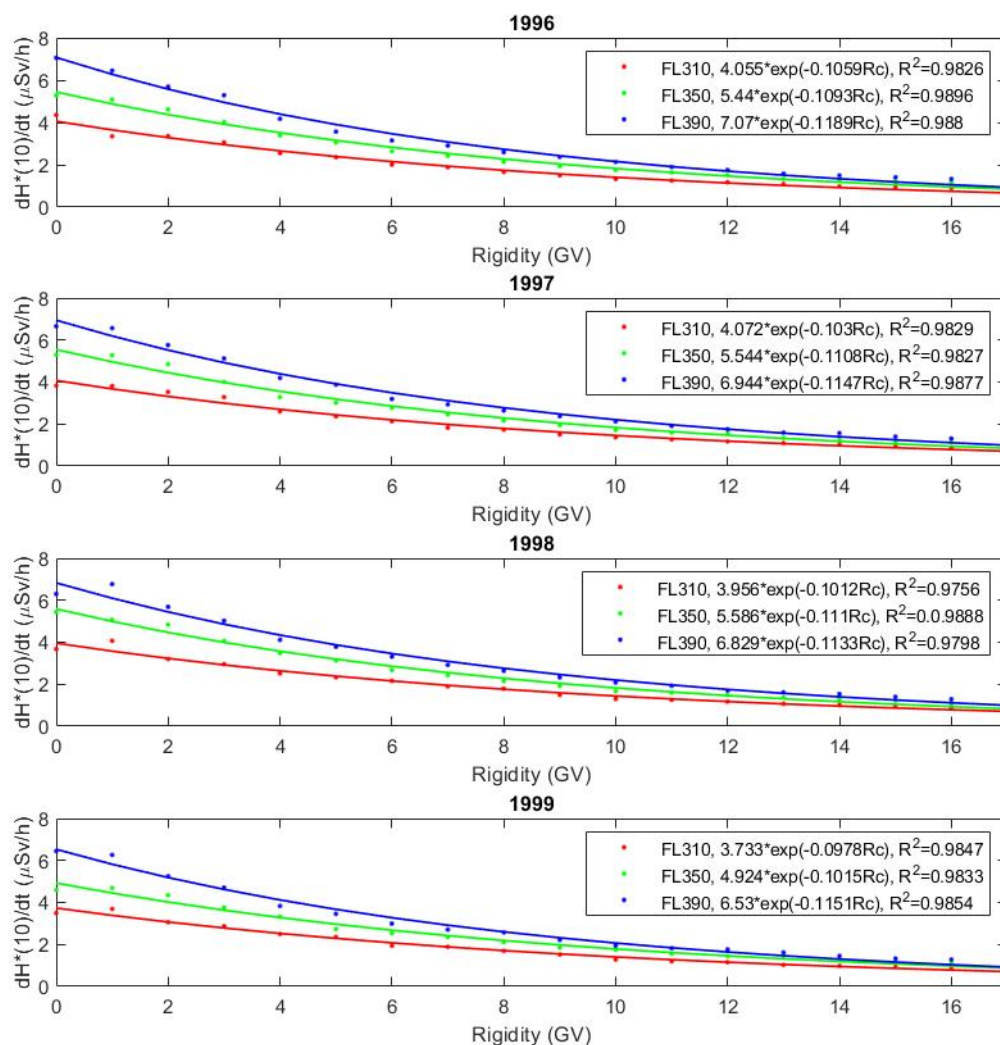
Το πιο σημαντικό κομμάτι της διατριβής αυτής είναι ο υπολογισμός του μέσου ρυθμού δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ για κάθε έτος ξεχωριστά από το 1996 έως το 2019, καλύπτοντας πλήρως τους δύο πρόσφατους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, για όλο το εύρος τιμών κατώφλιου μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV έως 17 GV (με βήμα 1 GV) για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης αεροπλάνων ($FL310 = 31000 ft = 9.45 km$, $FL350 = 35000 ft = 10.67 km$ και $FL390 = 39000 ft = 11.89 km$). Αυτό αντιστοιχεί στην πραγματοποίηση άνω των 400 προσομοιώσεων με το εργαλείο DYASTIMA για τη μελέτη των δευτερογενών καταγισμών μέσα στην ατμόσφαιρα. Με βάση την έξοδο του DYASTIMA, πραγματοποιήθηκαν ισάριθμες προσομοιώσεις με την επέκταση DYASTIMA-R, προκειμένου να γίνει εκτίμηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος με το εργαλείο DYASTIMA-R.

Για την επίτευξη ικανοποιητικής στατιστικής, κάθε προσομοίωση έχει πραγματοποιηθεί για 50000 events και 20 iterations για τη δοσιμετρία. Κάποια από τα αποτελέσματα αυτά έχουν ήδη δημοσιευθεί επιτυχώς (Paschalis et al., 2021; Tezari et al., 2020).

Στα Σχήματα 5.12 έως 5.17, παρουσιάζεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για κάθε έτος ξεχωριστά για όλες τις τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV - 17 GV) για τρία υψόμετρα (FL310, FL350, FL390). Σε κάθε μία από τις καμπύλες αυτές έχει γίνει προσαρμογή εκθετικής συνάρτησης:

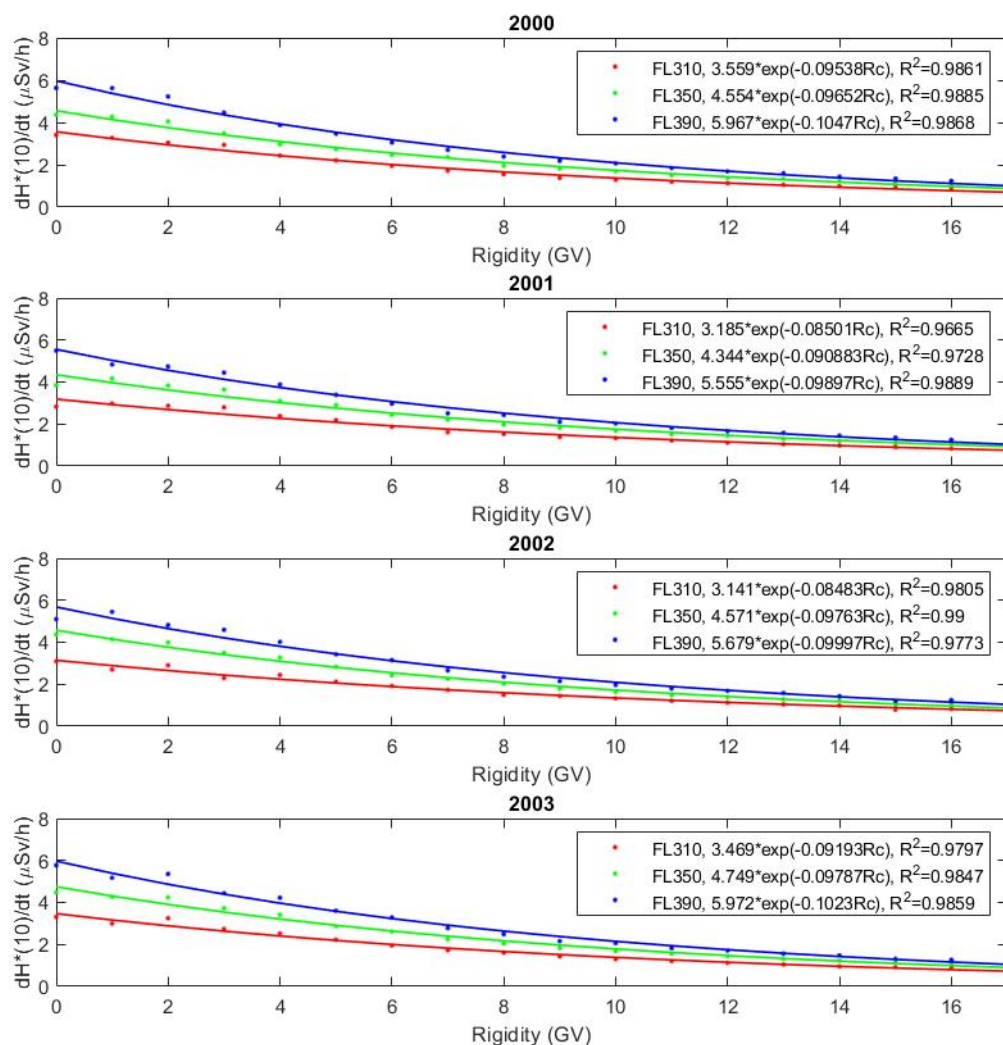
$$\frac{dH^*(10)}{dt} = a e^{-b R_c} \quad (5.1)$$

όπου R_c το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας και a , b σταθερές, που προκύπτουν από την εκάστοτε προσαρμογή. Οι εξισώσεις δίνονται σε κάθε διάγραμμα. Παράλληλα, έχει



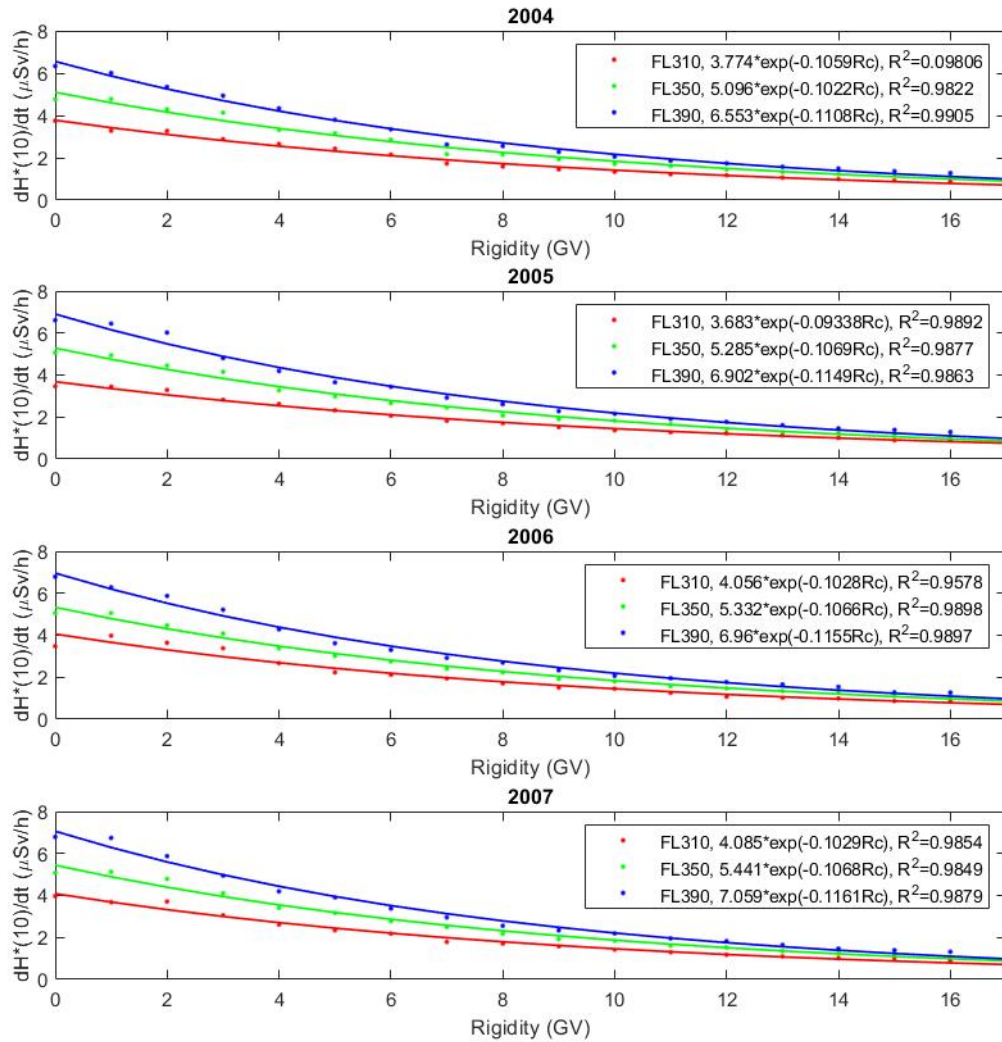
Σχήμα 5.12: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 1996 έως 1999 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

πραγματοποιηθεί υπολογισμός του τετραγώνου του συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) R^2 , για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί πως ο συντελεστής R^2 έχει ένα εύρος τιμών από 0.9578 έως 0.9908, από το οποίο συμπεραίνουμε ότι έχουμε μία πολύ καλή προσαρμογή. Οι τιμές του ρυθμού δόσης, όπως υπολογίστηκαν με το DYASTIMA-R, για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις είναι διαθέσιμες στους Πίνακες 6.1 έως 6.6 του Παραρτήματος Α' της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 5.13: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 2000 έως 2003 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

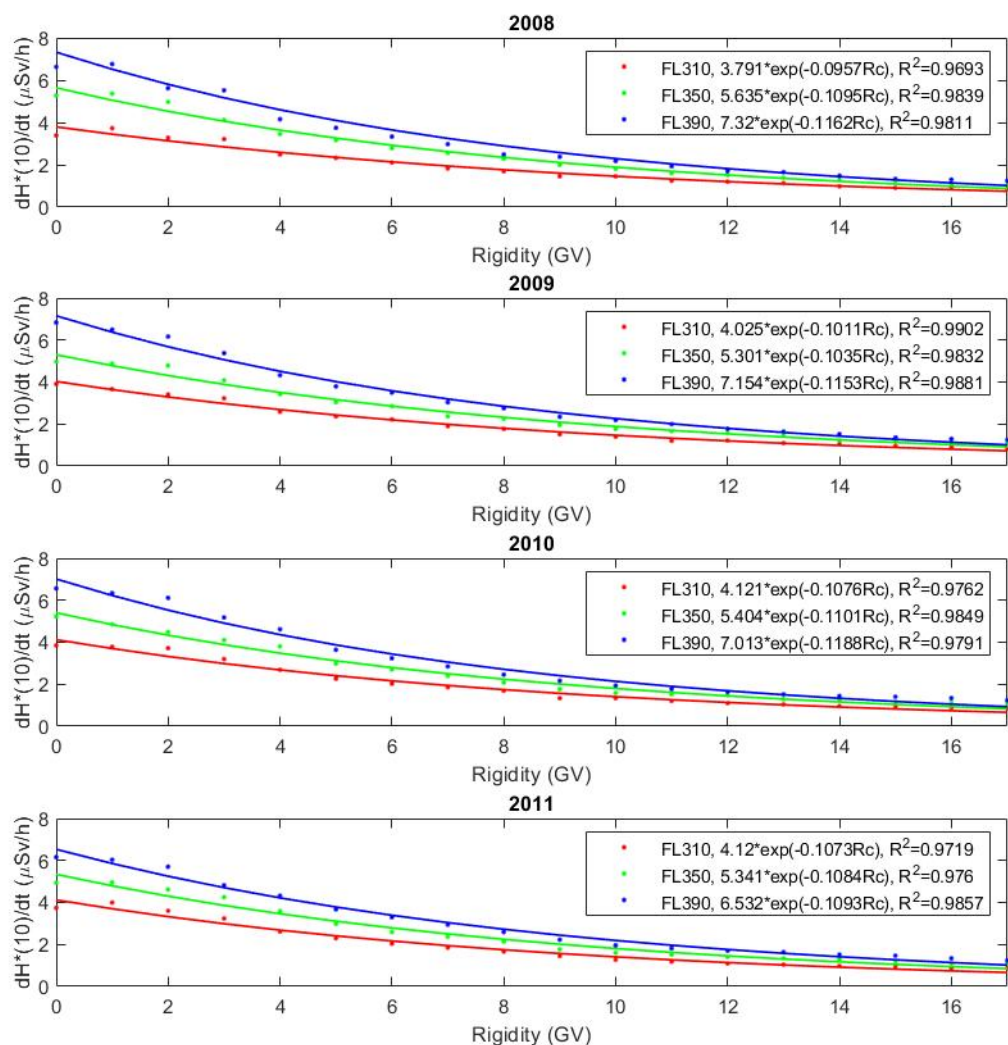
Σε όλα τα διαγράμματα διακρίνεται ξεκάθαρα η μείωση του ρυθμού δόσης με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας και για τα τρία υψόμετρα πτήσης. Όπως επίσης είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός δόσης αυξάνεται με το υψόμετρο από την επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα στο ύψος FL390 να παρατηρείται κάθε φορά μεγαλύτερος $dH^*(10)/dt$. Η εξάρτηση της δόσης από το ύψος έχει διατυπωθεί και σε πολλές μελέτες ακόμα (Miroshnichenko, 2003; Shea and Smart, 2000). Με την αύξηση του υψομέτρου, η θωράκιση της ατμόσφαιρας μειώνεται, με σχεδόν τη



Σχήμα 5.14: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 2004 έως 2007 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

μισή μάζα της ατμόσφαιρας να βρίσκεται κάτω από τα 5 km. Συνεπώς, τα υψηλότερα υψόμετρα δέχονται υψηλότερες δόσεις ακτινοβολίας (IFALPA, 2019). Τα σχήματα αυτά παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με σχήματα που υπάρχουν σε αντίστοιχες μελέτες στη βιβλιογραφία (Meier et al., 2020).

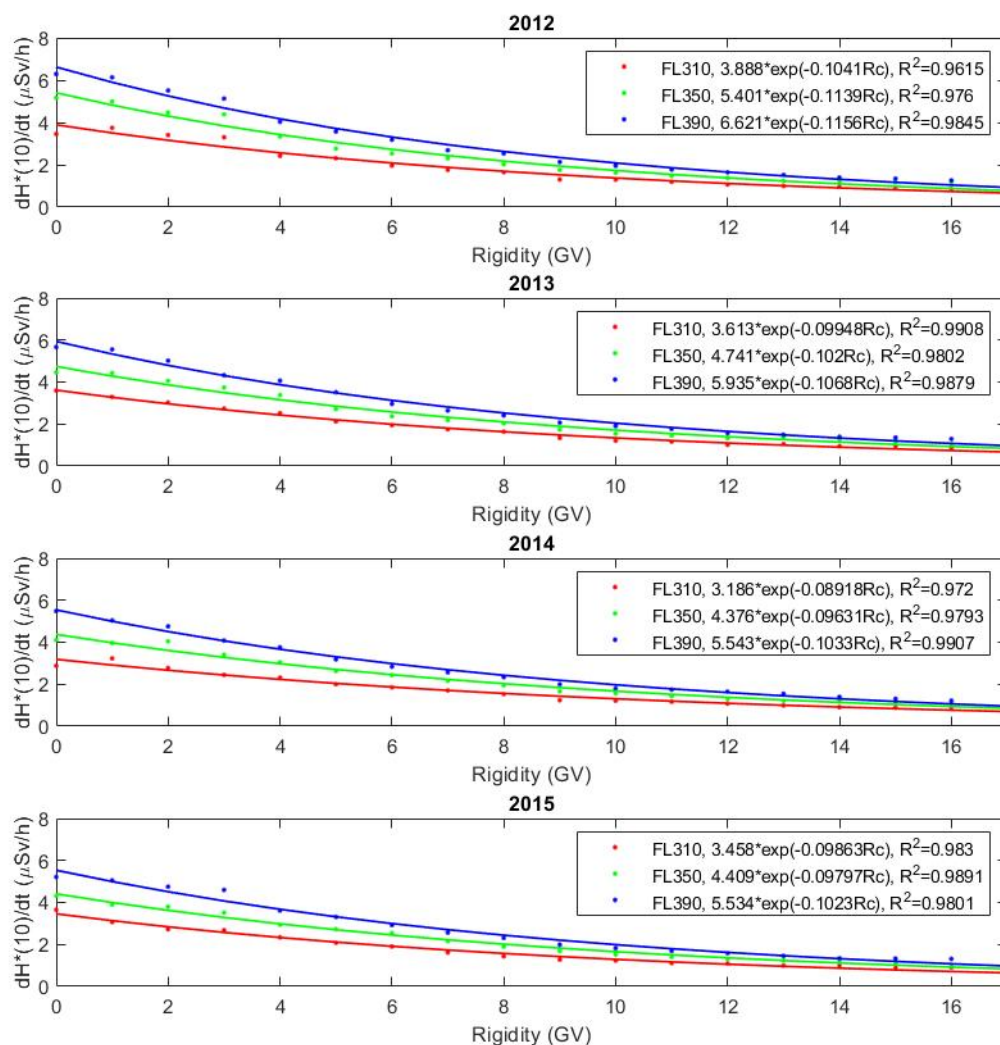
Παρατηρούμε, επίσης, πως σε συνθήκες ηλιακού μεγίστου έχουμε μία καλύτερη κατανομή του ρυθμού δόσης, με μικρότερο εύρος στις χαμηλές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV έως



Σχήμα 5.15: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 2008 έως 2011 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

2 GV), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα για τα 0 km έως 20 km (Σχήμα 5.11).

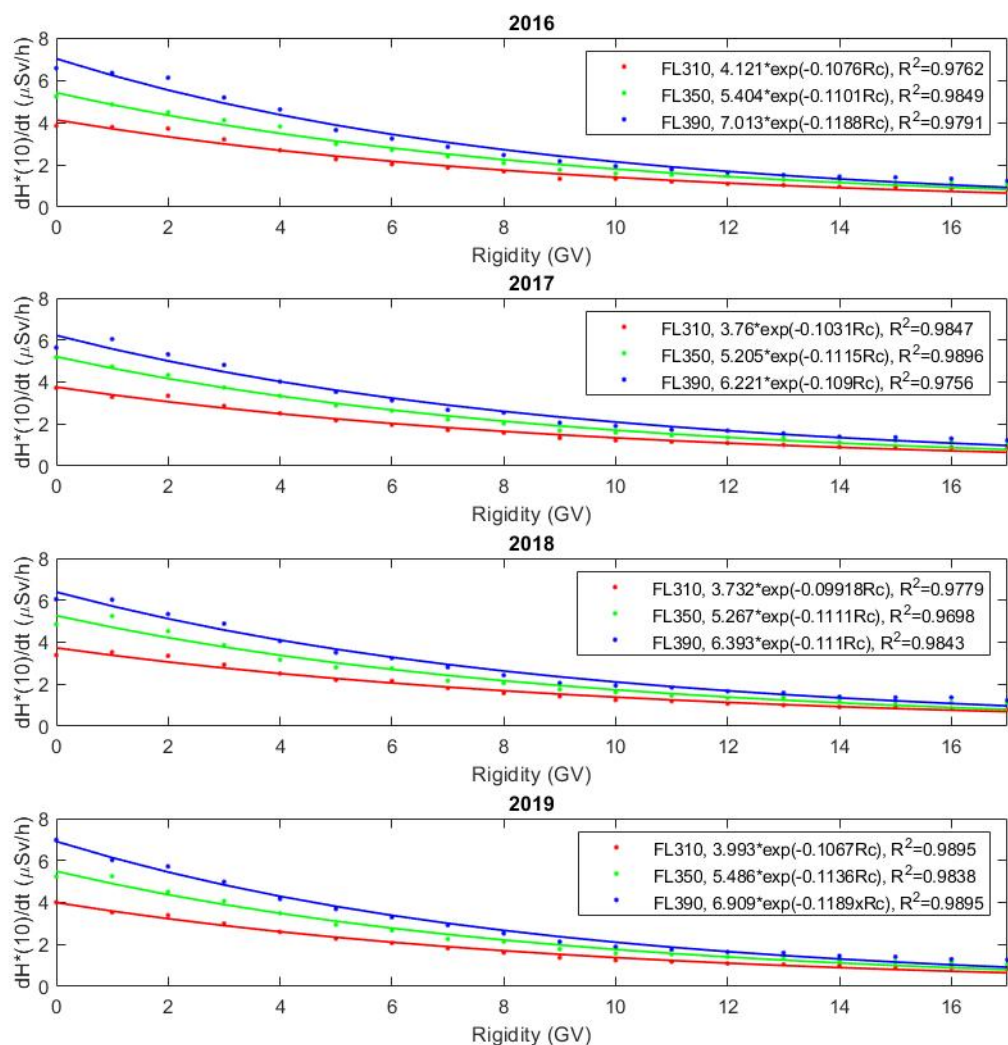
Παρατηρείται επίσης η ότι ο ρυθμός δόσης στα FL390 μειώνεται περίπου κατά έναν παράγοντα τέσσερα ανάμεσα στην υψηλότερη έκθεση στις πολικές περιοχές (0 GV) και τον Ισημερινό όπου υπάρχει αυξημένη θωράκιση από το γεωμαγνητικό πεδίο (15 – 17 GV). Στα χαμηλότερα υψόμετρα, όπως στα FL310, ο παράγοντας αυτός μειώνεται, καθώς τα χαμηλής ενέργειας



Σχήμα 5.16: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 2012 έως 2015 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

πρωτογενή γαλαξιακά σωματίδια που θωρακίζονται πιο αποτελεσματικά στα μικρά γεωγραφικά πλάτη (μεγάλες δυσκαμψίες) έχουν μειωμένο αντίκτυπο στο ρυθμό δόσης (Meier et al., 2020).

Τέλος, όπως αναφέραμε και παραπάνω, ο ρυθμός δόσης εξαρτάται άμεσα με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, οπότε εμφανίζει αρνητική συσχέτιση με τη δραστηριότητα του ήλιου (Beck et al., 2006; Meier et al., 2009; Singh et al., 2011). Σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, έχουμε υψηλότερο ρυθμό δόσης, σε σχέση με το ηλιακό μέγιστο. Ενδεικτικά, το έτος 2009

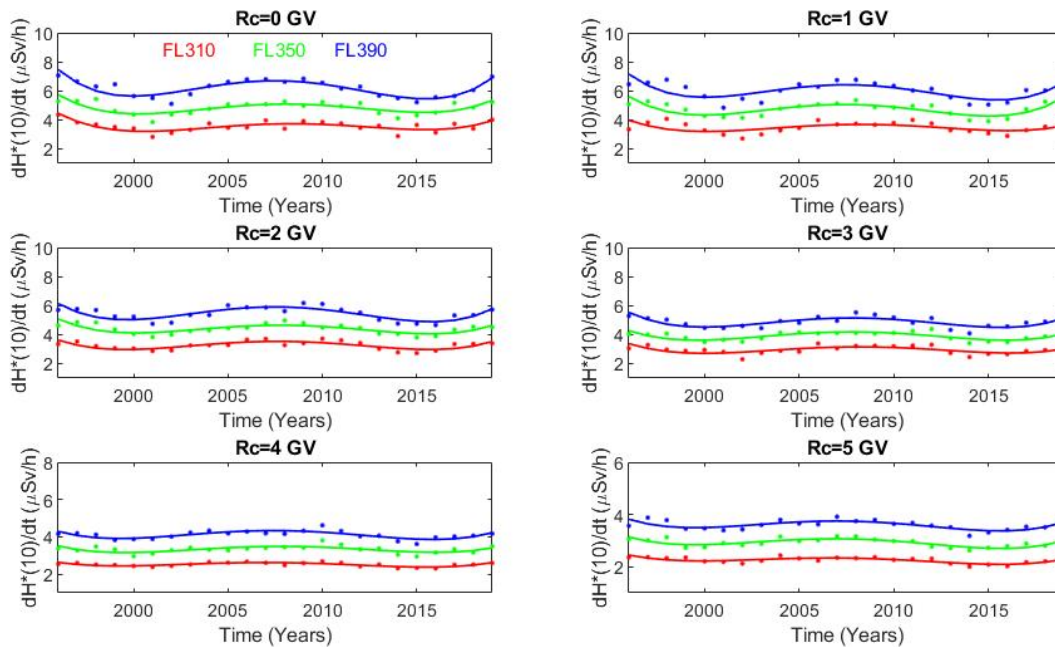


Σχήμα 5.17: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τα έτη 2016 έως 2019 από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

έχουμε υψηλότερη δόση σε σχέση με το 2001 και το 2014, που αποτελούν τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων 23 και 24 αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί, πως ο κύκλος 24 είναι άρτιος, και συνεπώς εμφανίζει δύο μέγιστα, το 2012 και το 2014. Ο ρυθμός δόσης το 2012 είναι μεγαλύτερος από το 2014, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι το 2014 αποτελεί πρωτογενές μέγιστο του κύκλου, με την υψηλότερη ηλιακή δραστηριότητα.

- Δοσιμετρικοί υπολογισμοί συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο υπολογισμός του ρυθμού δόσης ως συνάρτηση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας για τη διάρκεια δύο πλήρων ηλιακών κύκλων. Με βάση τις ανωτέρω προσομοιώσεις, στα Σχήματα 5.18 έως 5.20, παρουσιάζεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για κάθε τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας για τα τρία υψόμετρα (FL310, FL350, FL390) για τα έτη 1996 έως 2019 (ηλιακοί κύκλοι 23 και 24). Με τον τρόπο αυτό, είμαστε σε θέση να μελετήσουμε την εξάρτηση της δόσης από τη φάση της ηλιακής δραστηριότητας, και να εντοπίσουμε πως σχετίζονται τόσο με το 11-ετή όσο και με τον 22-ετή ηλιακό κύκλο (Mavromichalaki et al., 1997), καθώς έχουμε στη διάθεσή μας δεδομένα για δύο ολόκληρους κύκλους.



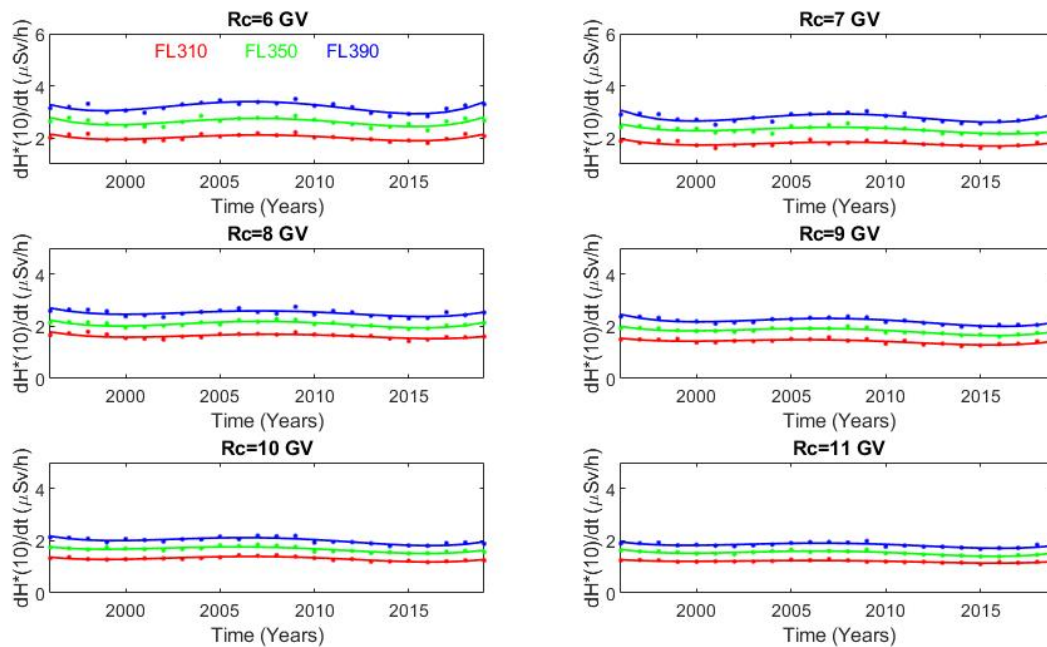
Σχήμα 5.18: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας από 0 GV έως 5 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390 κατά τη διάρκεια των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

Σε κάθε καμπύλη έχει γίνει προσαρμογή μίας πολυωνυμικής συνάρτησης τετάρτου βαθμού της μορφής:

$$\frac{dH^*(10)}{dt} = a_1 x^4 + a_2 x^3 + a_3 x^2 + a_4 + a_5 \quad (5.2)$$

όπου a_1 , a_2 , a_3 , a_4 και a_5 σταθερές, οι οποίες έχουν προκύψει από την εκάστοτε προσαρμογή.

Στις Σχέσεις 6.1 έως 6.18 του Παραρτήματος Β' της παρούσας διατριβής δίνονται οι τιμές των συντελεστών αυτών ανά τιμή κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας και ανά υψόμετρο. Στα Σχήματα 5.18 έως 5.20, δίνεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ για όλο το εύρος τιμών μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV έως 17 GV) για τα τρία συνήθη υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390).

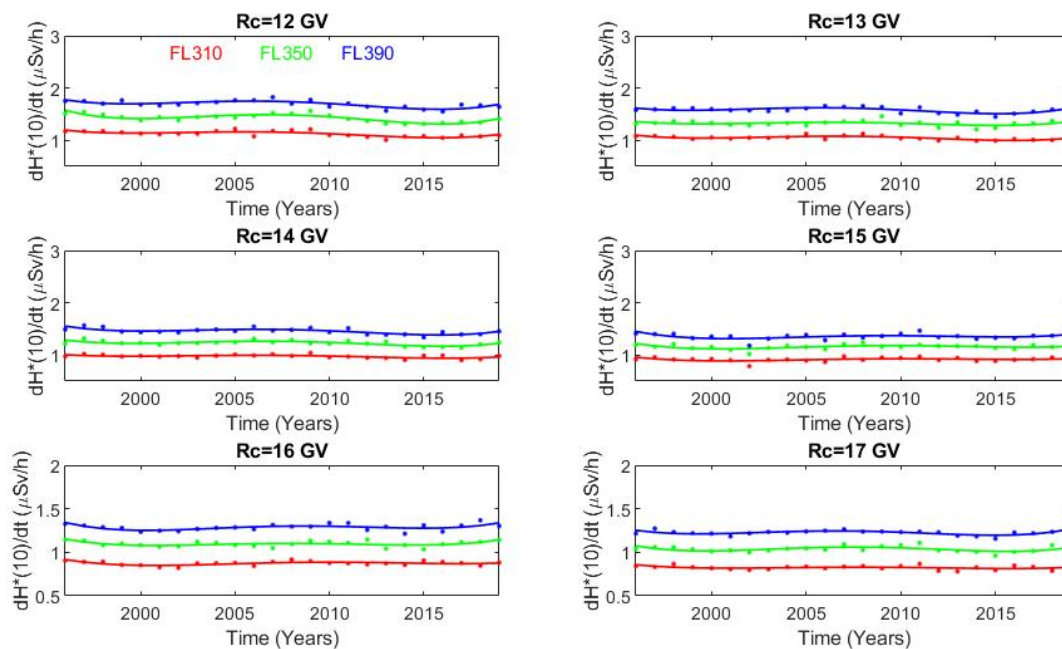


Σχήμα 5.19: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας από 6 GV έως 11 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390 κατά τη διάρκεια των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

Σε γενικές γραμμές, το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι πιο ασθενές και διαπερατό στις πολικές περιοχές, αντίθετα με τα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη όπου οι δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου είναι σχεδόν παράλληλες με την επιφάνεια της Γης, παρέχοντας έτσι πιο αποτελεσματική θωράκιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα επίπεδα κοσμικής ακτινοβολίας (και συνεπώς η δόση) να είναι υψηλότερα στις πολικές περιοχές και να μειώνονται προς τον Ισημερινό (Meier et al., 2020, 2009). Έτσι, σε 'ήρεμες' συνθήκες ηλιακής δραστηριότητας, ο ρυθμός δόσης στους πόλους μπορεί να είναι από δύο έως και πέντε φορές μεγαλύτερος από ότι στα ισημερινά γεωγραφικά πλάτη, όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα (IFALPA, 2019; Spurny, 2001).

Η δόση ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα αεροσκαφών βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο να βρίσκεται σε αρνητική

συσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα (Beck et al., 2006; Meier et al., 2009; Singh et al., 2011). Αυτή η συμπεριφορά είναι ορατή στο Σχήμα 5.18, όπου παρουσιάζονται οι πολικές περιοχές και οι περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους (0 GV έως 2 GV). Ο μικρότερος ρυθμός δόσης παρατηρείται κατά την περίοδο 2000 με 2002, που αντιστοιχεί στην περίοδο πολύ έντονης ηλιακής δραστηριότητας του ηλιακού κύκλου 23, και το 2014, που αντιστοιχεί στο ‘πρωτογενές’ μέγιστο του άρτιου ηλιακού κύκλου 24. Αντίθετα, ο μεγαλύτερος ρυθμός δόσης παρατηρείται κατά την περίοδο 2007 με 2009, η οποία αντιστοιχεί στο ιδιαίτερα εκτεταμένο ηλιακό ελάχιστο ανάμεσα στους κύκλους 23 και 24, και ειδικότερα κατά το 2008 και 2009, κατά τα οποία υπήρχε ασυνήθιστα χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα (Paouris et al., 2012). Η δόση για το διάστημα αυτό είναι η υψηλότερη κατά τη διάρκεια και των δύο αυτών κύκλων. Αυτό έχει διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές (Meier et al., 2009; Mrigakshi et al., 2013). Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο με την αύξηση του ατμοσφαιρικού ύψους (π.χ. FL390) (IFALPA, 2019; Miroshnichenko, 2003; Shea and Smart, 2000).



Σχήμα 5.20: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας από 12 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390 κατά τη διάρκεια των ηλιακών κύκλων 23 και 24.

Παρατηρούμε ότι για τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας άνω των 3 GV, η μεταβολή του ρυθμού δόσης γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από τη φάση του ηλιακού κύκλου, ενώ σε μεγάλες μαγνητικές δυσκαμψίες (14 GV έως 17 GV) δεν παρουσιάζεται πρακτικά καμία εξάρτηση από την ηλιακή

δραστηριότητα. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και από την πολυωνυμική προσαρμογή, καθώς ο συντελεστής a_1 είναι κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερος σε σχέση με τα 0 GV , για την περιοχή τιμών κατωφλίου 4 GV έως 13 GV , και δύο τάξεις μικρότερος στις ισημερινές περιοχές (14 GV έως 17 GV). Βασικό συμπέρασμα αποτελεί, λοιπόν το γεγονός, ότι ο ρυθμός δόσης εξαρτάται άμεσα από τη φάση του ηλιακού κύκλου, με το φαινόμενο αυτό να γίνεται πιο έντονο με την αύξηση του υψομέτρου, για τα πολικά γεωγραφικά πλάτη, ενώ δεν εμφανίζει ιδιαίτερες μεταβολές στην περιοχή του Ισημερινού (Singh et al., 2011).

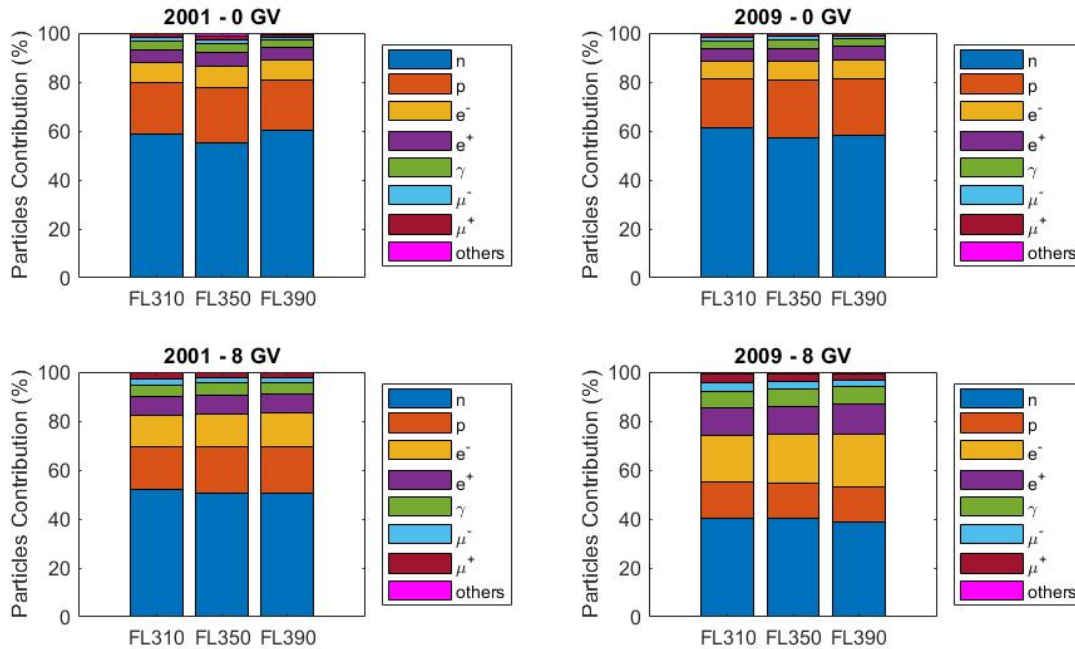
Πολλά από τα σενάρια αυτά που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση του DYASTIMA και DYASTIMA-R βρίσκονται σε μία κατάλληλα διαμορφωμένη βάση δεδομένων, η οποία είναι διαθέσιμη ύστερα από εγγραφή στην ιστοσελίδα <https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>. Τα σενάρια αυτά αποτελούν federated product της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA), και πιο συγκεκριμένα του Space Situational Awareness (SSA) Space Weather Service Network (SWE) Space Radiation Expert Service Centre (R-ESC), όπου η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας ΕΚΠΑ συμμετέχει ως expert group.

- **Συνεισφορά σωματιδίων στο ρυθμό δόσης**

Το περιβάλλον ακτινοβολίας στο οποίο εκτίθενται τα πληρώματα και οι επιβάτες αεροσκαφών είναι διαφορετικό από αυτό που βιώνουμε καθημερινά στην επιφάνεια της Γης. Οι κυριότερες συνιστώσες του καταγισμού στα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα είναι τα φωτόνια, τα νετρόνια, τα πρωτόνια, τα μίονια, τα πιόνια, τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια (Sihver et al., 2015). Η συνεισφορά των διάφορων συνιστωσών του καταγισμού στη δόση είναι μία συνάρτηση του ύψους και της φάσης της ηλιακής δραστηριότητας (O'Brien et al., 1996; Poje et al., 2008). Τα μίονια κυριαρχούν κάτω από τα 10000 ft (3048 m), ενώ μεταξύ των 10000 ft και 50000 ft (15240 m) κυριαρχούν τα νετρόνια. Στο ύψος αυτό, τα πρωτόνια και τα σωματίδια του ηλεκτρομαγνητικού καταγισμού διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο (O'Brien et al., 1996). Έτσι, σε υψόμετρο πτήσης 12 km , ένα άτομο λαμβάνει κατά μέσο όρο δόση $5\mu\text{Sv/h}$, στην οποία τα νετρόνια συνεισφέρουν περίπου κατά 37% στον Ισημερινό και 64% στους πόλους, τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια κατά 38% και 14%, τα πρωτόνια 12% και 14%, τα φωτόνια 8% και 5%, και τα μίονια 5% και 3% αντίστοιχα (Guembou Shouop et al., 2020). Στη στάθμη της θάλασσας κυριάρχη συνιστώσα είναι τα μίονια (Poje et al., 2008).

Η συνεισφορά, όμως, στο ρυθμό δόσης εξαρτάται άμεσα και από τη Γραμμικά Μεταφερόμενη Ενέργεια (LET) και τον Παράγοντα βαρύτητας ακτινοβολίας w_R , για κάθε είδος σωματιδίου, και από άποψη ακτινοπροστασίας, αυτό είναι που μας ενδιαφέρει παραπάνω, καθώς τα μεγέθη αυτά σχετίζονται άμεσα με τα βιολογικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας. Τα σωματλια με χαμηλή

LET, όπως τα φωτόνια, τα ηλεκτρόνια και τα υψηλοενεργειακά πρωτόνια προκαλούν λιγότερες βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ τα σωματίια υψηλής *LET*, όπως τα νετρόνια, τα χαμηλοενεργειακά πρωτόνια και άλλα βαρύτερα στοιχεία, είναι πιο επικίνδυνα για την υγεία.



Σχήμα 5.21: Ποσοστιαία συνεισφορά στο ρυθμό δόσης των κυριότερων σωματιδίων του καταγισμού για δύο τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (2001 και 2009) στα συνήθη υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390).

Στο Σχήμα 5.21, δίνεται η ποσοστιαία συνεισφορά των συνιστωσών του καταγισμού στα συνήθη υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390), όπως υπολογίστηκαν με το DYASTIMA-R. Παρατηρούμε ότι κυριάρχη συνεισφορά στο ρυθμό δόσης έχουν τα νετρόνια με ποσοστό από 40% έως 60%, ανάλογα με τη φάση της ηλιακής δραστηριότητας και το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας, και ακολουθούν τα πρωτόνια με συνεισφορά 10% έως 20%. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι τα νετρόνια και τα πρωτόνια συνεισφέρουν συνδυαστικά κατά ένα ποσοστό 60% έως 80%. Η υπόλοιπη δόση οφείλεται κυρίως σε ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, φωτόνια και μίονια, ενώ η συνεισφορά των πιονίων είναι αμελητέα (Meier et al., 2020; Paschalis et al., 2016b). Η συνεισφορά των πρωτονίων και των νετρονίων γίνεται μικρότερη με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο σημαντική η συνεισφορά κυρίως των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων. Έτσι, στις πολικές περιοχές (0 GV), η έκθεση μπορεί να είναι πιο επικίνδυνη εξαιτίας της αυξημένης συνεισφοράς των νετρονίων, σε αντίθεση με τα μικρά γεωγραφικά πλάτη.

5.2 Σενάρια Worst Case

Γενικά, η αυξημένη έκθεση στην ακτινοβολία στα συνήθη αεροπορικά υψόμετρα προκαλείται αποκλειστικά από τη μόνιμα παρούσα γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία και τους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς, με το ρυθμό δόσης να είναι της τάξης του $1 - 8 \mu Sv/h$ στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (Matthia et al., 2009b). Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια έκτακτων φαινομένων Διαστημικού Καιρού παρατηρείται αυξημένη ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, και έτσι αυτά μπορούν εν δυνάμει να έχουν πληθώρα επιπτώσεων τόσο στα τεχνολογικά όσο και στα βιολογικά συστήματα.

Τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (SEPs) αποτελούν γενικά το πιο επικίνδυνο περιβάλλον στο οποίο πρέπει να λειτουργούν τα διαστημικά συστήματα. Μεγάλα γεγονότα SEPs προκαλούν αυξημένες ροές σωματιδίων στο γεωδιαστημικό χώρο, οι οποίες μπορεί να επιμείνουν για αρκετές ημέρες. Αυτά, όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, οφείλονται είτε σε ηλιακές εκλάμψεις είτε σε στεμματικές εκπομπές μάζας. Σε σπάνιες περιπτώσεις, κατά μέσο όρο περίπου μία φορά ανά χρόνο, η αύξηση της έντασης αυτών των υψηλοενεργειακών σωματιδίων μπορεί να είναι τέτοια ώστε να καταγραφεί από επίγειους μετρητές νετρονίων, δημιουργώντας αυτό που ονομάζουμε επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs). Εξαιτίας της απότομης κλίσης στην ενεργειακή κατανομή των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων, ο ρυθμός δόσης μέσα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει πολύ ισχυρότερη εξάρτηση από το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος σε σχέση με τη γαλαξιακή συνιστώσα.

Τα SEPs μπορεί να επιφέρουν και σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον ακτινοβολίας στα συνήθη υψόμετρα πτήσης των αεροσκαφών. Οι δόσεις που προκύπτουν διαφέρουν όχι μόνο μεταξύ των μεμονωμένων γεγονότων, αλλά εξαρτώνται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο της έκθεσης, και από το χρόνο και τη διάρκεια της εκδήλωσης του γεγονότος (Matthia et al., 2009a). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα SEPs διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το ενεργειακό φάσμα, την ένταση του γεγονότος και τη θέση του στον Ήλιο, τη γωνιακή κατανομή και την κατεύθυνση διάδοσης, καθιστώντας δύσκολη την περιγραφή του συμβάντος τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Έτσι, σε αντίθεση με την έκθεση λόγω γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, η κατανομή των SEPs παρουσιάζει υψηλή χρονική και χωρική μεταβλητότητα. Η ένταση των πρωτογενών ηλιακών πρωτονίων κατά τη διάρκεια τέτοιων γεγονότων μπορεί να αυξηθεί κατά αρκετές τάξεις μεγέθους μέσα σε μόνο λίγα λεπτά, επιφέροντας έτσι σχετικές αλλαγές στο περιβάλλον ακτινοβολίας στο έδαφος και στα υψόμετρα των αεροσκαφών (Matthia et al., 2009b).

Στα συνήθη υψόμετρα πτήσης ($9 km-12 km$), ο ρυθμός δόσης εξαρτάται από το ύψος, το γεωμαγνητικό πλάτος και την ηλιακή δραστηριότητα και κυμαίνεται, όπως αναφέραμε και παρα-

πάνω, μεταξύ $1 - 8 \mu Sv/h$. Εκτός από το υψόμετρο και το γεωμαγνητικό πλάτος, η έκθεση κατά τη διάρκεια GLEs εξαρτάται από το πλάτος, το σχήμα του φάσματος και την ανισοτροπία της ροής της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς και από την κατεύθυνση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κοντά στη Γη. Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση στη δόση εξαρτάται έντονα από την τοποθεσία, με τα μεγάλα και πολικά γεωγραφικά πλάτη να δέχονται τη μεγαλύτερη δόση (Butikofer et al., 2008).

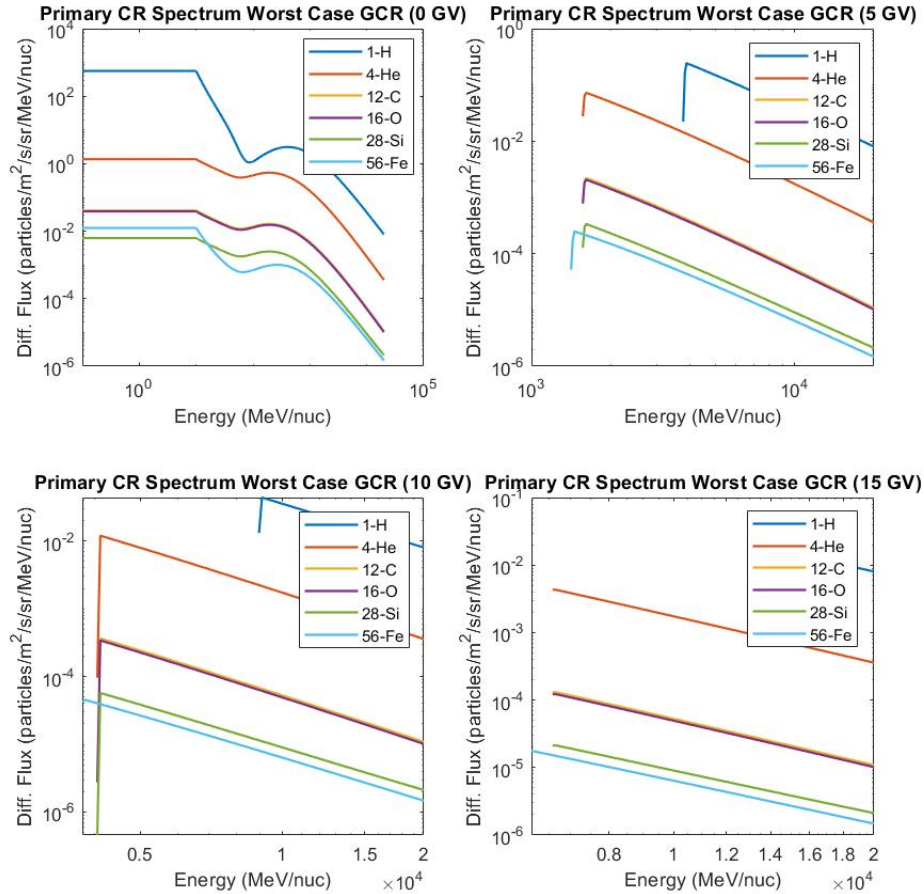
Έτσι, ενώ η επίδραση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων μπορεί να εκτιμηθεί σχετικά εύκολα με βάση τα υπάρχοντα μοντέλα, η εκτίμηση του ρυθμού δόσης κατά τη διάρκεια ισχυρών SEPs και GLEs είναι αρκετά περίπλοκη και χρονοβόρα (Mishev et al., 2018). Η εκτίμηση του ρυθμού δόσης κατά τη διάρκεια τέτοιων φαινομένων γίνεται συνήθως αναδρομικά και βασίζεται κυρίως στη χρήση ανακατασκευασμένων φασμάτων από επίγειους μετρητές νετρονίων και δορυφορικά δεδομένα, ξεχωριστά για κάθε εκδήλωση (Matthia et al., 2009b). Επομένως, η ανάπτυξη νέων μοντέλων καθώς και η βελτίωση και επικύρωση των υπάρχοντων μοντέλων για την εκτίμηση της δόσης, ειδικά κατά τη διάρκεια των GLEs έχει ιδιαίτερη σημασία (Beck et al., 2008; Mishev and Usoskin, 2015).

Τα τελευταία έτη, πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να εκτιμήσουν τη δόση που δέχονται τα πληρώματα αεροσκαφών κατά τη διάρκεια GLEs (Beck et al., 2008; Copeland and Atwell, 2019; Kataoka et al., 2018; Mishev, 2014; Mishev et al., 2015; Mishev and Usoskin, 2018). Η έκθεση στα υψόμετρα πτήσης κατά τη διάρκεια έντονων γεγονότων μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με ήρεμες περιόδους, και έτσι τα πληρώματα αεροσκαφών και οι επιβάτες να λάβουν δόσεις πολύ παραπάνω από το υπόβαθρο των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Αυτό αφορά κυρίως πολικές πτήσεις, και όχι πτήσεις που λαμβάνουν χώρα σε μικρά και ισημερινά γεωγραφικά πλάτη. Η δόση αυτή εξαρτάται κατά πολύ και από το πλάτος του γεγονότος. Έτσι, για παράδειγμα, GLEs χαμηλής έντασης, όπως για παράδειγμα το GLE72 στις 10 Σεπτεμβρίου του 2017, δεν αποτελούν σοβαρό κίνδυνο (Kataoka et al., 2018; Mishev and Usoskin, 2018). Αντίθετα, GLEs υψηλής έντασης όπως το GLE69 στις 20 Ιανουαρίου του 2005, μπορεί να οδηγήσει σε δόσεις μεγαλύτερες κατά πολλές τάξεις μεγέθους, που να φτάνουν έως και τα $3 mSv/h$ (Butikofer et al., 2008; Mishev, 2014; Mishev et al., 2015).

5.2.1 Worst Case GCR

Στην παρούσα διατριβή, πραγματοποιείται μία πρώτη απόπειρα εκτίμησης της δόσης κατά τη διάρκεια ενός ακραίου γεγονότος Διαστημικού Καιρού. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται υπολογισμός των δόσεων ακτινοβολίας που μπορεί να οφείλονται στη χειρότερη δυνατή περίπτωση ροής γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Για τη μελέτη αυτή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CREME86 με

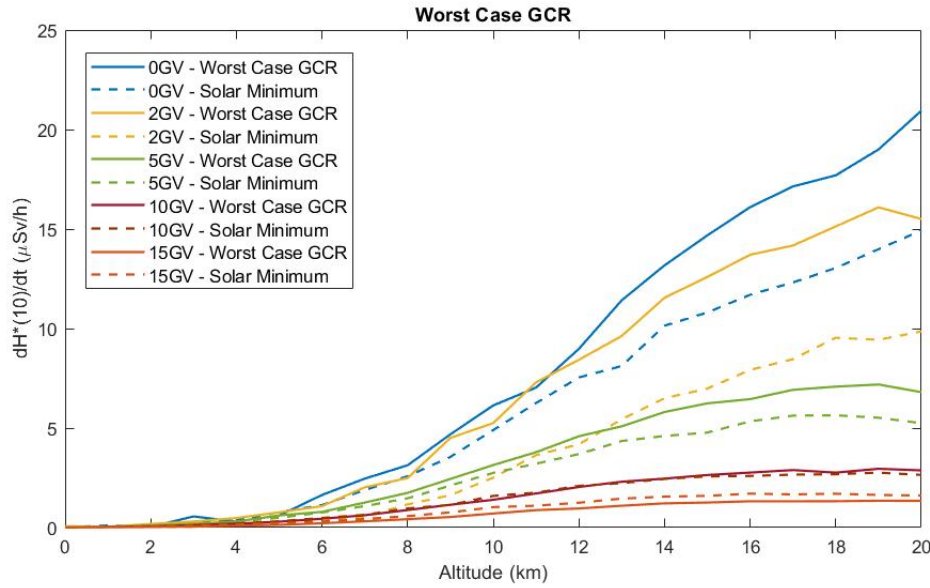
δείκτη $M = 3$ (Adams, 1986). Ο δείκτης αυτός δίνει τη χειρότερη περίπτωση ροών γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που επιτρέπουν αβεβαιότητες στα δεδομένα ροής και στην ηλιακή δραστηριότητα (Worst Case GCR). Αυτές οι ροές είναι τόσο υψηλές που έχουν μόνο 10% πιθανότητα να ξεπεραστούν από τις πραγματικές ροές ανά πάσα στιγμή. Το πρωτογενές φάσμα για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22. Η εξαγωγή του φάσματος έχει γίνει με το εργαλείο OMERE της TRAD, για συνθήκες διαταραγμένης μαγνητόσφαιρας.



Σχήμα 5.22: Μεταβολή του φάσματος πρωτογενών ακτίνων ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας για το σενάριο ‘Worst case GCR’ για τον Οκτώβριο του 1989).

Παρατηρούμε ότι οι ροές των σωματιδίων (ειδικότερα των πρωτονίων) είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας για τιμή δυσκαμψίας 0 GV (Σχήματα 5.2 και 5.3). Με είσοδο το φάσμα αυτό, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA για 50000 events, ενώ στη

συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA-R για 20 iterations, για τον υπολογισμό του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV, 2 GV, 5 GV, 10 GV και 15 GV), τόσο για τα υψόμετρα 0 – 20 km στο Σχήμα 5.23, όσο και για τα τρία συνήθη υψόμετρα αεροπορικών πτήσεων (FL310, FL350, FL390) στο Σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση του ρυθμού δόσης στην ατμόσφαιρα της Γης για ύψη 0 km έως 20 km για διάφορα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας για συνθήκες Worst Case GCR και ηλιακού ελαχίστου (έτος 2009).

Όπως είναι αναμενόμενο, η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στις πολικές περιοχές (μικρό R_c), ενώ σε μεγαλύτερα R_c δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές. Αξίζει να σημειωθεί, βέβαια, ότι ο ρυθμός δόσης στα 0 GV με βάση το σενάριο Worst Case GCR υπερβαίνει αντίστοιχα και τα 0 GV και τα 2 GV για το ηλιακό ελάχιστο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των ‘ανοιχτών’ δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου στις πολικές περιοχές, που επιτρέπουν την ελεύθερη είσοδο περισσότερων σωματιδίων με μεγαλύτερο εύρος ενεργειών. Καθώς πηγαίνουμε σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη (5 GV), ο ρυθμός δόσης για το Worst Case GCR εξακολουθεί και είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του ηλιακού ελαχίστου, αλλά παρουσιάζοντας πολύ μικρότερη διαφορά. Αντίθετα, στα μικρά γεωγραφικά πλάτη και στις ισημερινές περιοχές (10 GV και 15 GV), το φαινόμενο αυτό αντιστρέφεται, υποδεικνύοντας έτσι την υψηλή θωράκιση του γεωμαγνητικού πεδίου στις περιοχές αυτές.

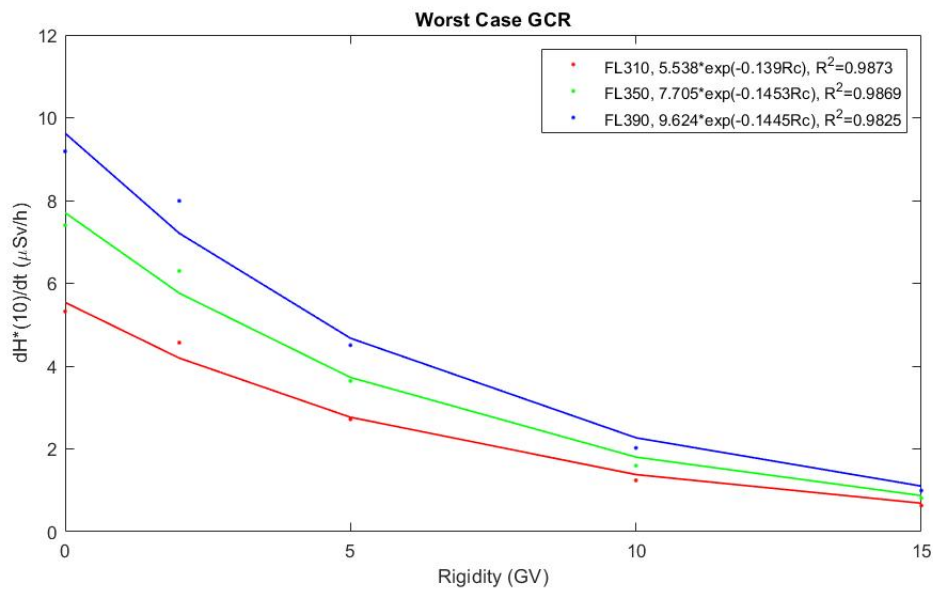
Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στο ρυθμό δόσης για το σενάριο Worst Case GCR και το ηλιακό ελάχιστο, για διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας

για τα συνήθη υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390). Παρατηρούμε ότι στα 0 GV, ο ρυθμός δόσης μπορεί να είναι έως και 49% μεγαλύτερος σε σχέση με τις συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, με την ποσοστιαία διαφορά να μειώνεται με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας.

R_c (GV)	% Διαφορά		
	FL310	FL350	FL390
0	36.1	49.0	34.5
2	34.1	31.7	29.6
5	14.8	19.9	18.8
10	-10.9	-9.5	-7.4
15	-33.6	-30.4	-26.9

Πίνακας 5.4: Ποσοστιαία διαφορά του ρυθμού δόσης για το σενάριο Worst Case GCR και το ηλιακό ελάχιστο

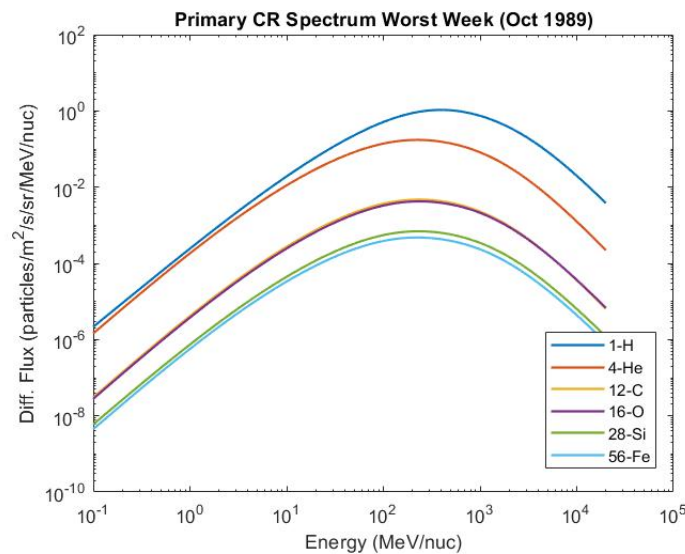
Στο Σχήμα 5.24, έχει γίνει εφαρμογή μίας εκθετικής συνάρτησης με βάση τη σχέση 5.1, που χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη υποενότητα. Παρατηρούμε και εδώ ότι έχουμε μία πολύ καλή προσαρμογή με βάση τις τιμές του συντελεστή R^2 .



Σχήμα 5.24: Ρυθμός δόσης στην ατμόσφαιρα της Γης για το σενάριο Worst Case GCR από 0 GV έως 17 GV για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390.

5.2.2 Worst Week

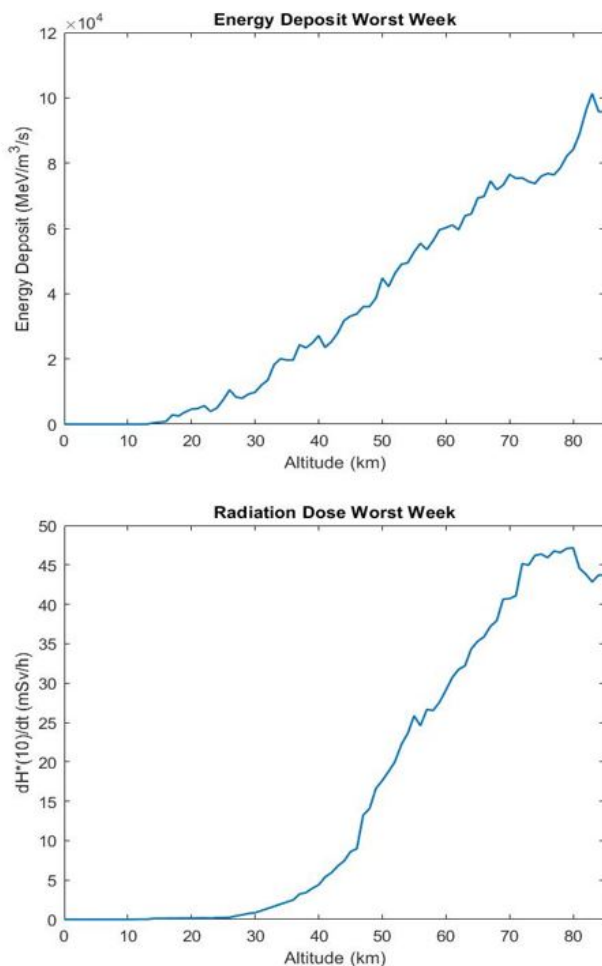
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία εκτίμηση του ρυθμού δόσης κατά τη διάρκεια ενός έντονου ηλιακού γεγονότος. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε το σενάριο worst week, το οποίο αντιστοιχεί σε μία σειρά έντονων γεγονότων SEP τον Οκτώβριο του 1989. Πιο συγκεκριμένα από τις 19 Οκτωβρίου έως τις 25 Οκτωβρίου 1989, έλαβαν χώρα δύο πολύ ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις, καθώς και το ισχυρότερο SEP του ηλιακού κύκλου 22, με αποτέλεσμα το σενάριο αυτό να μπορεί να χαρακτηριστεί ως ‘99% χειρότερη περίπτωση’. Για την προσομοίωση του σεναρίου αυτού χρησιμοποιήθηκε το φάσμα Worst Week Scenario από το μοντέλο CREME2009 (Σχήμα 5.25). Αξίζει να σημειωθεί πως το φάσμα αυτό δεν περιλαμβάνει το υπόβαθρο της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας (Mendenhall and Weller, 2012; Nymmik et al., 1992; Tytka et al., 1997, 2010).



Σχήμα 5.25: Φάσμα πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας από το μοντέλο CREME2009 για την ατμόσφαιρα της Γης για τη ‘worst week’.

Οι τιμές ενεργειακής εναπόθεσης και του ρυθμού δόσης για όλο το ύψος της ατμόσφαιρας της Γης (0 km έως 85 km) για το γεγονός αυτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.26. Παρατηρούμε πως η εναποτιθέμενη ενέργεια είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο και μέγιστο. Παράλληλα μειώνεται σταδιακά προς την επιφάνεια του εδάφους χωρίς να παρουσιάζει κάποιο μέγιστο, όπως στις ‘ήσυχες’ περιόδους ηλιακής δραστηριότητας, ενώ κάτω από τα 15 km πρακτικά μηδενίζεται.

Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος διατηρείται σταθερός στην ανώτερη ατμόσφαιρα, μειώνεται απότομα μέχρι περίπου τα 50 km ενώ στη συνέχεια μειώνεται πιο ομαλά μέχρι περίπου



Σχήμα 5.26: Εναποτιθέμενη ενέργεια (πάνω) και ρυθμός δόσης (κάτω) στην ατμόσφαιρα της Γης (0 km έως 85 km) για το Worst Week Scenario.

τα 20 km. Παρατηρούμε πως κατά τη διάρκεια αυτού του έντονου ηλιακού γεγονότος ο ρυθμός δόσης είναι πολύ υψηλότερος σε σχέση με τις 'ήσυχες' περιόδους ηλιακής δραστηριότητας, που μελετήθηκαν ανωτέρω, αγγίζοντας τα μερικά δεκάδες mSv/h. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποτελέσει εν δυνάμει κίνδυνο για τα βιολογικά συστήματα. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε πως λόγω της υψηλής θωράκισης που προσφέρει η ατμόσφαιρα της Γης, τα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης των επιβατικών αεροσκαφών (FL310, FL350, FL390) δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

Μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνουν την αναζήτηση κατάλληλου φάσματος πρωτογενών σωματιδίων για την εκτέλεση προσομοιώσεων και μελέτη περισσότερων έντονων γεγονότων, όπως GLEs, αλλά και μειώσεων Forbush.

5.3 Αεροπορικές πτήσεις

Η γνώση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος τόσο ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας όσο και ως συνάρτηση της ηλιακής δραστηριότητας, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για σκοπούς ακτινοπροστασίας, καθώς επιτρέπει την εκτίμηση της δόσης ακτινοβολίας που δέχονται τα πληρώματα αεροσκαφών και οι επιβάτες κατά τη διάρκεια διαφόρων αεροπορικών πτήσεων. Πολλοί ερευνητές μέχρι σήμερα έχουν προσπαθήσει να υπολογίσουν δόσεις ακτινοβολίας για διάφορες αεροπορικές πτήσεις σε διαφορετικές φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας (Beck, 2007; Beck et al., 2006, 2008; Bottollier-Depois et al., 2012; Butikofer et al., 2008; Clairand et al., 2009; EC, 2004, 2009, 2017; Hubert and Aubry, 2017, 2018; Lantos and Fuller, 2004; Mares and Yasuda, 2010; Shea and Smart, 2000).

Στα πλαίσια της διατριβής αυτής πραγματοποιείται μία εκτίμηση της δόσης για διάφορες πτήσεις με σημείο αναχώρησης το διεθνές αεροδρόμιο της Αθήνας Ελευθέριος Βενιζέλος, με βάση τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το DYASTIMA-R. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι πληροφορίες για τα αεροδρόμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Πόλη	Αεροδρόμιο	ICAO	Γεωγρ. Συνταγμένες
Αθήνα	Eleftherios Venizelos Airport	LGAV	37.9°N, 23.9°E
Λάρνακα	Larnaca International Airport	LCLK	34.9°N, 33.6°E
Ρώμη	Leonardo da Vinci-Fiumicino Airport	LIRF	41.8°N, 12.2°E
Μαδρίτη	Adolfo Suárez Madrid-Barajas Airport	LEMD	40.5°N, 3.6°W
Παρίσι	Charles de Gaulle Airport	LFPG	49.0°N, 2.5°E
Βερολίνο	Berlin Tegel Airport	EDDT	52.6°N, 13.3°E
Άμστερνταμ	Amsterdam Airport Schiphol	EHAM	52.3°N, 4.8°E
Βρυξέλλες	Melsbroek Air Base	EBMB	50.5°N, 4.3°E
Λονδίνο	Heathrow Airport	EGLL	51.5°N, 0.5°W
Μόσχα	Sheremetyevo International Airport	UUUU	56.0°N, 37.4°E
Στοκχόλμη	Stockholm Arlanda Airport	ESSA	59.6°N, 17.9°E
Ρέικιαβικ	Reykjavík Airport	BIRK	64.1°N, 21.9°W
Ντουμπάι	Dubai International Airport	OMDB	25.3°N, 55.4°E
Νέα Υόρκη	John F. Kennedy International Airport	KJFK	40.6°N, 73.8°W
Τόκυο	Narita International Airport	RJAA	35.8°N, 140.4°E

Πίνακας 5.5: Αεροδρόμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα

Η εκτίμηση της δόσης με το DYASTIMA-R πραγματοποιήθηκε για συνολικά δεκατέσσερις πτήσεις προς διεθνείς προορισμούς από την Αθήνα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν έντεκα δημοφιλείς προορισμοί στην Ευρώπη (Λάρνακα, Ρώμη, Βερολίνο, Βρυξέλλες, Παρίσι, Άμστερνταμ, Μόσχα, Μαδρίτη, Λονδίνο, Στοκχόλμη, Ρέικιαβικ), δύο προορισμοί στην Ασία (Ντουμπάι, Τόκυο) και ένας προορισμός στη Βόρεια Αμερική (Νέα Υόρκη). Στον Πίνακα 5.6

Πτήση	Διάρκεια Πτήσης	Πτήση	Διάρκεια Πτήσης
Αθήνα-Λάρνακα	1h 38min	Αθήνα-Μαδρίτη	3h 27min
Αθήνα-Ρώμη	1h 49min	Αθήνα-Λονδίνο	3h 29min
Αθήνα-Βερολίνο	2h 44min	Αθήνα-Στοκχόλμη	3h 30min
Αθήνα-Βρυξέλλες	3h 6min	Αθήνα-Ντουμπάι	4h 35min
Αθήνα-Παρίσι	3h 7min	Αθήνα-Ρέκιαβικ	5h 41min
Αθήνα-Αμστερνταμ	3h 11min	Αθήνα-Ν. Υόρκη	10h 22min
Αθήνα-Μόσχα	3h 16min	Αθήνα-Τόκυο	12h 21min

Πίνακας 5.6: Διάρκεια των πτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα www.travelmath.com.

παρατίθεται η διάρκεια κάθε πτήσης, η οποία έχει υπολογιστεί σύμφωνα με την ιστοσελίδα www.travelmath.com. Ο υπολογισμός του χρόνου πτήσης προϋποθέτει μέση ταχύτητα πτήσης για ένα εμπορικό αεροσκάφος 500 mph, το οποίο ισοδυναμεί με 805 km/h (434 κόμβοι) και περιλαμβάνει επιπλέον 30 min για την απογείωση και την προσγείωση. Ο ακριβής χρόνος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την ταχύτητα των ανέμων.



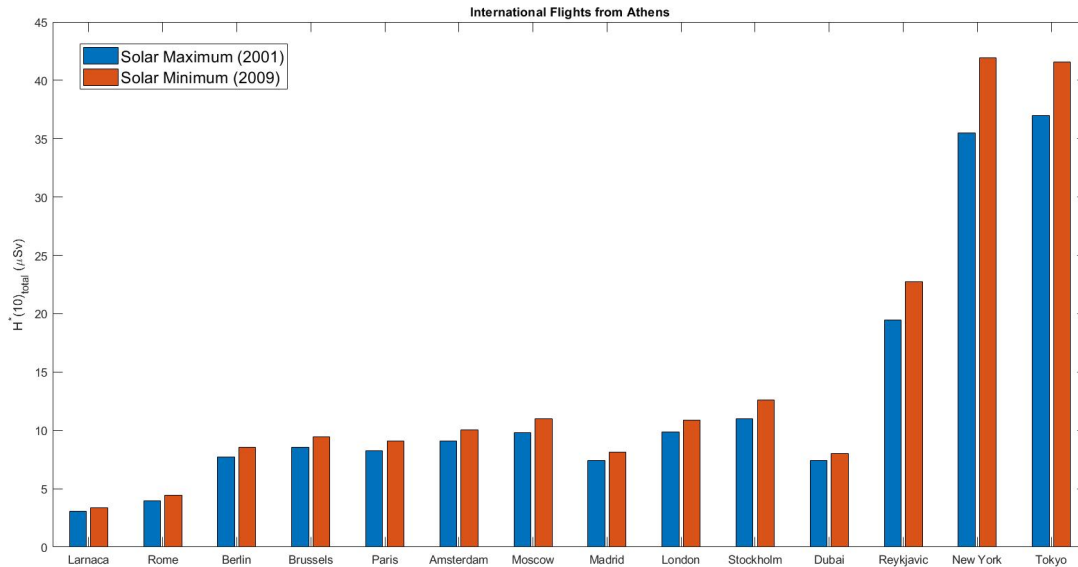
Σχήμα 5.27: Πτήσεις από το Αεροδρόμιο της Αθήνας που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή (www.greatcirclemap.com).

Στο Σχήμα 5.27 γίνεται απεικόνιση της θεωρητικά βέλτιστης διαδρομής που ακολουθείται σε κάθε πτήση. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαδρομή κάθε πτήσης, όπως και ο καθορισμός διάρκειάς της, βασίζεται στη θεωρία των μέγιστων κύκλων, και όχι σε ευθείες. Καθώς κινούμαστε σε μία σφαιρική επιφάνεια, όπως είναι η Γη, τότε η συντομότερη διαδρομή (γεωδαισιακή) ανάμεσα σε δύο σημεία αντιστοιχεί σύμφωνα με τη γεωμετρία Riemann σε ένα μέγιστο κύκλο, και όχι σε μία ευθεία σύμφωνα με την Ευκλείδεια γεωμετρία. Ο καθορισμός της τροχιάς κάθε πτήσης έγινε σε python με την εφαρμογή των γεωδαισιακών ρουτινών στο GeographicLib, όπως περιγράφεται στην ιστοσελίδα <https://geographiclib.sourceforge.io/html/python/index.html>. Με τον τρόπο αυτό, η απόσταση ανάμεσα στο αρχικό σημείο και τον τελικό προορισμό χωρίζεται σε σημεία των οποίων η απόσταση είναι περίπου 1° . Μέσα από το πρόγραμμα, βρίσκουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων αυτών, τα οποία αντιστοιχίζονται σε τιμές κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας με βάση χάρτες μαγνητικής δυσκαμψίας που υπάρχουν διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία (Gerontidou et al., 2021; Smart and Shea, 1997, 2008a,b, 2019). Οι χάρτες αυτοί δίνουν την τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας για κάθε 5° γεωγραφικού πλάτους και 15° γεωγραφικού μήκους σε ύψος 20 km , με χρήση του μοντέλου IGRF για το μαγνητικό πεδίο για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα. Τέλος, έγινε αντιστοίχιση των τιμών μαγνητικής δυσκαμψίας με τιμές του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$, όπως έχουν υπολογιστεί με τις προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA-R.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη συνολική ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος $H^*(10)_{total}$, η διάρκεια κάθε πτήσης χωρίστηκε σε χρονικά διαστήματα των 10 min . Για κάθε τέτοιο χρονικό διάστημα, υπολογίστηκε η δόση, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε άθροιση όλων των επιμέρους τιμών. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν για ένα μέσο ύψος πτήσης FL350, ενώ δεν έχουμε λάβει υπόψη μας τις υψομετρικές μεταβολές λόγω απογείωσης και προσγείωσης.

Έτσι, μία πρώτη εκτίμηση για τη συνολική δόση για τις παραπάνω πτήσεις για τα έτη 2001 και 2009, που αντιστοιχούν σε συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας αντίστοιχα, δίνεται στο Σχήμα 5.28. Οι τιμές αυτές είναι διαθέσιμες στον Πίνακα 5.7. Σε κάθε περίπτωση, οι δόσεις αυτές δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα καθορισμένα όρια. Παρόλα αυτά πρέπει να δωθεί ιδιαίτερη σημασία στην επαγγελματική έκθεση των πληρωμάτων των αεροσκαφών, καθώς οι δόσεις είναι αθροιστικές κατά τη διάρκεια του έτους. Οι πτήσεις είναι τοποθετημένες με αύξουσα σειρά διάρκειας πτήσης. Οι δόσεις που λαμβάνουν τα πληρώματα αεροσκαφών εξαρτώνται από το ύψος, τη διάρκεια και τη διαδρομή της πτήσης, καθώς και από την ηλιακή δραστηριότητα. Παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου (2009) έχουμε μεγαλύτερη δόση.

Βλέπουμε, επίσης, πως οι πτήσεις με τη μικρότερη διάρκεια (Αθήνα - Λάρνακα και Αθήνα



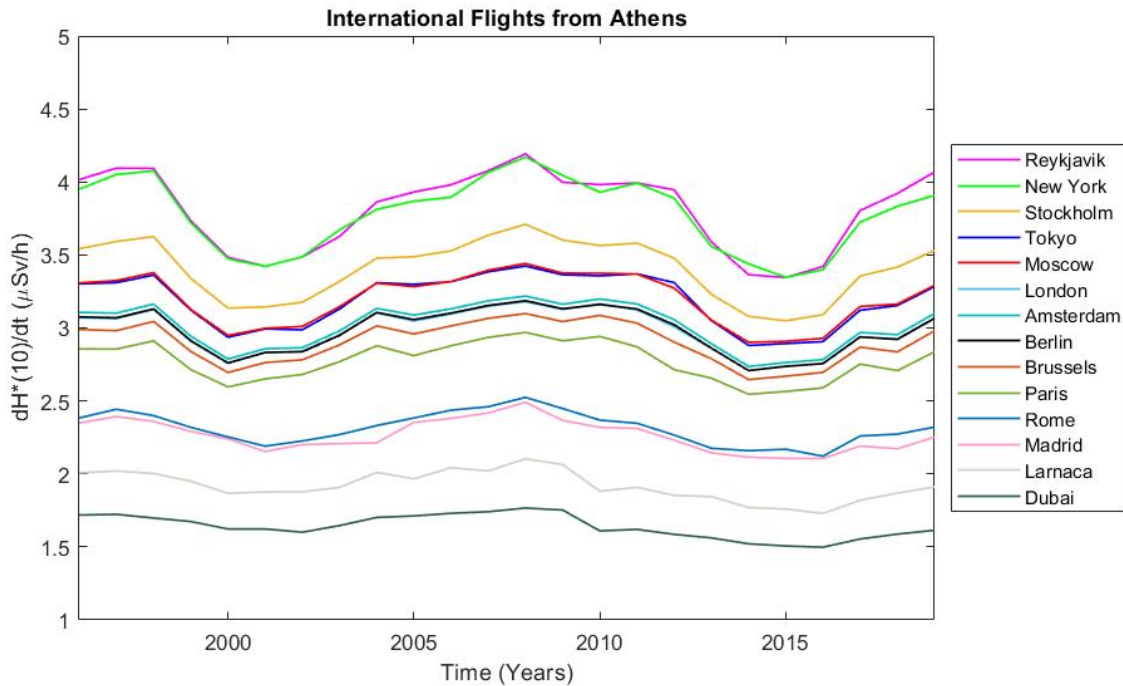
Σχήμα 5.28: Συνολική ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια διάφορων αεροπορικών πτήσεων από την Αθήνα για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (2001 και 2009), όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R.

- Ρώμη) παρουσιάζουν τη μικρότερη δόση, ενώ οι πτήσεις με τη μεγαλύτερη διάρκεια (Αθήνα - Νέα Υόρκη και Αθήνα - Τόκυο) έχουν τη μεγαλύτερη δόση. Παρόλ' αυτά, δεν μπορούμε να βγάλουμε σαφές συμπέρασμα για την έκθεση μόνο με βάση τη χρονική διάρκεια της πτήσης. Κι αυτό γιατί, ενώ η πτήση Αθήνα - Μαδρίτη έχει την ίδια διάρκεια με την πτήση Αθήνα - Λονδίνο, η πρώτη παρουσιάζει μικρότερη συνολική δόση. Αντίστοιχα, η πτήση Αθήνα - Ντουμπάι διαρκεί μία ώρα παραπάνω από την πτήση Αθήνα - Στοκχόλμη, και παρόλα αυτά έχει μικρότερη δόση. Το γεγονός αυτό δείχνει τη σημαντική επίδραση της διαδρομής του αεροσκάφους για κάθε πτήση, ιδιαίτερα το γεωγραφικό πλάτος, το οποίο οδηγεί και σε μεταβολές της μαγνητικής δυσκαμψίας (Hubert and Aubry, 2017, 2018)

Για το λόγο αυτό, πέρα από τη συνολική δόση, κρίνεται απαραίτητη και η εκτίμηση του ρυθμού δόσης κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Για να υπολογίσουμε το ρυθμό ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, διαιρούμε τη συνολική δόση με το χρόνο διάρκειας κάθε πτήσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.29, για τα έτη 1996 - 2019, δηλαδή για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24. Ο χαμηλότερος ρυθμός δόσης παρατηρείται στην πτήση Αθήνα - Ντουμπάι ενώ ο υψηλότερος ρυθμός δόσης στην πτήση Αθήνα - Ρείκιαβικ. Αυτό συμβαίνει γιατί το Ρείκιαβικ ως προορισμός βρίσκεται στο μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος, με αποτέλεσμα το αεροσκάφος να διέρχεται από σημεία υψηλότερης μαγνητικής δυσκαμψίας κατά τη διάρ-

κεια πτήσης, τα οποία αντιστοιχούν σε υψηλότερους ρυθμούς δόσης. Αντίθετα, το Ντουμπάι βρίσκεται σε μικρό γεωγραφικό πλάτος, και άρα παρουσιάζει χαμηλότερο ρυθμό δόσης λόγω της μεγαλύτερης μαγνητικής δυσκαμψίας στην περιοχή εκείνη. Οι πτήσεις που αφορούν την κεντρική Ευρώπη (Άμστερνταμ, Βερολίνο, Βρυξέλλες, Παρίσι) έχουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό δόσης, ενώ οι πτήσεις προς βορειότερες περιοχές (Λονδίνο, Στοκχόλμη, Μόσχα) παρουσιάζουν αυξημένο ρυθμό δόσης. Αντίστοιχα, οι περιοχές της ευρύτερης Μεσογείου (Μαδρίτη, Ρώμη, Λάρνακα), παρουσιάζουν πολύ πιο χαμηλούς ρυθμούς δόσης.

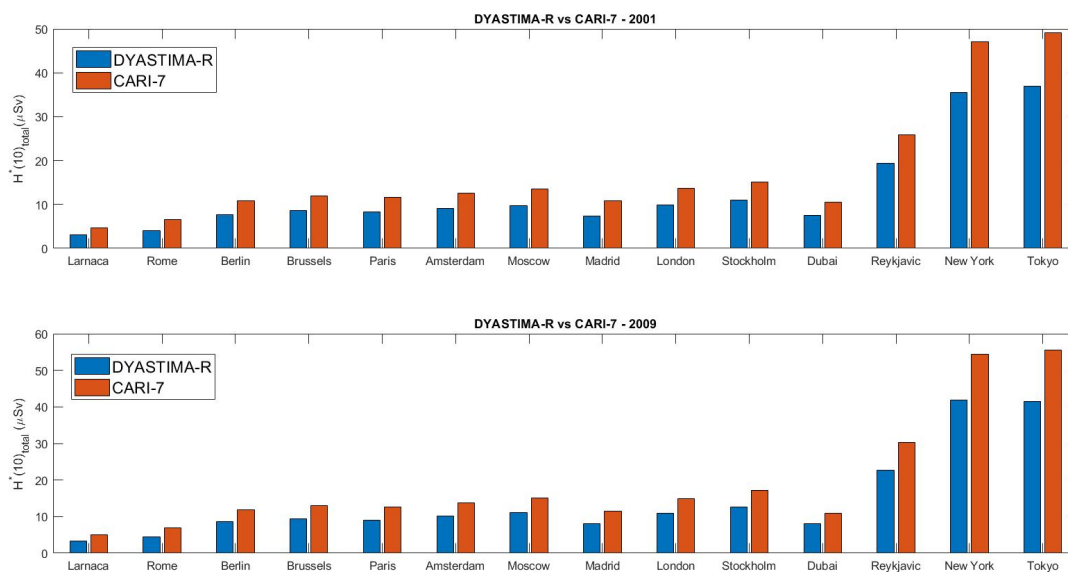
Αξίζει να σημειωθεί πως ο ρυθμός δόσης κατά τη διάρκεια των πτήσεων ακολουθεί την ενδεκαετή και την 22ετή μεταβολή σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό (Mavromichalaki et al., 1997). Οι υψηλότεροι ρυθμοί δόσης παρουσιάζονται την περίοδο 2007 - 2009, που αντιστοιχεί στην περίοδο του εκτεταμένου ηλιακού ελαχίστου ανάμεσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, ενώ οι χαμηλότεροι ρυθμοί δόσης αντιστοιχούν στα ηλιακά μέγιστα των δύο κύκλων (2001 και 2014). Η εξάρτηση από την ηλιακή δραστηριότητα είναι εμφανής στις πτήσεις με προορισμούς με υψηλό γεωγραφικό πλάτος (Ρέικιαβικ, Στοκχόλμη, Νέα Υόρκη, Κεντρική Ευρώπη, Τόκυο) ενώ ο ρυθμός δόσης σε πτήσεις με προορισμούς σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, είναι σχεδόν ανεξάρτητος από τη φάση του ηλιακού κύκλου (περιοχή της Μεσογείου, Ντουμπάι).



Σχήμα 5.29: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια διάφορων αεροπορικών πτήσεων από την Αθήνα, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R.

$H^*(10)_{total} (\mu Sv)$				
Πτήσεις	DYASTIMA-R		CARI-7	
	2001	2009	2001	2009
Αθήνα-Λάρνακα	3.06	3.37	4.71	4.95
Αθήνα-Ρώμη	3.98	4.45	6.52	6.93
Αθήνα-Βερολίνο	7.74	8.56	10.80	11.90
Αθήνα-Βρυξέλλες	8.56	9.44	12.00	13.10
Αθήνα-Παρίσι	8.26	9.08	11.70	12.70
Αθήνα-Αμστερνταμ	9.10	10.07	12.60	13.80
Αθήνα-Μόσχα	9.79	11.03	13.50	15.10
Αθήνα-Μαδρίτη	7.43	8.16	10.90	11.50
Αθήνα-Λονδίνο	9.86	10.89	13.70	15.00
Αθήνα-Στοκχόλμη	11.00	12.61	15.10	17.10
Αθήνα-Ντουμπάι	7.44	8.03	10.50	10.90
Αθήνα-Ρέικιαβικ	19.45	22.72	25.80	30.20
Αθήνα-N. Υόρκη	35.47	41.93	47.00	54.40
Αθήνα-Τόκυο	36.97	41.55	49.20	55.50

Πίνακας 5.7: Συνολική ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος για διάφορες αεροπορικές πτήσεις για τα έτη 2001 και 2009, όπως υπολογίστηκαν με τα λογισμικά DYASTIMA-R και CARI-7.



Σχήμα 5.30: Σύγκριση της συνολικής ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια διάφορων αεροπορικών πτήσεων από την Αθήνα για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (2001 και 2009) με το DYASTIMA-R και το CARI-7.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση των τιμών της συνολικής ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $H^*(10)_{total}$ που προέκυψαν με το DYASTIMA-R με τις αντίστοιχες από το διεθνές αναγνωρισμένο λογισμικό CARI-7 της FAA (Copeland, 2017). Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τα έτη 2001 και 2009, θεωρώντας ως υψόμετρο πτήσης το FL350 (Πίνακας 5.7). Παρατηρούμε πως οι τιμές που έχουν προκύψει με το DYASTIMA-R είναι παραπλήσιες με αυτές του CARI-7. Μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται στις πτήσεις μικρής και μεσαίας διάρκειας, ενώ οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις δύο μεγάλης διάρκειας πτήσεις (Αθήνα - Νέα Υόρκη, Αθήνα - Τόκυο), τόσο στο 2001 όσο και στο 2009. Το CARI-7 κάνει συστηματικά υπερεκτίμηση της δόσης σε σχέση με το DYASTIMA-R. Η απόκλιση οφείλεται στα συστηματικά σφάλματα των παραμέτρων εισόδου του DYASTIMA, καθώς η πλειοψηφία τους βασίζεται σε μοντέλα, και στο απλουστευμένο προφίλ πτήσης (Sihver et al., 2015).

Αξίζει να σημειωθεί, πως αυτή τη στιγμή στο DYASTIMA / DYASTIMA-R δε λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία και η θωράκιση που προσφέρεται από το αεροσκάφος. Έτσι, η πραγματική δόση εντός του αεροπλάνου ενδεχομένως να είναι χαμηλότερη από τους υπολογισμούς μας που έχουν πραγματοποιηθεί στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, ανάλογα με το είδος του αεροσκάφους, τη θέση του ατόμου μέσα σε αυτό, τον αριθμό των επιβατών και την ποσότητα του καυσίμου. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση ανιχνευτών εντός της καμπίνας του αεροπλάνου προκειμένου να συμπεριληφθεί η επίδραση των παραπάνω (Sihver et al., 2015). Στα μελλοντικά σχέδια του DYASTIMA περιλαμβάνεται η προαιρετική χρήση γεωμετρίας του αεροσκάφους, από διάφορα υλικά, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η θωράκιση κάθε υλικού.

Όπως βλέπουμε, ο υπολογισμός της δόσης ($H^*(10)_{total}$ και $dH^*(10)/dt$) κατά τη διάρκεια μίας πτήσης δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση, καθώς πρέπει να γίνει επεξεργασία δεδομένων από πολύ μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων για διαφορετικές γωγραφικές συντεταγμένες, διάφορες τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας, διαφορετικά υψόμετρα πτήσης και διαφορετικές φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσπάθεια εκτίμησης της δόσης κατά τη διάρκεια πτήσεων από την Αθήνα προς διαδεδομένους προορισμούς με τη χρήση του λογισμικού DYASTIMA - DYASTIMA-R. Μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνουν τη χρήση μιας πιο ρεαλιστικής διαδρομής πτήσης (περισσότερα επίπεδα πτήσης, υπολογισμός χρόνου απογείωσης και προσγείωσης, πιο ακριβής τροχιά), την εκτίμηση δόσεων για περισσότερες πτήσεις σε όλο τον κόσμο, αλλά και η εκτίμηση της δόσης κατά τη διάρκεια έντονων γεγονότων Διαστημικού Καιρού, όπως SEPs και GLEs.

5.4 Ατμόσφαιρες άλλων πλανητών

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στις ατμόσφαιρες της Αφροδίτης και του Άρη. Περιγράφονται οι κυριότερες παράμετροι εισόδου για το DYASTIMA / DYASTIMA-R και γίνεται ανάλυση των πρώτων αποτελεσμάτων.

Η εξερεύνηση του διαστήματος αποτελεί μία περιπέτεια για την ανθρωπότητα, η οποία παρέχει τη δυνατότητα ανακαλύψεων που ξεπερνούν τη φαντασία μας και αποφέρουν παράλληλα μεγάλο όφελος για την κοινωνία. Ο κοσμοναύτης Yuri Gagarin εκτέλεσε την πρώτη επανδρωμένη αποστολή στην ανθρώπινη ιστορία όταν μπήκε σε τροχιά γύρω από τη Γη το 1961. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1969, ο Neil Armstrong και ο Buzz Aldrin είναι οι πρώτοι άνθρωποι που περπατούν σε ένα άλλο ουράνιο σώμα του ηλιακού μας συστήματος, πέρα από τη Γη, τη Σελήνη. Από την εποχή εκείνη, όμως, τα ανθρώπινα διαστημικά προγράμματα δεν έχουν αναπτυχθεί πολύ, με την προσηδίαση στη Σελήνη να αποτελεί ακόμα και σήμερα το μεγαλύτερο μας επίτευγμα. Παρά τη στασιμότητα αυτή, το πρόγραμμα ARTEMIS, με στόχο να φέρει τον επόμενο άνδρα και την πρώτη γυναίκα στη Σελήνη το 2024, αναζοπυρώνει τις ανθρώπινες προσπάθειες για την εξερεύνηση και κατάκτηση του διαστήματος, με τον σχεδιασμό μελλοντικών επανδρωμένων αποστολών σε γειτονικούς πλανήτες, όπως η Αφροδίτη, ο Άρης, κλπ.

Η μελέτη των επιδράσεων του Διαστημικού Καιρού γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, καθώς η ανθρώπινη έρευνα και εξερεύνηση επεκτείνονται από την τροχιά κοντά στη Γη (LEO) στο Ηλιακό σύστημα. Τα οφέλη από την εξερεύνηση αυτή πρέπει να εξισορροπούνται με το κόστος, την ασφάλεια και τις αρχές της βιοηθικής για την απόφαση των αποδεκτών ορίων κινδύνου για τους αστροναύτες. Έτσι, ο καθορισμός του περιβάλλοντος ακτινοβολίας τόσο στη LEO όσο και στον ευρύτερο διαστημικό χώρο και στις επιφάνειες των πλανητών κρίνεται απαραίτητος, με την έκθεση στη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία και στα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα (SPEs) να αποτελούν την κύρια ανησυχία για την υγεία των αστροναυτών. Η έκθεση τόσο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς όσο και της παραμονής στην επιφάνεια ενός άλλου πλανήτη, μπορεί να οδηγήσει σε καρκινογένεση και σε άλλες εκφυλιστικές ασθένειες, εξαιτίας των υψηλών δόσεων στις οποίες θα εκτεθούν τα πληρώματα των διαστημικών αποστολών (Cucinotta and Durante, 2006).

Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα του DYASTIMA / DYASTIMA-R, είναι ότι χάρη στην ελεύθερη παραμετροποίηση που παρέχει στο χρήστη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέρα από την ατμόσφαιρα της Γης και σε ατμόσφαιρες άλλων πλανητών. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, το DYASTIMA / DYASTIMA-R χρησιμοποιείται για πρώτη φορά για την εκτίμηση της έκθεσης στους δύο κοντινούς μας πλανήτες, την Αφροδίτη και τον Άρη.

5.4.1 Πλανήτης Αφροδίτη

Οι ατμόσφαιρες των πλανητών στο ηλιακό μας σύστημα εκτίθενται σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον ακτινοβολίας που αποτελείται από τον ηλιακό άνεμο, την υπεριώδη ακτινοβολία και τις ακτίνες X, καθώς και από κοσμικές ακτίνες γαλαξιακής ή ηλιακής προέλευσης (Herbst et al., 2020). Ύστερα από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην ατμόσφαιρα της Γης για τη μελέτη των δευτερογενών καταιγισμών και την αξιολόγηση της έκθεσης των πληρωμάτων αεροσκαφών, έχει σειρά η εκτίμηση της έκθεσης ενός αστροναύτη στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης. Η Αφροδίτη αποτελεί μία καλή πρώτη επιλογή, καθώς άλλοι πλανήτες στο ηλιακό μας σύστημα δεν έχουν αξιόλογη ατμόσφαιρα (όπως ο Ερμής και ο Άρης), είτε έχουν ατμόσφαιρες που αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο (όπως ο Δίας) είτε βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από τον Ήλιο όπου τα επίπεδα ακτινοβολίας δεν είναι πλήρως γνωστά (όπως ο Τιτάνας) (Youngquist et al., 2014).

Η Αφροδίτη είναι ο δεύτερος σε σειρά πλανήτης του ηλιακού μας συστήματος και απέχει από τον Ήλιο $0.72 AU$, δηλαδή $107.89 \cdot 10^6 km$ (η Γη απέχει $1 AU = 150.84 \cdot 10^6 km$). Πρόκειται για τον κοντινότερο γείτονα της Γης και, από ορισμένες απόψεις, οι δύο πλανήτες εμφανίζουν πολλές ομοιότητες. Η Αφροδίτη είναι παρόμοια με τη Γη τόσο σε διάμετρο (95%) όσο και σε μάζα (82%), ενώ και οι δύο είναι μικροί βραχώδεις πλανήτες στο εσωτερικό ηλιακό σύστημα που πιθανώς σχηματίστηκαν με παρόμοιες συνθήσεις και σήμερα κατέχουν και οι δύο αξιοσημείωτη ατμόσφαιρα. Παρόλ' αυτά, αν και η Αφροδίτη και η Γη, μπορεί να μοιάζουν ως δίδυμα στο σχηματισμό και στην πρώιμη ζωή τους, έχουν ακολουθήσει διαφορετικές εξελικτικές πορείες, ειδικά σε ότι αφορά την κατοικησιμότητα (habitability) και την πιθανότητα ζωής (Dartnell et al., 2015).

Η χαμηλότερη ατμόσφαιρα της Αφροδίτης είναι περίπου 90 φορές πυκνότερη στην επιφάνεια σε σχέση με τη Γη. Έχει μάλιστα συνολικό βάθος θωράκισης της τάξης του $\sim 10^5 g/cm^2$ σε αντίθεση με το $\sim 10^3 g/cm^2$ της Γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι καταιγισμοί των δευτερογενών σωματιδίων να αναπτύσσονται εκτενώς μέσα στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης. Αποτελείται από CO_2 (96.5%) και N_2 (3.5%). Η θερμοκρασία ως συνάρτηση του ύψους περιγράφεται από το Venus International Reference Atmosphere, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες παραμέτρους για τη μέση και κατώτερη ατμόσφαιρα (0 – 100 km) σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη ($\phi < 30^\circ$) και για την ανώτερη ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ημέρας (100 – 150 km) σε χαμηλό γεωγραφικό πλάτος ($\phi = 16^\circ$) (Keating et al., 1985; Kliore et al., 1985; Seiff et al., 1985). Το ατμοσφαιρικό προφίλ της Αφροδίτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

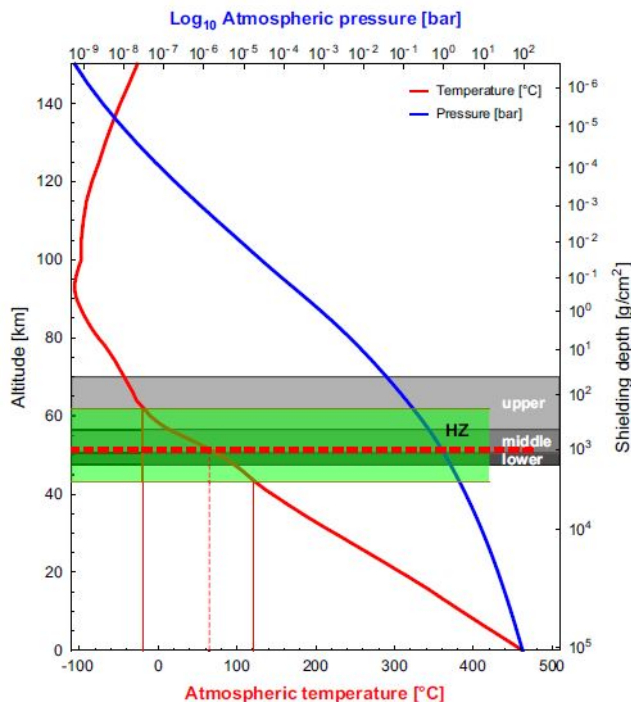
Διάφορες μελέτες υποδεικνύουν ότι για τουλάχιστον τα πρώτα 750 εκατομμύρια χρόνια, η ατμόσφαιρα της Αφροδίτης παρείχε κατοικήσιμες συνθήκες και ότι το υγρό νερό (σε μορφή

Υψόμετρο (<i>m</i>)	Θερμοκρασία ($^{\circ}C$)	Υψόμετρο (<i>m</i>)	Θερμοκρασία ($^{\circ}C$)
0	462.15	80000	-76.05
5000	423.65	90000	-103.75
10000	385.05	100000	-97.75
15000	347.65	105000	-98.15
20000	307.55	110000	-95.15
25000	266.05	115000	-91.15
30000	223.75	120000	-84.15
35000	182.35	125000	-75.15
40000	144.45	130000	-67.15
45000	112.25	135000	-58.15
50000	77.35	140000	-48.15
55000	29.15	145000	-37.15
60000	-10.35	150000	-26.65
70000	-43.35		

Πίνακας 5.8: Ατμοσφαιρικό προφίλ της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης (Keating et al., 1985; Kliore et al., 1985; Seiff et al., 1985).

υγρού) υπήρχε στην επιφάνειά της για σχεδόν δύο δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτό το χρονικό διάστημα θα μπορούσε να είναι αρκετό ώστε να εξελιχθεί ζωή, τουλάχιστον όπως τη γνωρίζουμε στη Γη. Η σταδιακή αύξηση όμως της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας οδήγησε στην εξάτμιση του επιφανειακού νερού, γεγονός που μπορεί να ανάγκασε τυχόν υπάρχοντες μικροοργανισμούς να μεταναστεύσουν στο ακόμα 'κατοικήσιμο στρώμα' νέφους της Αφροδίτης και να προσαρμοστούν στο περιβάλλον περιορισμένου νερού και χαμηλού pH των νεφών της Αφροδίτης (Herbst et al., 2020).

Σε μια πρώτη προσέγγιση, η πιθανή κατοικήσιμη ζώνη μιας εναέριας βιόσφαιρας στην Αφροδίτη θα ήταν η κατακόρυφη έκταση που αντιστοιχεί στο εύρος θερμοκρασίας ανάπτυξης γνωστών χερσαίων μικροοργανισμών σε ακραίες συνθήκες, δηλαδή μεταξύ περίπου $120^{\circ}C$ και $-20^{\circ}C$. Τα όρια αυτά τοποθετούν την κατοικήσιμη περιοχή μεταξύ 43 km ($120^{\circ}C$) και 62 km ($-20^{\circ}C$) πάνω από την επιφάνεια, επικαλύπτοντας τα στρώματα σύννεφων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.31 (Dartnell et al., 2015). Έτσι, η Αφροδίτη πολλές φορές αναφέρεται ως 'αδελφός' πλανήτη της Γης, σχέση που αφορά τις δύο ατμόσφαιρες, υποθέτοντας ότι η σύγκριση με τη Γη γίνεται $50\text{ km} - 55\text{ km}$ πάνω από την επιφάνεια της Αφροδίτης. Η επιφάνεια της Αφροδίτης αγγίζει θερμοκρασίες πάνω από 700 K και να είναι ιδιαίτερα εχθρική λόγω της τοξικότητάς της, αλλά σε ύψος περίπου $50 - 55\text{ km}$, η ατμόσφαιρα της Αφροδίτης έχει παρόμοια πίεση και θερμοκρασία με την ατμόσφαιρα της Γης στο επίπεδο του εδάφους. Αυτή η ευνοϊκή συνθήκη έχει οδηγήσει πολλούς ερευνητές να προτείνουν τον αποικισμό της Αφροδίτης, αναφερόμενη σε αυτή ως το πιο 'γήινο' περιβάλλον στο ηλιακό σύστημα (Youngquist et al., 2014).



Σχήμα 5.31: Ατμοσφαιρικό προφίλ της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης όπου διακρίνεται η κατοικήσιμη ζώνη (Dartnell et al., 2015).

Όπως στη Γη, έτσι και στην Αφροδίτη, το μέγιστο Pfozter και το μέγιστο του ατμοσφαιρικού ιονισμού λόγω κοσμικής ακτινοβολίας συμπίπτουν. Έτσι, ενώ στη Γη το ύψος αυτό είναι μεταξύ των 16 km και 25 km (Herbst et al., 2020; Ziegler, 1998), στην Αφροδίτη, βρίσκεται περίπου στα 64 km , το οποίο βρίσκεται εντός του επιπέδου νεφών (Herbst et al., 2020; Nordheim et al., 2015; Plainaki et al., 2016). Η ασυμφωνία αυτή οφείλεται στην διαφορετική πυκνότητα της ατμόσφαιρας κάθε πλανήτη, με την επιφανειακή πίεση της Αφροδίτης να είναι περίπου 90 φορές υψηλότερη από αυτή της Γης, έχοντας ως αποτέλεσμα μια ατμόσφαιρα πολύ πιο πυκνή (Herbst et al., 2020). Πιο συγκεκριμένα, η θωράκιση της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης είναι περίπου 10^5 g/cm^2 δηλαδή δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την επίγεια θωράκιση των 1033 g/cm^2 . Έτσι ακόμη και οι πιο ενεργητικές πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες παράγουν αμελητέα ακτινοβολία στην επιφάνεια της. Όμως, η πιθανή κατοικήσιμη περιοχή είναι πολύ λιγότερο προστατευμένη αφού η αιχμή του ιονισμού λόγω κοσμικών οριακά λαμβάνει χώρα εντός αυτού του στρώματος. Είναι επομένως πιθανό αυτό το μέγιστο περιβάλλον ακτινοβολίας να αποτελεί απειλή για την επιβίωση ζωής, μαζί με τους άλλους περιβαλλοντικούς κινδύνους όπως η οξύτητα, η θερμοκρασία και η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία (Dartnell et al., 2015). Παράλληλα, εξαιτίας αυτής της πυκνής ατμόσφαιρας, οι καταιγισμοί δευτερογενών σωματιδίων θα αναπτυχθούν

εκτενέστερα σε σχέση με τη Γη, όμως μόνο ένα μικρό κλάσμα των δευτερογενών σωματιδίων θα φτάσει στην επιφάνεια της Αφροδίτης.

Ενδεικτικά, για τις προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

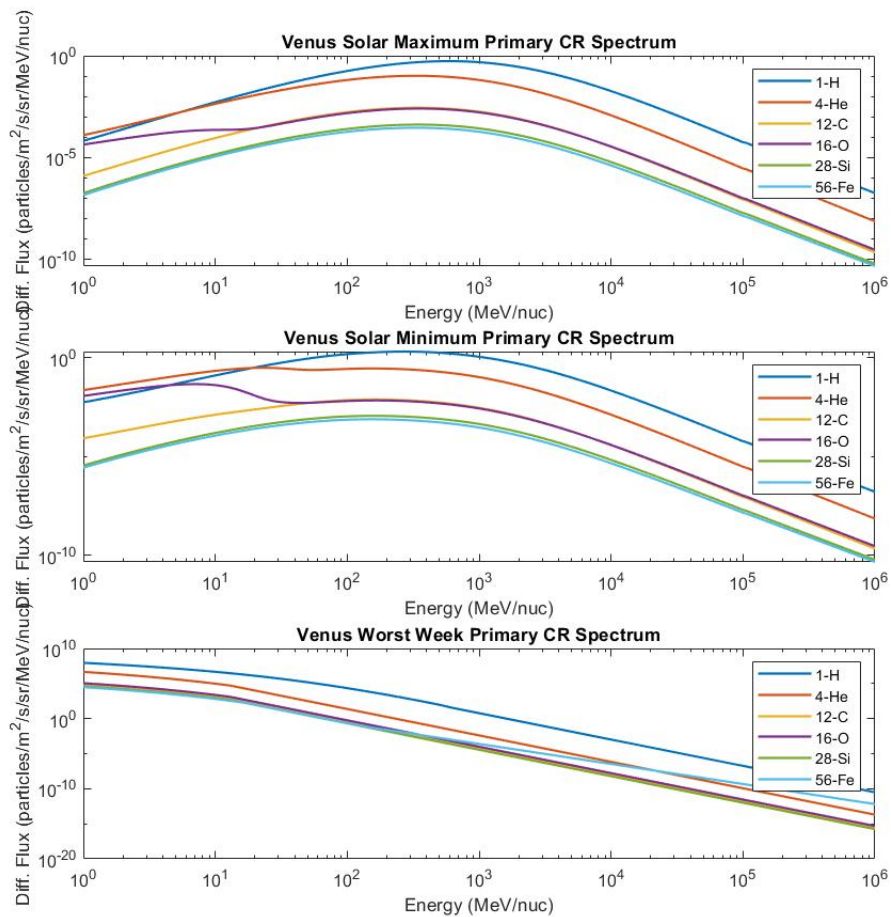
- μέση ακτίνα: $R_V = 6052 \text{ km}$,
- μέση επιφανειακή πίεση: $P = 92100 \text{ mbar}$, και
- επιτάχυνση της βαρύτητας: $g = 8.869 \text{ m/sec}^2$

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα γενικά χαρακτηριστικά της Αφροδίτης μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>. Για τον καθορισμό του ατμοσφαιρικού προφίλ χρησιμοποιήθηκε το Venus International Reference Atmosphere (Πίνακας 5.8). Η physics list που χρησιμοποιήθηκε είναι, όπως και στην περίπτωση της Γης, η *FTFP_BERT_HP*, η οποία συνιστάται για εφαρμογές ακτινοπροστασίας και θωράκισης (Herbst et al., 2020; Plainaki et al., 2016). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για 50000 events.

Η Αφροδίτη, σε αντίθεση με τη Γη, δεν έχει σημαντικό εγγενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο να μπορεί να δράσει ως ασπίδα και να εκτρέψει φορτισμένα σωματίδια είτε με υψηλή είτε με χαμηλή ενέργεια. Ωστόσο, επειδή η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία ionίζει ουδέτερα την άνω ατμόσφαιρα της Αφροδίτης, δημιουργείται μια ιονόσφαιρα, η οποία μέσω της αλληλεπίδρασης με τον ηλιακό άνεμο, δημιουργεί ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι αρκετά ισχυρό για να ελαχιστοποιήσει τη διάβρωση της άνω ατμόσφαιρας. Όμως, τα πρωτογενή κοσμικά σωματίδια είναι πολύ ενεργητικά ώστε να εκτραπούν από αυτό το ασθενές επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Έτσι, όπως και στις πολικές περιοχές της Γης, τα περισσότερα κοσμικά σωματίδια έχουν σχεδόν απεριόριστη πρόσβαση στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης. Ως εκ τούτου, το κατώφλι κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας για τα εισερχόμενα φορτισμένα ενεργειακά σωματίδια μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε όλα τα πλάτη (Dartnell et al., 2015; Herbst et al., 2020; Nordheim et al., 2015; Plainaki et al., 2016). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η πρωτογενής γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (ακόμα και χαμηλής ενέργειας) και τα SEPs να αλληλεπιδρούν απευθείας με την ανώτερη ατμόσφαιρα του πλανήτη και, ανάλογα με την ενέργειά τους, να διεισδύουν σε βαθύτερα στρώματα. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τη διατριβή αυτή, για τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0 ($B_X = 0$, $B_Y = 0$, $B_Z = 0$).

- **Φάσμα στην Αφροδίτη**

Το φάσμα των πρωτογενών σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της Αφροδίτης προήλθε από το μοντέλο CREME2009 (Mendenhall and Weller, 2012; Nymmik et al., 1992; Tylka et al., 1997, 2010), το οποίο είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://creme.isde.vanderbilt.edu/>, που παρέχει ροές ιόντων με $Z = 1 - 28$ (πρωτόνια έως νικέλιο) με ενέργειες από 1 MeV ανά νουκλεόνιο έως 100 GeV ανά νουκλεόνιο στο διαπλανητικό χώρο σε απόσταση 1 AU (απόσταση Γης - Ηλίου). Η γαλαξιακή συνιστώσα του CREME2009 βασίζεται στο μοντέλο ISO15390 (ISO, 2004), με επιπλέον επεκτάσεις, συμπεριλαμβανομένων των ανώμαλων κοσμικών ακτίνων σε χαμηλές ενέργειες.



Σχήμα 5.32: Φάσμα πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας από το μοντέλο CREME2009 για την ατμόσφαιρα της Αφροδίτης για συνθήκες ηλιακού μεγίστου (πάνω), ηλιακού ελαχίστου (μέση) και για τη 'worst week' (κάτω).

Πιο συγκεκριμένα, το πρωτογενές φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων εξήχθη από CREME2009 για ήμερες συνθήκες κατά τη διάρκεια μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δρα-

στηριότητας, δηλαδή συνθήκες περιβάλλοντος όπου απουσιάζουν έντονα γεγονότα από ηλιακά ενεργητικά σωματίδια. Στην ουρά του φάσματος αυτού πραγματοποιήθηκε μία πολυωνυμική προσαρμογή για κάθε είδος στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση του φάσματος σε ενέργειες έως 1 TeV ανά νουκλεόνιο. Χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή στοιχεία H , He , C , O , Si και Fe , καθώς αυτά τα έξι είδη αντιπροσωπεύουν το 97% της ενέργειας στο φάσμα των κοσμικών ακτίνων. Το φάσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.32.

Παρά το γεγονός ότι η Αφροδίτη βρίσκεται περίπου 30% πιο κοντά στον ήλιο σε σχέση με τη Γη, η αναβαθμιδόμενη ροή που παρέχεται από το CREME2009 δεν κρίνεται απαραίτητη για τη ροή της Αφροδίτης για ήρεμες συνθήκες, καθώς η μεταβολή της ροής κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης για τα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στο εσωτερο ηλιακό σύστημα είναι αμελητέες. Το φάσμα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ήδη με επιτυχία σε άλλες μελέτες (Nordheim et al., 2015; Plainaki et al., 2016). Παρόλα αυτά, υπάρχουν ερευνητές υποστηρίζουν πως η υψηλής ενέργειας ουρά του πρωτογενούς φάσματος, ιδίως εκείνη που φτάνει τα 10 TeV ανά νουκλεόνιο, ενδέχεται να έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ατμοσφαιρική δόση ακτινοβολίας (Herbst et al., 2020). Μία τέτοια διερεύνηση αφορά ένα μελλοντικό σχέδιο για τις προσομοιώσεις με το DYASTIMA.

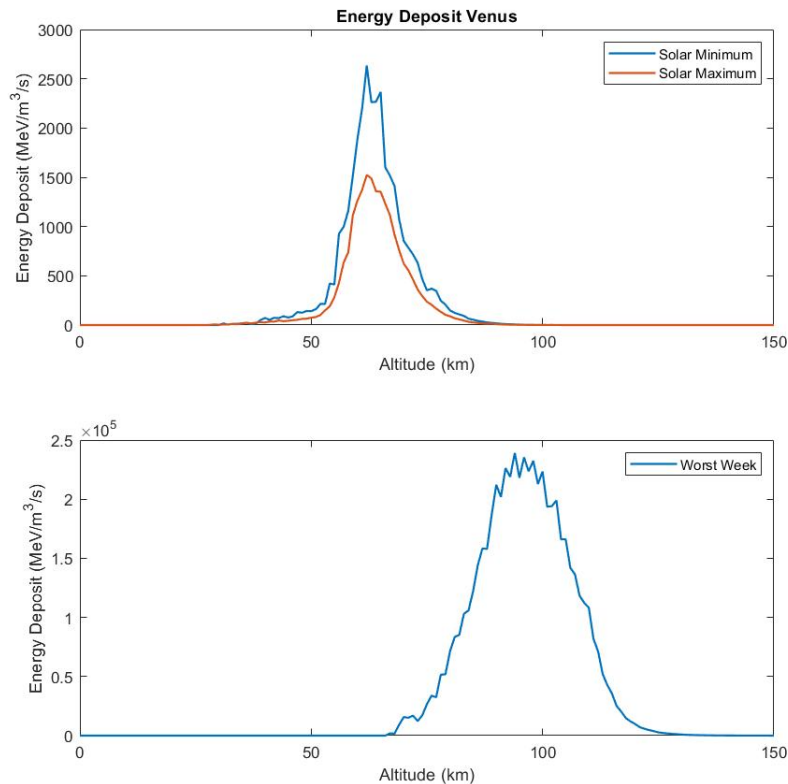
Καθώς η Αφροδίτη βρίσκεται πιο κοντά στον Ήλιο, πέρα από την ισοτροπική γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία, δέχεται και υψηλότερες ροές σωματιδίων από σποραδικά SEPs κατά τη διάρκεια εκλάμψεων ή CMEs. Λόγω της επιτάχυνσης των σωματιδίων αυτών στα μπροστινά σοκ των εκλάμψεων και των CMEs, τα SEPs έχουν ενέργειες έως και περίπου 100 MeV , ενώ φτάνουν στους πλανήτες του ηλιακού συστήματος ανισοτροπικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ροή να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τροχιακή απόσταση. Καθώς λοιπόν το CREME2009 παρέχει το φάσμα στο 1 AU , πραγματοποιήθηκε διόρθωση του φάσματος με την χρήση του γεωμετρικού παράγοντα $1/R^2$, όπου R η μέση απόσταση Αφροδίτης – Ήλιου ($0,72\text{ AU}$) (Dartnell et al., 2015; Herbst et al., 2020; Nordheim et al., 2015; Plainaki et al., 2016).

Πιο συγκεκριμένα, για την προσομοίωση ενός έντονου πρωτονικού γεγονότος SEP, χρησιμοποιήθηκε το φάσμα για συνθήκες έκλαμψης ‘worst week’ (Σχήμα 5.32, κάτω), το οποίο αντιστοιχεί σε μια σειρά έντονων γεγονότων SEP που συνέβησαν κατά τη διάρκεια του Οκτωβρίου 1989 (19/10/1989 έως 25/10/1989). Κατά τη διάρκεια της εβδομάδας αυτής παρουσιάστηκαν δύο πολύ ισχυρές ηλιακές εκλάμψεις. Τα μοντέλα SEPs στο CREME2009 βασίζονται σε δορυφορικές μετρήσεις σωματιδίων σε όλο το εύρος των ενεργειών και των στοιχείων. Το μοντέλο της χειρότερης εβδομάδας βασίζεται σε ροές SEPs κατά μέσο όρο για 180 ώρες (7.5 ημέρες), ξεκινώντας στις 1300 UT της 19 Οκτωβρίου 1989. Κατά τη διάρκεια της εβδομάδας αυτής, έλαβε χώρα το ισχυρότερο περιβάλλον SEP που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του

ηλιακού κύκλου 22. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περιβάλλον ‘99% χειρότερης περίπτωσης’. Το μοντέλο CREME96 Worst Week Scenario δεν περιλαμβάνει τη συμβολή των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, που κυριαρχούν στο φάσμα σε υψηλές ενέργειες (περίπου $500 - 1000 \text{ MeV}/nuc$, ανάλογα με το είδος του στοιχείου). Αξίζει να σημειωθεί πως σε υψόμετρο $63 - 64 \text{ km}$, η παρουσία ενός τέτοιου γεγονότος μπορεί να προκαλέσει αύξηση του ρυθμού ιονισμού έως και 319%, σε σχέση με το υπόβαθρο αλληλεπιδράσεων μεταξύ της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας και της ατμόσφαιρας (Plainaki et al., 2016).

- **Εναπόθεση ενέργειας στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης**

Η ενεργειακή εναπόθεση των δευτερογενών σωματιδίων στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα της Αφροδίτης για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (πάνω), αλλά και κατά τη διάρκεια του γεγονότος ‘worst week’ (κάτω), όπως υπολογίστηκε με το εργαλείο DYASTIMA παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.33: Εναπόθεση ενέργειας στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και μεγίστου (πάνω) και για τη ‘worst week’ (κάτω).

Παρατηρούμε ότι τόσο κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου όσο και του ηλιακού μέγιστου η μέγιστη εναπόθεση ενέργειας λαμβάνει χώρα σε ύψος 62 km , το οποίο πρακτικά συμπίπτει με την κορυφή του πιθανού κατοικήσιμου στρώματος της Αφροδίτης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σύμφωνο και με άλλες μελέτες (Dartnell et al., 2015). Μπορεί επίσης να θεωρήσει κανείς ότι η εναπόθεση ενέργειας εξαιτίας του καταιγισμού ξεκινάει περίου σε υψόμετρο 90 km , αυξάνει σχεδόν εκθετικά μέχρι την κορυφή των 62 km , και στη συνέχεια ελαττώνεται μέχρι περίπου τα 45 km από την επιφάνεια της Αφροδίτης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μονάχα ένα πολύ μικρό κλάσμα σωματιδίων να φτάνει τελικά στην επιφάνεια της Αφροδίτης.

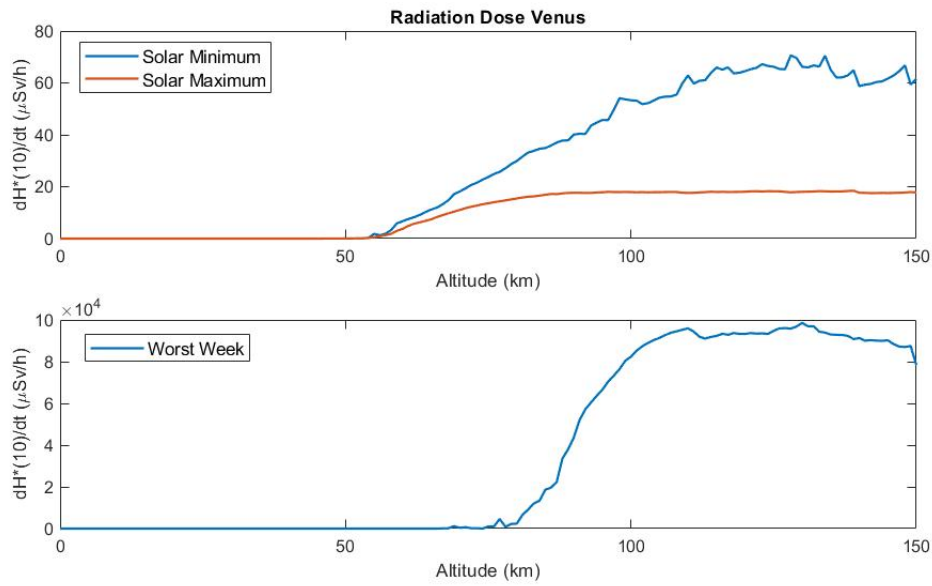
Όπως είναι αναμενόμενο, η ενεργειακή εναπόθεση είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες ελάχιστης δραστηριότητας, με το μέγιστο της εναπόθεσης στο ηλιακό μέγιστο να είναι κατά 42.2% μικρότερο σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο. Στη συνέχεια, πραγματοποιούμε μία σύγκριση με την εναπόθεση ενέργειας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα, και πιο συγκεκριμένα για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου (2009) και κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV . Παρατηρούμε πως η εναπόθεση ενέργειας στη Γη είναι κατά 40% μικρότερη σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο στην Αφροδίτη και 3.7% μεγαλύτερη σε σχέση με το ηλιακό μέγιστο.

Κατά τη διάρκεια του έντονου πρωτονικού γεγονότος ‘worst week’, παρατηρούμε πως η εναπόθεση ενέργειας στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας της Αφροδίτης είναι μεγαλύτερη κατά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με ήρεμες συνθήκες. Παρόλ’ αυτά, το μέγιστο παρατηρείται στα 94 km , δηλαδή σχεδόν 30 km πιο πάνω σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο / μέγιστο, με αποτέλεσμα αυτά τα πολύ ενεργητικά σωματίδια, να μη φτάνουν πρακτικά στην κατοικήσιμη ζώνη (Dartnell et al., 2015).

• Δοσιμετρικοί υπολογισμοί στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοσιμετρικοί υπολογισμοί με το εργαλείο DYASTIMA-R για 20 iterations. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.34 δίνεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (πάνω), αλλά και κατά τη διάρκεια του γεγονότος ‘worst week’ (κάτω). Για την εξομάλυνση των δεδομένων, για κάθε σημείο έχει χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος ± 10 σημείων.

Παρατηρούμε πως ο ρυθμός δόσης είναι πρακτικά ο ίδιος τόσο στο ηλιακό ελάχιστο όσο και στο ηλιακό μέγιστο, όταν αναφερόμαστε στην πιθανή κατοικήσιμη ζώνη ($43\text{ km} - 62\text{ km}$). Από εκεί και πάνω ο ρυθμός αύξησης της δόσης διατηρείται σχετικά σταθερός και από τα 100 km , η καμπύλη του ρυθμού δόσης γίνεται επίπεδη, καθώς τα πιο ενεργητικά σωματίδια διεισδύουν με ελάχιστες απώλειες ενέργειας (κυρίως λόγω ιονισμού) προτού οι πυρηνικές αλληλεπιδράσεις και ο καταιγισμός των πρωτογενών σωματιδίων επικρατήσουν (Dartnell et al., 2015). Επίσης,

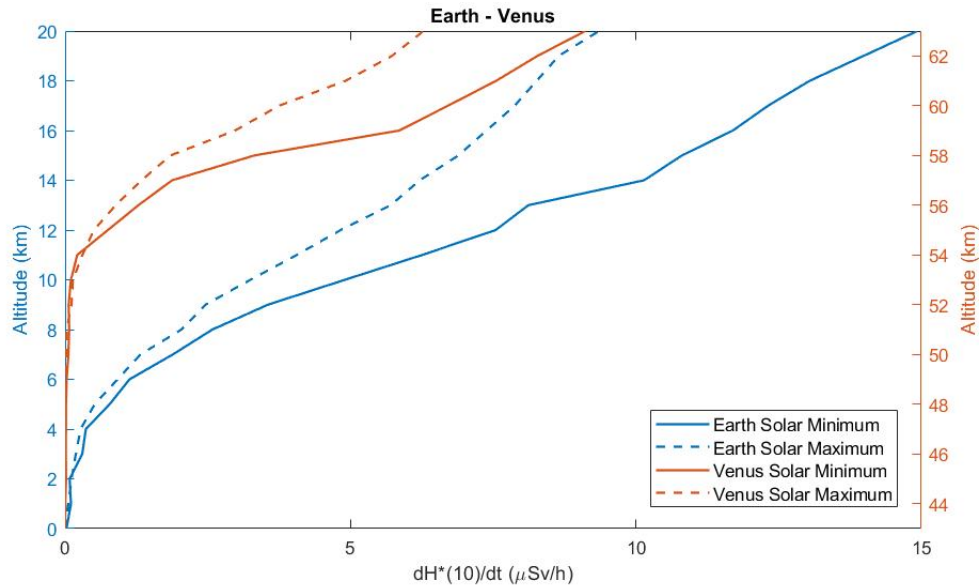


Σχήμα 5.34: Ρυθμός δόσης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και μεγίστου (πάνω) και για τη 'worst week' (κάτω).

όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός δόσης είναι υψηλότερος σε συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας, λόγω της αντισυσχέτισης με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (Herbst et al., 2020; Youngquist et al., 2014).

Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια του έντονου γεγονότος, βλέπουμε πως οι κορυφές στο ρυθμό δόσης εμφανίζονται ψηλά στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης, εκτός της πιθανής κατοικήσιμης ζώνης, όπου έτσι κι αλλιώς οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές για τη διατήρηση ζωής. Έτσι, παρά το γεγονός ότι ο μέγιστος ρυθμός δόσης μπορεί να είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος σε σχέση με τις συνθήκες ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας, η δόση είναι πολύ μικρή στα 43 km - 62 km (Dartnell et al., 2015).

Στο Σχήμα 5.35, γίνεται μία σύγκριση της κατώτερης ατμόσφαιρας της Γης (0 km - 20 km) για κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV και της πιθανής κατοικήσιμης ζώνης της Αφροδίτης (43 km - 63 km) για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας. Παρατηρούμε πως ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος στην κατοικήσιμη ζώνη της Αφροδίτης είναι άμεσα συγκρίσιμος με τις συνθήκες ηλιακού μεγίστου στην κατώτερη ατμόσφαιρα της Γης, με την ατμόσφαιρα της Αφροδίτης να προσφέρει ουσιαστικά επαρκή προστασία έναντι των κοσμικών ακτίνων στην περιοχή αυτή. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει πολλούς επιστήμονες να προτείνουν τη δημιουργία μίας πλωτής επναδρωμένης πλατφόρμας στην Αφροδίτη που θα κυμαίνεται μεταξύ 50 km - 57 km , όπου για χρόνια δεν θα γίνεται υπέρβαση των προτεινόμενων ορίων



Σχήμα 5.35: Σύγκριση του ρυθμού δόσης στη Γη και την Αφροδίτη.

ακτινοπροστασίας για τα πληρώματα των διαστημικών αποστολών (Youngquist et al., 2014).

5.4.2 Πλανήτης Άρης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελέτες ακτινοπροστασίας έχει αναμφίβολα ο Άρης, καθώς αποτελεί ξεκάθαρο στόχο της διαστημικής εξερεύνησης. Μέχρι σήμερα, πλήθος τηλεκατευθυνόμενων rovers έχουν σταλεί στην επιφάνεια του κόκκινου πλανήτη, όπως το Sojourner, το Spirit, το Opportunity, το Curiosity, με τελευταίο το Perseverance, το οποίο προσγειώθηκε μόλις το Φεβρουάριο του 2021. Στόχος όλων των αποστολών αυτών είναι η εξερεύνηση της επιφάνειας του πλανήτη, ο καθορισμός των στοιχείων στα πετρώματά του, καθώς και η εξέλιξη του περιβάλλοντος με το πέρασμα των ετών. Παράλληλα, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αποστολές και για τη μελέτη της ατμόσφαιράς του, ενώ στο σχετικά άμεσο μέλλον προβλέπεται η πραγματοποίηση και επανδρωμένων αποστολών. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η μελέτη του περιβάλλοντος ακτινοβολίας και των επιπέδων δόσης λόγω κοσμικής ακτινοβολίας στα οποία ενδέχεται να εκτεθούν τα πληρώματα των διαστημικών σκαφών.

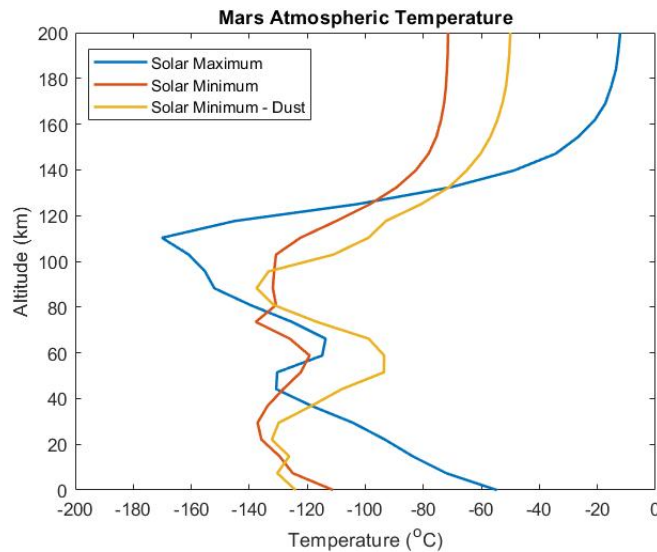
Ο Άρης έχει μόλις τη μισή ακτίνα σε σχέση με τη Γη, και περίπου το 15% της μάζας της. Είναι ο επόμενος σε σειρά από τη Γη πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος και απέχει από τον Ήλιο 1.5 AU, δηλαδή $247.12 \cdot 10^6 \text{ km}$. Η επιφάνειά του είναι ξηρή με μεγάλες ποσότητες σκόνης, και καλύπτεται από χόμα πλούσιο οξειδίου του σιδήρου, το οποίο οδηγεί στην κοκκινωπή εμφάνισή του. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις νερού σε μορφή πάγου στις πολικές

περιοχές Planum Boreum και Planum Australe. Επιπλέον, ένας παχύς μανδύας που παραμένει παγωμένος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους που απλώνεται από τον πόλο μέχρι γεωγραφικά πλάτη περίπου 60° (permafrost), υποδεικνύει την ύπαρξη παγωμένου νερού κάτω από μεγάλο μέρος της επιφάνειας του Άρη. Στην επιφάνειά του υπάρχουν επίσης πολλά διακριτά κανάλια, τα οποία έχουν οδηγήσει πολλούς επιστήμονες να πιστεύουν ότι αυτά σχηματίστηκαν -τουλάχιστον εν μέρει- από τη διάβρωση του νερού.

Η κλίση του άξονα του Άρη είναι σχεδόν η ίδια με αυτή της Γης, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο Άρης παρουσιάζει εποχές και μεταβολές θερμοκρασίας παρόμοιες με τη Γη. Η ατμόσφαιρα του Άρη είναι πολύ λεπτή σε σύγκριση με αυτή της Γης, με πίεση που κυμαίνεται από $0.4 - 0.87 \text{ kPa}$, ισοδύναμη με περίπου το 1% της πίεσης στη γη στο επίπεδο της θάλασσας. Το βάθος θωράκισης που προσφέρει είναι μόλις $\sim 20 \text{ g/cm}^2$, έναντι του $\sim 10^3 \text{ g/cm}^2$ της Γης (Matthiä and Berger, 2017). Τα κυριότερα συστατικά της ατμόσφαιρας του Άρη είναι το CO_2 (95%), N_2 (3%) και Ar (2%). Αυτό, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τον Ήλιο, οδηγεί σε σημαντική διαφορά μεταξύ της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας Γη και του Άρη, με τον Άρη να είναι πολύ πιο κρύος με μέση θερμοκρασία -46°C . Η ατμόσφαιρά του περιέχει επίσης αρκετή σκόνη με σωματίδια διαμέτρου μικρότερη από $1.5 \mu\text{m}$, το οποίο δίνει στον ουρανό του Άρη ένα καστανόχρωμο χρώμα όταν φαίνεται από την επιφάνεια. Ο πλανήτης αντιμετωπίζει επίσης καταιγίδες σκόνης (dust storms), οι οποίες μπορούν να μετατραπούν σε μικρούς ανεμοστρόβιλους.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η ατμόσφαιρα του Άρη είναι ένα πλήρες και περίπλοκο σύστημα, που διέπεται από συγκεκριμένες φυσικές, δυναμικές και χημικές διαδικασίες. Οι ημερήσιοι και εποχιακοί κύκλοι, σε συνδυασμό με την ακραία και διαφοροποιημένη τοπογραφία, καθιστούν το κλίμα του κόκκινου πλανήτη αρκετά μεταβλητό ως προς το διάστημα και το χρόνο, και υπάρχει ανάγκη μοντελοποίησης και πρόβλεψης των μεταβολών αυτών. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η Martian Climate Database, η οποία έχει στόχο τη ρεαλιστική και αξιόπιστη μοντελοποίηση του Αρειανού κλιματολογικού συστήματος (Forget et al., 1999; Millour et al., 2018). Αναπτύχθηκε από το Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (Παρίσι) σε συνεργασία με τα Open University και Oxford University (Ηνωμένο Βασίλειο), και το Instituto de Astrofísica de Andalucia (Ισπανία) με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος και του Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) και διανέμεται ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας [www - mars.lmd.jussieu.fr/mars/info_web/index.html](http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/info_web/index.html). Πρόκειται για μία βάση δεδομένων μετεωρολογικών πεδίου που προέρχονται από αριθμητικές προσομοιώσεις του General Circulation Model στην ατμόσφαιρα του Άρη, που επικυρώνονται με τη χρήση διαθέσιμων πραγματικών δεδομένων παρατήρησης.

Οι κυριότερες επιδράσεις στο ατμοσφαιρικό προφίλ του Άρη οφείλονται στις ηλιακές συνθήκες και στα επίπεδα σκόνης. Οι ηλιακές συνθήκες περιγράφουν τη μεταβολή της εισερχόμενης ακραίας υπεριώδους ακτινοβολίας (Extreme UV, EUV), η οποία παρουσιάζει μία ενδεκαετή μεταβολή και θερμαίνει την ατμόσφαιρα πάνω από το ύψος των 120 km. Τα διάφορα 'σενάρια σκόνης' προσπαθούν να υπολογίσουν την μεταβολή της ποσότητας και της κατανομής της αιωρούμενης σκόνης. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διατριβής χρησιμοποιήθηκε το σενάριο Climatology, το οποίο αποτελεί μία αντιπροσωπευτική κατάσταση χωρίς σκόνη, για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει από την ανακατασκευή παρατηρήσεων για τα Αρειανά έτη 24 έως 31. Παράλληλα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της σκόνης, χρησιμοποιήθηκε και το σενάριο Dust storm σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, το οποίο αντιπροσωπεύει τον Άρη κατά τη διάρκεια μίας καταιγίδας σκόνης. Το ατμοσφαιρικό προφίλ για τα σενάρια αυτά παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 5.36.



Σχήμα 5.36: Το ατμοσφαιρικό προφίλ του Άρη για διάφορες συνθήκες, όπως έχει προκύψει από τη Martian Climate Database (Forget et al., 1999; Millour et al., 2018).

Ενδεικτικά, για τις προσομοιώσεις με το εργαλείο DYASTIMA στην ατμόσφαιρα του Άρη χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

- μέση ακτίνα: $R_M = 3386.2 \text{ km}$,
- μέση επιφανειακή πίεση: $P = 6.36 \text{ mbar}$, και
- επιτάχυνση της βαρύτητας: $g = 3.7 \text{ m/sec}^2$

Περισσότερες πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά του Άρη μπορούν να βρεθούν και στην ακόλουθη ιστοσελίδα <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>. Για τον καθορισμό του ατμοσφαιρικού προφίλ χρησιμοποιήθηκε το Martian Climate Database. Η physics list που χρησιμοποιήθηκε, όπως και στην περίπτωση της Γης και της Αφροδίτης, είναι η *FTFP_BERT_HP* (Herbst et al., 2020; Plainaki et al., 2016). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για 30000 events.

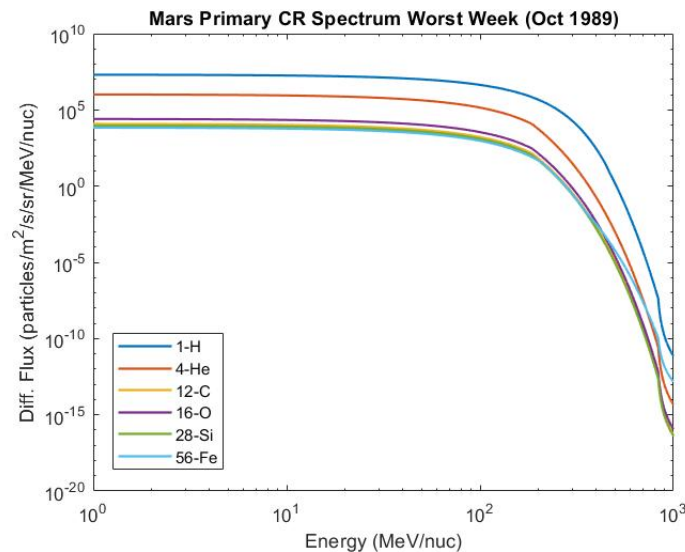
Ο Άρης, όπως και η Αφροδίτη, δεν παρουσιάζει σημαντικό εγγενές μαγνητικό πεδίο, ικανό να εκτρέφει φορτισμένα σωματίδια και να παρέχει μία προστασία ενάντια στην ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία (Matthiä and Berger, 2017). Παρόλα αυτά εμφανίζει αδύναμα μαγνητικά πεδία σε διάφορες περιοχές, τα οποία φαίνεται να είναι το κατάλοιπο μίας μαγνητόσφαιρας. Αυτά έχουν μέγιστη ισχύ $1500 nT$, είναι δηλαδή περίπου 20 έως 40 φορές μικρότερα από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Έτσι, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου έχουν λάβει την τιμή 0 ($B_X = 0, B_Y = 0, B_Z = 0$) για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στη διατριβή αυτή. Λόγω απουσίας πλανητικού μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια γαλαξιακής και ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας αποτελούν πρακτικά μία ισότροπη πηγή ακτινοβολίας στον Άρη.

Έτσι, η μόνη θωράκιση ενάντια στα ενεργητικά σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας οφείλεται αποκλειστικά στην ατμόσφαιρα του Άρη, το πάχος της οποία ποικίλλει ανάλογα με το υψόμετρο, με τα υψηλότερα υψόμετρα να είναι λιγότερο θωρακισμένα. Επομένως, η επιφάνεια του Άρη εκτίθεται συνεχώς σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας σε σχέση με τη Γη, το οποίο αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για μελλοντικές επανδρωμένες αποστολές, με τα επίπεδα δόσης να αγγίζουν τα $200 - 300 mSv$ ανά έτος (Zeitlin et al., 2004). Η μακροχρόνια αυτή έκθεση σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας αποτελεί επίσης μία σημαντική πτυχή της έρευνας για το αν ο Άρης έχει φιλοξενήσει ζωή στο παρελθόν (Matthiä and Berger, 2017).

Τα πρωτογενή σωματίδια που διέρχονται από την Αρειανή ατμόσφαιρα μπορεί να υποστούν ανελαστικές σκεδάσεις με τα σωματίδια της αραιής ατμόσφαιρας και να χάσουν την ενέργειά τους, αλλά και να δημιουργήσουν δευτερεύοντα σωματίδια μέσω ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Αυτά τα δευτερεύοντα σωματίδια αλληλεπιδρούν περαιτέρω τόσο με την ατμόσφαιρα του Άρη καθώς διαδίδονται προς τα κάτω όσο και με τα επιφανειακά πετρώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολύ σύνθετων φασμάτων στην επιφάνεια του Άρη, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο πρωτογενή σωματίδια (από τα περιστασιακά ηλιακά ενεργητικά σωματίδια αλλά και από τη μόνιμα παρούσα γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία) όσο και από δευτερογενή σωματίδια, καθώς και σωματίδια albedo που παράγονται στα πετρώματα (Jingnan Guo et al., 2019; Matthiä et al., 2017). Το πεδίο ακτινοβολίας αυτό αποτελεί πιθανό κίνδυνο για την υγεία των αστροναυτών στις πιθανές μελλοντικές επανδρωμένες αποστολές στον Άρη. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης

μπορούν να γίνουν κατανοητοί με ένα συνδυασμό μετρήσεων και υπολογιστικών μοντέλων. Αξίζει να σημειωθεί πως η ‘ανοδική δόση’ που παράγεται κυρίως στα πετρώματα του Άρη, είναι πολύ χαμηλότερη από την ‘καθοδική’ δόση, το οποίο υποδηλώνει την αποτελεσματική προστασία που μπορεί να παρέχει το έδαφος του Άρη από την επικίνδυνη ιονίζουσα ακτινοβολία, για τη δημιουργία ενός πιθανού ανθρώπινου βιότοπου εκεί (Jingnan Guo et al., 2019).

Το πρωτογενές φάσμα των γαλαξιακών κοσμικών σωματιδίων για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας εξήχθη από το μοντέλο CREME2009 (Mendenhall and Weller, 2012; Nyman et al., 1992; Tylka et al., 1997, 2010). Το φάσμα αυτό είναι το ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση της Αφροδίτης (Σχήμα 5.32. Αυτό συμβαίνει, γιατί παρά το γεγονός ότι ο Άρης βρίσκεται κατά 50% μακρύτερα από τον Ήλιο σε σχέση με τη Γη, η ροή της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας είναι ισόχωρη και ισότροπη, με αποτέλεσμα η μεταβολή της ροής κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης να θεωρείται αμελητέα. Για την προσομοίωση του σεναρίου “worst week”, το φάσμα διορθώθηκε με βάση το γεωμετρικό παράγοντα $1/R^2$, όπου R η μέση απόσταση Άρη – Ήλιου ($1.5AU$) (Σχήμα 5.37).

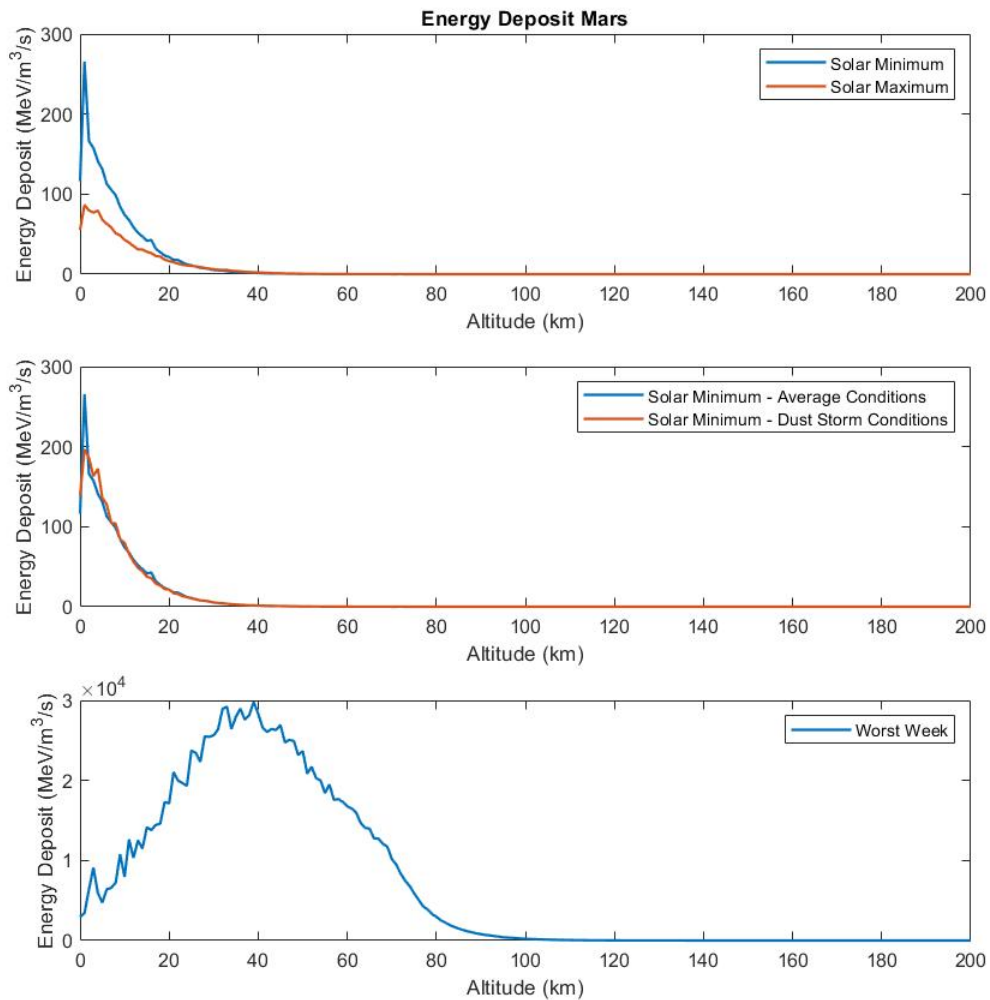


Σχήμα 5.37: Φάσμα πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας από το μοντέλο CREME2009 για την ατμόσφαιρα του Άρη για τη ‘worst week’.

- **Εναπόθεση ενέργειας στην ατμόσφαιρα του Άρη**

Η ροή της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στον Άρη, μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα, με παρόμοιο τρόπο με τη Γη (Zeitlin et al., 2004). Στο ηλιακό μέγιστο, ενισχυμένος αριθμός σωματιδίων και σύνθετα διαπλανητικά μαγνητικά πεδία στο κοντινό

περιβάλλον του Άρη, αλληλεπιδρούν με τα εισερχόμενα γαλαξιακά σωματίδια, διώχνοντας τα σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η συνιστώσα της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό περιβάλλον του Άρη να έχει υψηλότερη μέσα ενέργεια αλλά χαμηλότερη ροή στο ηλιακό μέγιστο, σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο (McKenna-Lawlor et al., 2012).



Σχήμα 5.38: Εναπόθεση ενέργειας στην ατμόσφαιρα του Άρη για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και μεγίστου (πάνω), για μέσες συνθήκες και συνθήκες ‘σκόνης’ (μέση) και για τη “worst week” (κάτω).

Στο Σχήμα 5.38 παρουσιάζεται η ενεργειακή εναπόθεση των δευτερογενών σωματιδίων στα διάφορα ατμοσφαιρικά υψόμετρα του Άρη (0 km έως 200 km, όπως υπολογίστηκε με το εργαλείο DYASTIMA. Στο πάνω μέρος, πραγματοποιείται σύγκριση της ενεργειακής εναπόθεσης για

συνθήκες ηλιακού μεγίστου και ηλιακού ελαχίστου, αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο, σε συνθήκες ηλιακού μεγίστου, λόγω χαμηλότερης ροής, παρατηρείται και χαμηλότερη εναπόθεση ενέργειας σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο, η οποία είναι περίπου τρεις φορές μικρότερη ως προς την περίοδο του ελαχίστου.

Παρατηρούμε, επίσης, πως η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία διανύει πρακτικά ανενόχλητη την ατμόσφαιρα του Άρη, με τους καταιγισμούς να ξεκινούν σε ύψος περίπου 40 km, παρόμοιο με αυτό της Γης. Παρόλα αυτά, η εναπόθεση ενέργειας αυξάνεται διαρκώς με την ελάττωση του ύψους, εξαιτίας της πολύ αραιής ατμόσφαιρας του Άρη, και παίρνει τη μέγιστη τιμή της πρακτικά στην επιφάνεια του εδάφους.

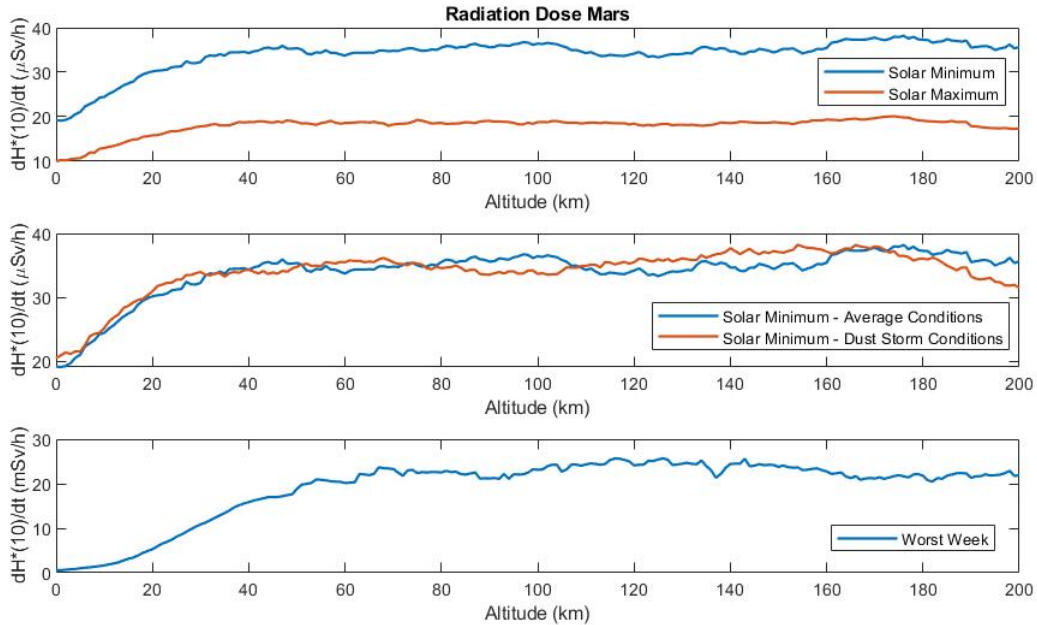
Στη μέση του Σχήματος 5.38 απεικονίζεται η εναπόθεση ενέργειας σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου για μέσες συνθήκες της ατμόσφαιρας του Άρη, κάνοντας χρήση του σεναρίου Climatology, αλλά και για συνθήκες σκόνης με το σενάριο Dust storm. Από τη σύγκριση αυτή, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία σκόνης πρακτικά δεν επηρεάζει τη διαδικασία εναπόθεσης ενέργειας από τον καταιγισμό, καθώς δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική διαφορά στην εναποτιθέμενη ενέργεια για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

Τέλος, στο κάτω μέρος του Σχήματος 5.38 Κατά τη διάρκεια ενός έντονου ηλιακού γεγονότος, η εναπόθεση ενέργειας είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη σε σχέση με 'ήρεμες' συνθήκες ηλιακής δραστηριότητας. Αντίθετα με το ηλιακό ελάχιστο και το ηλιακό μέγιστο, στη "worst week" παρατηρείται ένα μέγιστο στην εναπόθεση ενέργειας περίπου στα 40 km, η οποία μειώνεται πλησιάζοντας προς την επιφάνεια του Άρη.

- **Δοσιμετρικοί υπολογισμοί στην ατμόσφαιρα του Άρη**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοσιμετρικοί υπολογισμοί στην ατμόσφαιρα του Άρη, με το εργαλείο DYASTIMA-R για 20 iterations, για τα παραπάνω σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.39 δίνεται ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (πάνω), αλλά και για διαφορετικές συνθήκες σκόνης (μέσες συνθήκες και συνθήκες καταιγίδας σκόνης) για το ηλιακό ελάχιστο (κάτω). Για την εξομάλυνση των δεδομένων, για κάθε σημείο έχει χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος ± 10 σημείων.

Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός δόσης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το υψόμετρο των 40 km, όπου και παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Από τα 40 km και άνω, η δόση γίνεται ανεξάρτητη του ατμοσφαιρικού υψομέτρου, καθώς η καμπύλη του ρυθμού δόσης γίνεται πρακτικά επίπεδη. Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός δόσης είναι υψηλότερος σε συνθήκες ηλιακού, εξαιτίας της αρνητικής συσχέτισης που παρουσιάζει η ηλιακή δραστηριότητα



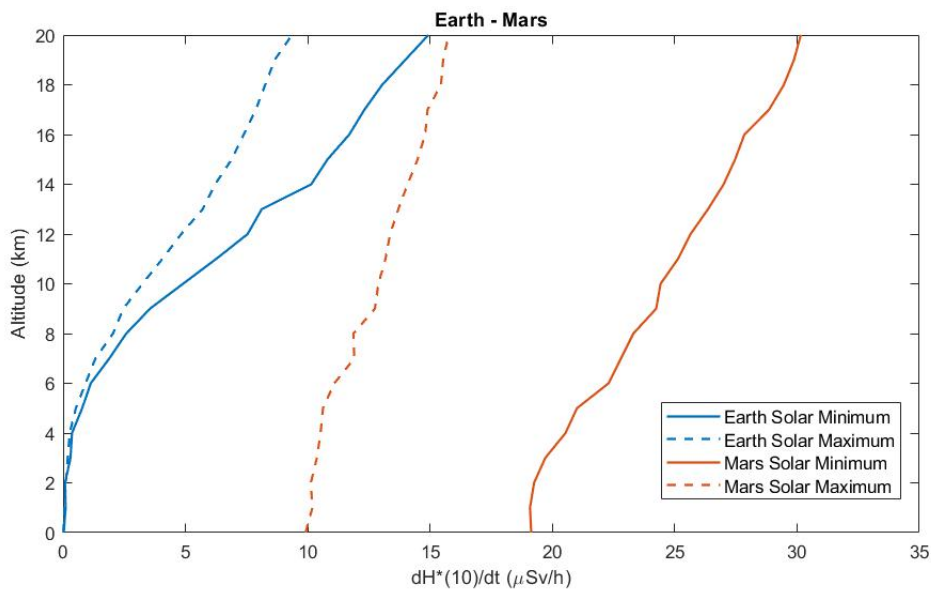
Σχήμα 5.39: Ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος στην ατμόσφαιρα του Άρη για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και μεγίστου (πάνω), για μέσες συνθήκες και συνθήκες ‘σκόνης’ (μέση) και για τη “worst week” (κάτω).

με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (McKenna-Lawlor et al., 2012; Zeitlin et al., 2004). Σε κάθε υψόμετρο, ο ρυθμός δόσης στο ηλιακό ελάχιστο είναι διπλάσιος από αυτός στο ηλιακό μέγιστο.

Όπως στην εναπόθεση ενέργειας, έτσι και στο ρυθμό δόσης, βλέπουμε ότι η παρουσία σκόνης, δεν επιφέρει τεράστιες διαφορές. Η καμπύλη δόσης ακολουθεί την ίδια μορφή τόσο για το σενάριο Climatology, όσο και για το σενάριο Dust storm, με παρουσία μικρών αντιστροφών, που όμως δεν αλλάζουν την τάση.

Αντίστοιχα, παρατηρούμε πως κατά τη διάρκεια της “worst week” ο ρυθμός δόσης αγγίζει τα μερικά mSv/h , δηλαδή έως και τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερος σε σχέση με ‘ήμερες’ συνθήκες ηλιακής δραστηριότητας, αποτελώντας έτσι έναν πραγματικό κίνδυνο για τις μελλοντικές επανδρωμένες αποστολές στον Άρη.

Τέλος, στο Σχήμα 5.40 πραγματοποιείται μία σύγκριση της κατώτερης ατμόσφαιρας της Γης (0 km - 20 km) για κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV και του Άρη για συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας. Παρατηρούμε πως στην επιφάνεια της Γης, δηλαδή σε ύψος 0 km - 4 km, ο ρυθμός δόσης είναι σχεδόν μηδαμινός και ανεξάρτητος της ηλιακής δραστηριότητας, καθώς σημαντικές αποκλίσεις αρχίζουν να παρατηρούνται από τα 10 km και



Σχήμα 5.40: Σύγκριση του ρυθμού δόσης στη Γη και τον Άρη.

άνω. Δεν ισχύει όμως και για τον Άρη, εξαιτίας της πολύ χαμηλής θωράκισης που προσφέρει η ατμόσφαιρά του ενάντια στην επικίνδυνη ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία. Σε συνθήκες ηλιακού μεγίστου, ο ρυθμός δόσης στην επιφάνεια του Άρη είναι 10 φορές μεγαλύτερος από αυτόν στη Γη, ενώ σε συνθήκες ηλιακού ελαχίστου, σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερος. Έτσι, μελλοντικά πληρώματα αποστολών στον Άρη, πέρα από την υψηλή έκθεση σε ακτινοβολία στο βαθύ διάστημα (deep space) κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους στον Άρη, θα συναντήσουν και ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Άρη, η οποία θα είναι μόνο ελαφρώς ελαττωμένη σε σχέση με αυτή στο διάστημα, λόγω της απουσίας μαγνητικού πεδίου και της αραιής ατμόσφαιρας του Άρη (Youngquist et al., 2014; Zeitlin et al., 2004). Η αναζήτηση κατάλληλων μέτρων ακτινοπροστασίας για μία τέτοια αποστολή κρίνεται απαραίτητη.

6 Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διατριβή, καθώς και οι προοπτικές και τα μελλοντικά σχέδια της έρευνας αυτής.

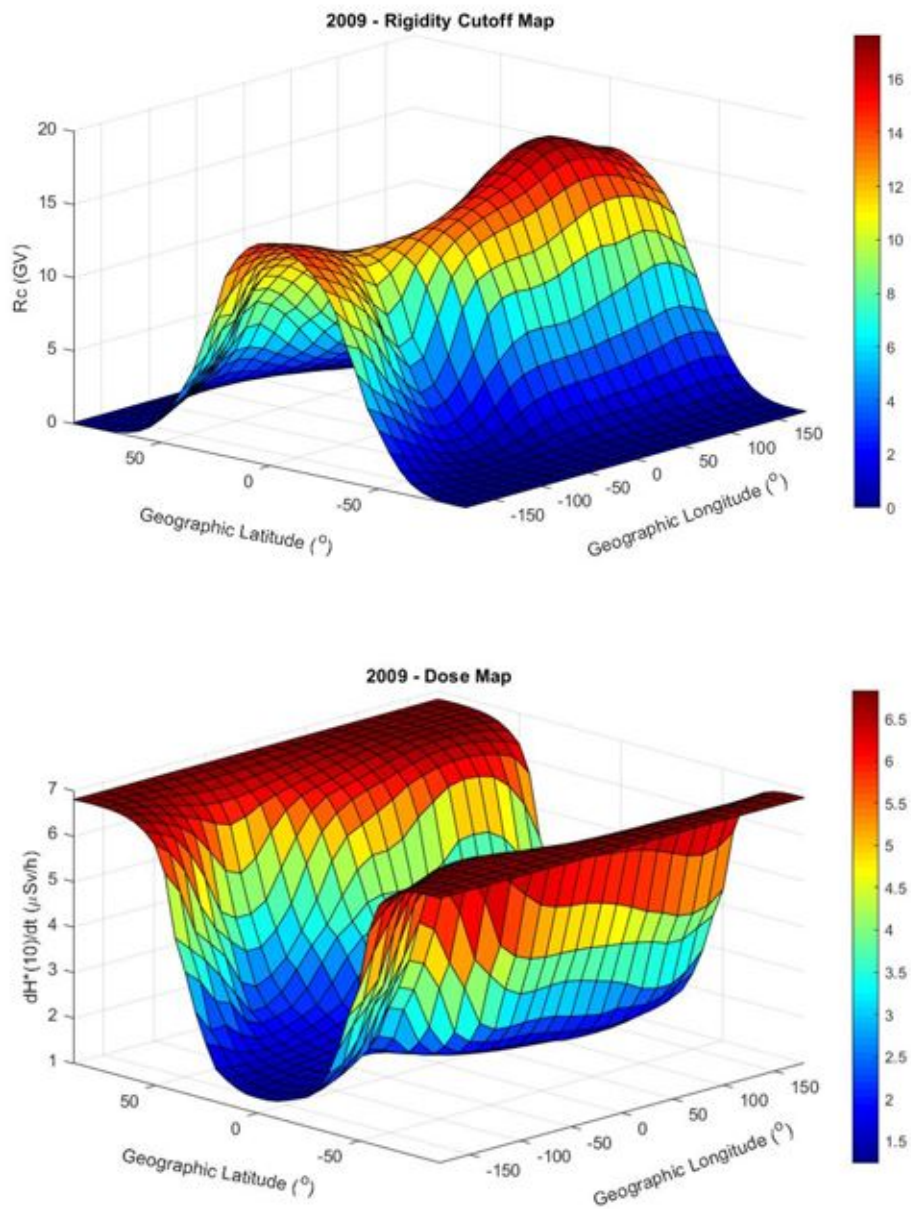
6.1 Υπολογισμοί δόσεων στους ηλιακούς κύκλους 23 & 24

Στη διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί του ρυθμού ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας περιβάλλοντος με χρήση του λογισμικού DYASTIMA-R κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων 23 και 24, οι οποίοι καλύπτουν τα χρονικά διαστήματα 1996-2008 και 2009-2019. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ μελέτες υπολογισμού δόσεων έχουν πραγματοποιηθεί και από άλλους ερευνητές για τον ηλιακό κύκλο 23 με διάφορα μοντέλα, στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται για πρώτη φορά ολοκληρωμένη αντίστοιχη μελέτη για τον ηλιακό κύκλο 24. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός Monte Carlo προσομοιώσεων (άνω των 400) που περιλαμβάνουν μεταβολές του ρυθμού δόσης συναρτήσει α) του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας, β) της φάσης της ηλιακής δραστηριότητας, γ) του ύψους μέσα στην ατμόσφαιρα και δ) του είδους των δευτερογενών σωματιδίων.

α) Όσον αφορά την επίδραση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας στους υπολογισμούς από 0 GV έως 17 GV , παρατηρήθηκε ότι:

- Οι πολικές περιοχές ($R_c = 0\text{ GV}$) χαρακτηρίζονται από τον υψηλότερο ρυθμό δόσης και ενεργειακής εναπόθεσης, ενώ οι μεσαίου πλάτους και οι ισημερινές περιοχές ($R_c = 17\text{ GV}$) από χαμηλότερες τιμές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη δομή της μαγνητόσφαιρας, όπου έχουμε ανοιχτές δυναμικές γραμμές στους πόλους και συνεπώς αυξημένη ροή εισερχόμενων κοσμικών σωματιδίων, και μεγάλη θωράκιση λόγω του γεωμαγνητικού πεδίου στον Ισημερινό.
- Η κατανομή του ρυθμού δόσης, είναι με αρκετά καλή προσέγγιση, είναι εκθετική σε όλο το εύρος τιμών της μαγνητικής δυσκαμψίας (Σχήματα 5.12 - 5.17). Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται σε όλες τις φάσεις του ηλιακού κύκλου.

Ένα παράδειγμα μεταβολής της μαγνητικής δυσκαμψίας και του ρυθμού της δόσης σε συνάρτηση με τις γεωγραφικές συντεταγμένες για το έτος 2009 δίνεται στο Σχήμα 6.1, όπου παρατηρείται σαφώς η ανωτέρω περιγραφόμενη συμπεριφορά.



Σχήμα 6.1: Μεταβολή του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας (πάνω) και του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος (κάτω) συναρτήσει των γεωγραφικών συντεταγμένων για το 2009.

β) Όσον αφορά τις φάσεις των ηλιακών κύκλων δεδομένου ότι η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζει αντισυσχέτιση με τον κύκλο της ηλιακής δραστηριότητας, από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρούνται τα εξής:

- Ο ρυθμός δόσης ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει επίσης αρνητική συ-

σχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός δόσης ελαχιστοποιείται κατά τα έτη 2001 και 2014, δηλαδή στα μέγιστα των ηλιακών κύκλων 23 και 24, αντίστοιχα. Αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται κατά τα έτη 2007 έως 2009 που αντιστοιχούν στο εκτεταμένο ελάχιστο μεταξύ των δύο κύκλων.

- Η εξάρτηση του ρυθμού δόσης από την ηλιακή δραστηριότητα είναι ιδιαίτερα εμφανής στις πολικές περιοχές, για κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας 0 *GV* έως 2 *GV*. Η εξάρτηση αυτή μειώνεται με την αύξηση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας. Στις ισημερινές περιοχές (από 15 *GV* έως 17 *GV*) ο ρυθμός δόσης γίνεται ανεξάρτητος της φάσης του ηλιακού κύκλου (Σχήμα 5.18 - 5.20).

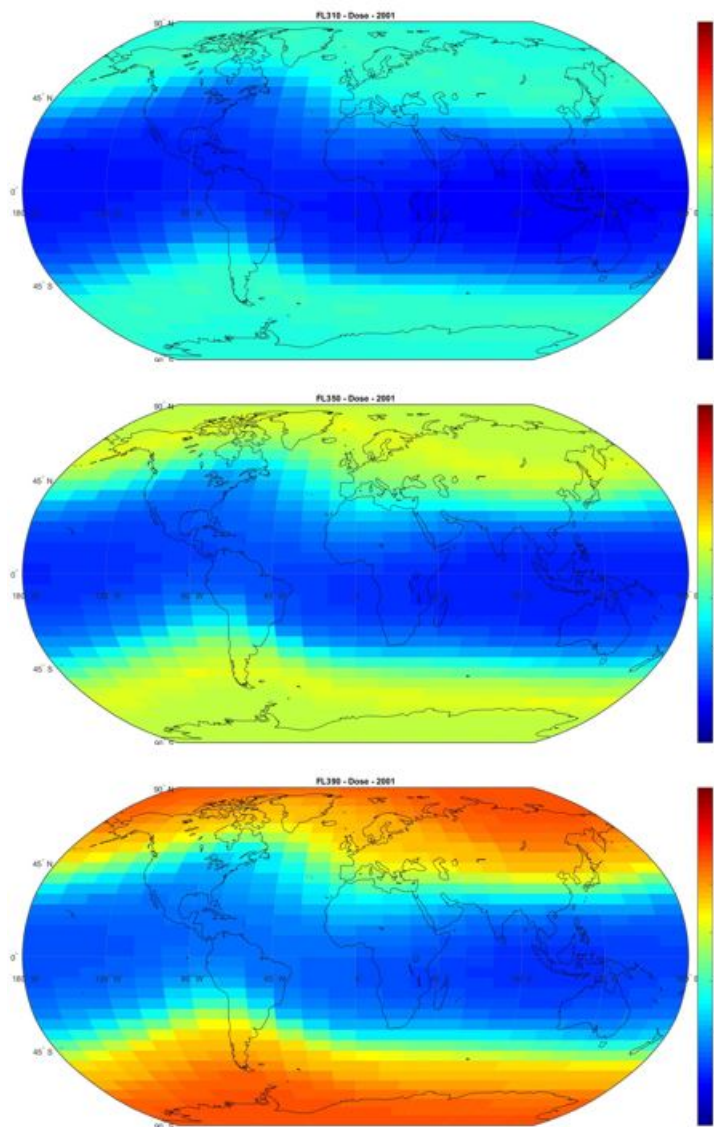
Αυτή η εξάρτηση είναι εμφανής στα Σχήματα 6.2 και 6.3, όπου διακρίνονται οι ισοδοσικές καμπύλες στα συνήθη υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για το ηλιακό μέγιστο 2001 και για το ηλιακό ελάχιστο 2009, αντίστοιχα.

γ) Όσον αφορά την επίδραση του υψόμετρου μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα στην ενεργειακή εναπόθεση και στο ρυθμό δόσης, παρατηρήθηκε ότι:

- Η έκθεση στην επιφάνεια της Γης λόγω κοσμικής ακτινοβολίας (0 *km* - 4 *km*) είναι σχεδόν μηδενική και ανεξάρτητη της ηλιακής δραστηριότητας (Σχήμα 5.11).
- Τόσο η ενεργειακή εναπόθεση στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα όσο και ο ρυθμός δόσης αυξάνονται σχεδόν γραμμικά μέχρι το λεγόμενο μέγιστο Pfozter (16 *km* - 20 *km*). Από εκεί και μετά, η εναπόθεση ενέργειας μειώνεται πάλι, ενώ ο ρυθμός δόσης παραμένει σχεδόν σταθερός (Σχήμα 5.10).
- Η εξάρτηση του ρυθμού δόσης από την ηλιακή δραστηριότητα στις πολικές περιοχές είναι πιο έντονη στα μεγαλύτερα υψόμετρα, ενώ είναι μικρότερη στις μεσαίου και μικρού γεωγραφικού πλάτους περιοχές.

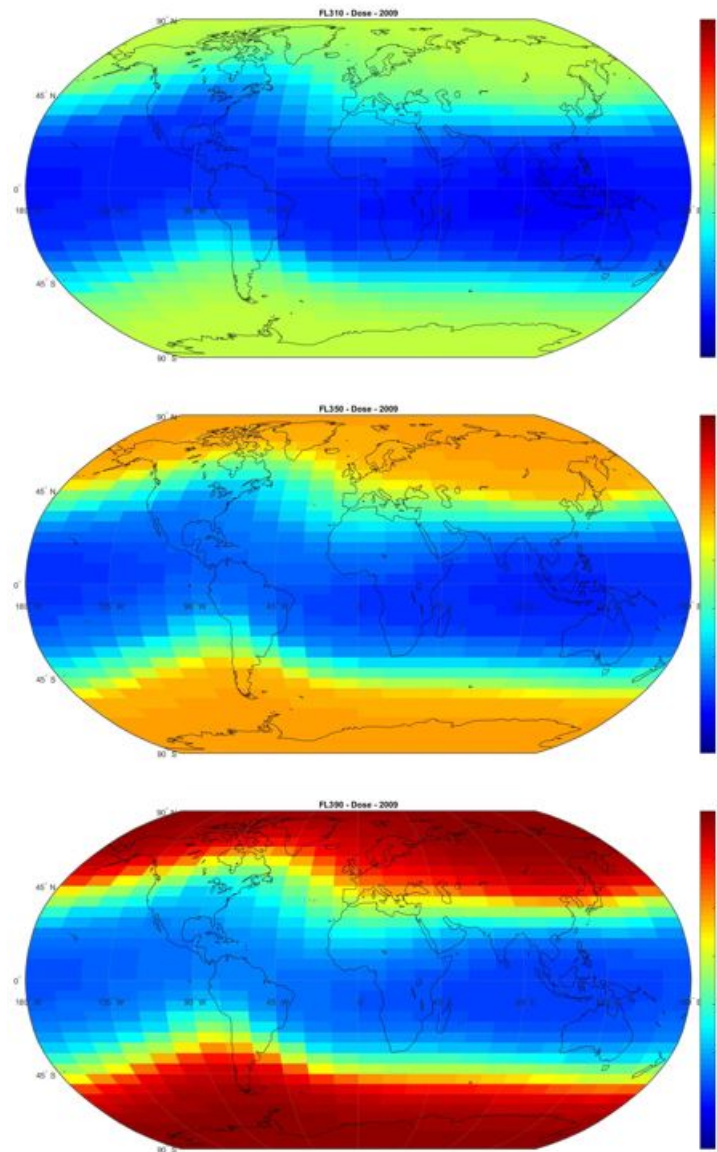
δ) Όσον αφορά τη συνεισφορά των διαφόρων συνιστωσών του δευτερογενούς καταιγισμού τόσο στην εναπόθεση ενέργειας στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα, όσο και στο ρυθμό δόσης, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Τα νετρόνια έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο ρυθμό δόσης με ποσοστό που κυμαίνεται από 40% έως 60%, ανάλογα με τη φάση της ηλιακής δραστηριότητας και το κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας. Ακολουθούν τα πρωτόνια με συνεισφορά 10% έως 20%, ενώ μικρότερη συνεισφορά παρουσιάζουν τα ηλεκτρόνια, τα ποζιτρόνια, τα φωτόνια και τα μίονια (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 6.2: Ισοδοσικές καμπύλες για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390 για το 2001.

- Η συνεισφορά των πρωτονίων και των νετρονίων ελαττώνεται με την αύξηση της μαγνητικής δυσκαμψίας, και αυξάνεται η συνεισφορά κυρίως των ηλεκτρονίων και των ποζιτρονίων. Έτσι, στις πολικές περιοχές (0 GV), έχουμε αυξημένη συνεισφορά των νετρονίων, σε αντίθεση με τα μικρά γεωγραφικά πλάτη.
- Το 60% με 80% της δόσης στα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης απαρτίζεται από σωματίδια υψηλής γραμμικά μεταφερόμενης ενέργειας (*LET*), τα οποία είναι πιο επιβλαβή για τους ζωντανούς οργανισμούς. Αυτό είναι που διαφοροποιεί και την επαγγελματική



Σχήμα 6.3: Ισοδοσικές καμπύλες για τα υψόμετρα FL310, FL350, FL390 για το 2009.

έκθεση των πληρωμάτων αεροσκαφών σε σχέση με άλλους εργαζόμενους σε ακτινοβολίες.

6.2 Υπολογισμοί δόσεων σε έντονα γεγονότα

Στη διατριβή αυτή πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί του ρυθμού ισοδύναμης δόσης ακτινοβολίας περιβάλλοντος με χρήση του λογισμικού DYASTIMA-R για δύο σενάρια 'χειρότερης περίπτωσης': το Worst Case GCR που αντιστοιχεί στη χειρότερη περίπτωση ροών γαλαξιακών κοσμικών

ακτίνων, δηλαδή σε ροές που είναι τόσο υψηλές και έχουν μόνο 10% πιθανότητα να ξεπεραστούν από πραγματικές ροές ανά πάσα στιγμή, και για το worst week, που αντιστοιχεί στο έντονο ηλιακό γεγονός που έλαβε χώρα τον Οκτώβριο του 1989, Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Ο ρυθμός δόσης παρουσιάζεται έως και 40% αυξημένος σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο στα 0 Γ² στην περίπτωση του σεναρίου Ωροστ άσε Γ²P. Ο ρυθμός δόσης δεν παρουσιάζεται αυξημένος σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο για μεγάλες τιμές δυσκαμψίας για το σενάριο αυτό (Σχήμα 5.23).
- Ο ρυθμός δόσης είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος κατά τη διάρκεια ενός έντονου ηλιακού γεγονότος “worst week” (Σχήμα 5.26). Παρόλα αυτά, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε μεγάλα ατμοσφαιρικά υψόμετρα και δε φαίνεται να επηρεάζει τα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390).

6.3 Υπολογισμοί δόσεων κατά τη διάρκεια πτήσεων

Οι παραπάνω προσομοιώσεις έδωσαν για πρώτη φορά τη δυνατότητα εκτίμησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία με το εργαλείο DYASTIMA-R για διάφορες πτήσεις προς διεθνείς προορισμούς με σημείο αναχώρησης το αεροδρόμιο της Αθήνας Ελ. Βενιζέλος (Λάρνακα, Ρώμη, Βερολίνο, Βρυξέλλες, Παρίσι, Άμστερνταμ, Μόσχα, Μαδρίτη, Λονδίνο, Στοκχόλμη, Ρέικιαβικ, Ντουμπάι, Τόκυο, Νέα Υόρκη). Αυτό αποτελεί μία σημαντική μελέτη τοπικού χαρακτήρα, χρήσιμη για τις αεροπορικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον ελλαδικό χώρο.

Η έκθεση των πληρωμάτων καθώς και των επιβατών των αεροσκαφών κατά τη διάρκεια μίας πτήσης εξαρτάται από:

- το **ύψος πτήσης**: η αύξηση του υψομέτρου οδηγεί σε αύξηση της δόσης, λόγω χαμηλής θωράκισης της ατμόσφαιρας.
- τη **διάρκεια πτήσης**: οι πτήσεις με τη μικρότερη διάρκεια, όπως Αθήνα - Λάρνακα και Αθήνα - Ρώμη, παρουσιάζουν τη μικρότερη συνολική ισοδύναμη δόση περιβάλλοντος, ενώ οι πτήσεις με τη μεγαλύτερη διάρκεια, όπως Αθήνα - Νέα Υόρκη και Αθήνα - Τόκυο, λαμβάνουν τη μεγαλύτερη δόση (Σχήμα 5.28). Κατά τη διάρκεια της πτήσης όμως δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και για το ρυθμό δόσης.
- το **γεωγραφικό πλάτος**, το οποίο μεταφράζεται σε μαγνητική δυσκαμψία: ο ρυθμός δόσης παίρνει μικρότερες τιμές σε πτήσεις που πραγματοποιούνται προς προορισμούς που

χαρακτηρίζονται από μεγάλα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας (Μαδρίτη, Ρώμη, Λάρνακα), με τη χαμηλότερη να αντιστοιχεί στην πτήση προς Ντουμπάι. Αντίθετα, πτήσεις προς μικρότερα κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας (Λονδίνο, Στοκχόλμη, Μόσχα) οδηγούν σε αυξημένους ρυθμούς δόσης, με την πτήση προς Ρείκιαβικ να αντιστοιχεί στον υψηλότερο ρυθμό δόσης. Οι πτήσεις που αφορούν την κεντρική Ευρώπη (Άμστερνταμ, Βερολίνο, Βρυξέλλες, Παρίσι) έχουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό δόσης (Σχήμα 5.29).

- **τη φάση της ηλιακής δραστηριότητας:** οι υψηλότερες τιμές συνολικής ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος παρατηρούνται στο ηλιακό ελάχιστο, όπως είναι αναμενόμενο. Αντίστοιχα, ο ρυθμός δόσης ακολουθεί τον ενδεκαετή και τον 22ετή ηλιακό κύκλο, με τις μικρότερες τιμές να αντιστοιχούν στα ηλιακά μέγιστα 2001 και 2014, και τις μεγαλύτερες τιμές στο εκτεταμένο ελάχιστο ανάμεσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (2007-2009). Η εξάρτηση από την ηλιακή δραστηριότητα είναι πιο έντονη σε πτήσεις που λαμβάνουν χώρα σε πιο μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Οι τιμές συνολικής δόσης που προέκυψαν με το DYASTIMA-R συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες από το λογισμικό CARI-7 (Copeland, 2017). Παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις τόσο στο έτος 2001 όσο και στο έτος 2009, με το DYASTIMA-R να παρέχει μικρότερες τιμές σε σχέση με το CARI-7 (Σχήμα 5.30). Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στα συστηματικά σφάλματα των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τις παραμέτρους εισόδου, καθώς και στο απλουστευμένο προφίλ πτήσης που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς στην έρευνα αυτή. Η χρήση ενός πιο ρεαλιστικού προφίλ πτήσης είναι στα άμεσα σχέδια.

6.4 Υπολογισμοί δόσεων σε άλλους πλανήτες

Χάρη στην ελεύθερη παραμετροποίηση που παρέχει το DYASTIMA / DYASTIMA-R στο χρήστη, το λογισμικό αυτό δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής του πέρα από την ατμόσφαιρα της Γης και σε ατμόσφαιρες άλλων πλανητών. Για τον σκοπό αυτό, έγινε με το DYASTIMA-R για πρώτη φορά εκτίμηση της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία στους δύο κοντινούς μας πλανήτες, την Αφροδίτη και τον Άρη.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την **ατμόσφαιρα της Αφροδίτης** είναι τα ακόλουθα:

- Ο δευτερογενής καταγισμός ξεκινάει περίπου σε υψόμετρο 90 km και αυξάνει εκθετικά μέχρι την κορυφή της 'κατοικήσιμης ζώνης' στα 62 km, όπου μεγιστοποιείται η εναποτιθέμενη ενέργεια (Σχήμα 5.33).

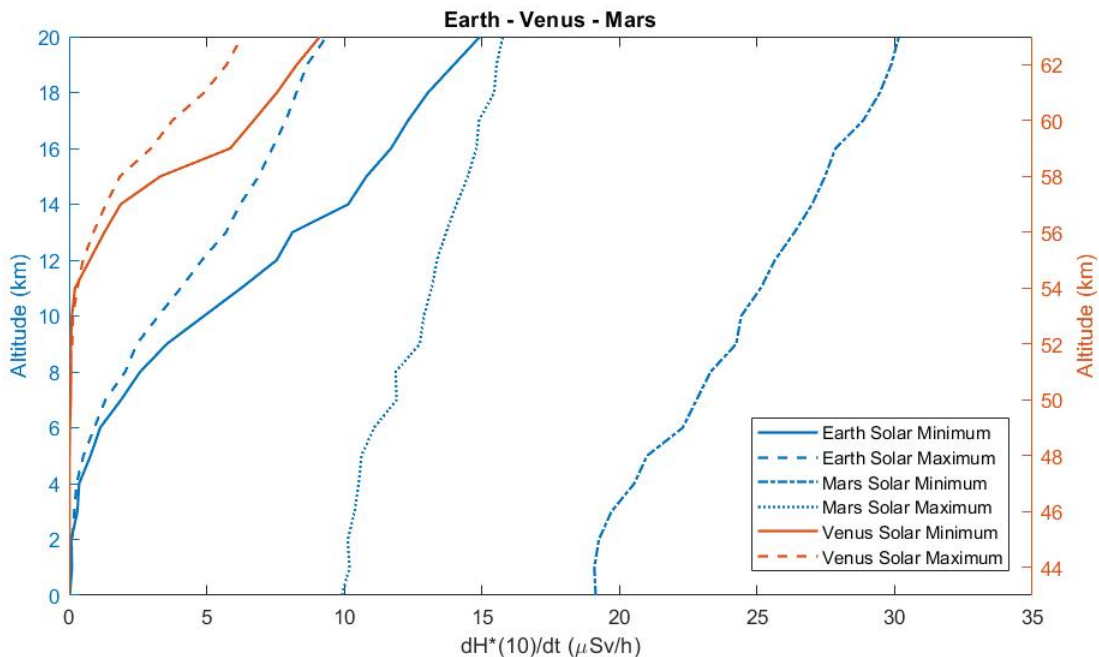
- Οι τιμές της εναπόθεσης ενέργειας καθώς και του ρυθμού δόσης, είναι μεγαλύτερες στο ηλιακό ελάχιστο σε σχέση με το ηλιακό μέγιστο, καθώς τότε η διαφορική ροή παίρνει τη μέγιστη τιμή της, λόγω της αρνητικής συσχέτισης της ηλιακής δραστηριότητας με την ένταση των κοσμικών ακτίνων (Forbush, 1958).
- Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ αυξάνεται σταδιακά μέσα στην 'κατοικήσιμη ζώνη' και σταθεροποιείται σε υψόμετρα άνω των 100 km για συνθήκες μέγιστης και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (Σχήμα 5.34).
- Ο ρυθμός δόσης εντός της 'κατοικήσιμης ζώνης' στο ηλιακό ελάχιστο είναι άμεσα συγχρόνιστος με τις συνθήκες του ηλιακού μεγίστου στις πολικές περιοχές της Γης.
- Κατά τη διάρκεια του έντονου ηλιακού γεγονότος 'worst week' που έλαβε χώρα τον Οκτώβριο του 1989, οι τιμές της εναποτιθέμενης ενέργειας και του ρυθμού δόσης βρέθηκαν να είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο, με το μέγιστό τους να εμφανίζεται στα 94 km, εκτός των ορίων της κατοικήσιμης ζώνης.

Αντίστοιχα, από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν με το DYASTIMA /DYASTIMA-R στην ατμόσφαιρα του Άρη, παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία, εξαιτίας της χαμηλής ατμοσφαιρικής θωράκισης, διανύει ανενόχλητη την ατμόσφαιρα του Άρη, μέχρι περίπου τα 40 km, όπου και ξεκινούν οι δευτερογενείς καταιγισμοί. Η εναπόθεση ενέργειας στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, όπου μεγιστοποιείται (Σχήμα 5.38).
- Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος παρουσιάζει γραμμική αύξηση από την επιφάνεια του Άρη μέχρι τα 40 km, και παραμένει σχεδόν σταθερός πηγαίνοντας προς τα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα.
- Οι μέγιστες τιμές εναπόθεσης ενέργειας και ρυθμού δόσης λαμβάνουν χώρα στο ηλιακό ελάχιστο, όπως έχει παρατηρηθεί για τη Γη και την Αφροδίτη (Σχήμα 5.39). Ο ρυθμός δόσης είναι διπλάσιος στο ηλιακό ελάχιστο σε σχέση με το ηλιακό μέγιστο.
- Ο ρυθμός δόσης είναι πρακτικά ανεξάρτητος από το υψόμετρο, εξαιτίας της πολύ χαμηλής θωράκισης της ατμόσφαιράς του.
- Ο ρυθμός δόσης στην επιφάνεια του Άρη είναι στο ηλιακό ελάχιστο έως και 20 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τη Γη, και στο ηλιακό μέγιστο έως 10 φορές μεγαλύτερος.

- Κατά τη διάρκεια του έντονου ηλιακού γεγονότος “worst week” που έλαβε χώρα τον Οκτώβριο του 1989, οι τιμές της εναποτιθέμενης ενέργειας και του ρυθμού δόσης βρέθηκαν να είναι έως και τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες σε σχέση με το ηλιακό ελάχιστο.

Τα αποτελέσματα για την Αφροδίτη και τον Άρη είναι σύμφωνα με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί (Dartnell et al., 2015; Herbst et al., 2020; Youngquist et al., 2014; Zeitlin et al., 2004). Αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 6.4 πραγματοποιείται μία συνολική σύγκριση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για τις πολικές περιοχές της Γης, της Αφροδίτης και του Άρη για συνθήκες ηλιακού ελαχίστου και ηλιακού μεγίστου. Πιο συγκεκριμένα, για τη Γη και τον Άρη απεικονίζεται η κατώτερη ατμόσφαιρα (0 km - 20 km), ενώ για την Αφροδίτη η ‘κατοικήσιμη ζώνη’ (43 km - 63 km).



Σχήμα 6.4: Σύγκριση του ρυθμού δόσης στην ατμόσφαιρα της Γης, της Αφροδίτης και του Άρη, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R.

Στα μελλοντικά σχέδια αυτής της έρευνας περιλαμβάνεται βελτίωση της στατιστικής, καθώς και μελέτη καθόλη τη διάρκεια ενός ηλιακού κύκλου.

6.5 Αξιολόγηση του DYASTIMA-R

Απαραίτητη προϋπόθεση για να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα αλλά και να γίνει αποδεκτό το εργαλείο DYASTIMA-R από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία ως federated product, ήταν η αξιολόγησή του σύμφωνα με τα διεθνή κριτήρια, όπως δίνονται στη Δημοσίευση 132 της ICRP (ICRP, 2016) και στην Έκθεση 84 της ICRU (ICRU, 2010). Πιο συγκεκριμένα, η ICRP και η ICRU συνέταξαν από κοινού αυτή την έκθεση, η οποία παρέχει δεδομένα αναφοράς (Reference Data) για τη σύγκριση και την αξιολόγηση των διαφόρων λογισμικών και μοντέλων υπολογισμού της έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία. Αυτά περιλαμβάνουν δεδομένα αναφοράς για:

- **Τρία υψόμετρα**, που καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος των υψόμετρων πτήσης των εμπορικών επιβατικών αεροσκαφών. Αυτά είναι τα *FL310* (9.45 km), *FL350* (10.67 km), *FL390* (11.89 km).
- **Δεκαοκτώ τιμές κατακόρυφης μαγνητικής δυσκαμψίας**, από 0 GV έως 17 GV (με βήμα 1 GV), που καλύπτουν το πλήρες εύρος τιμών του γεωγραφικού πλάτους.
- **Τρεις χρονικές περιόδους**, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιόδους ηλιακής δραστηριότητας, όπως είναι Ιανουάριος 1998, Ιανουάριος 2000 και Ιανουάριος 2002 (αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.).

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης του DYASTIMA-R πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός Monte Carlo προσομοιώσεων (48), όπου υπολογίστηκε ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$) για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις (Σχήματα 4.3, 4.4, 4.5). Τα αποτελέσματα αυτά έχουν ήδη παρουσιαστεί και δημοσιευθεί (Tezari et al., 2019, 2020), και συνοπτικά είναι τα ακόλουθα:

- Σε πολικές και μεγάλου πλάτους περιοχές (0 GV έως 2 GV) παρουσιάζονται πολύ μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς, οι οποίες δεν υπερβαίνουν το 15% και για τις τρεις χρονικές περιόδους και για τα τρία ατμοσφαιρικά υψόμετρα που μελετήθηκαν.
- Η απόκλιση αυτή από τα δεδομένα αναφοράς αυξάνεται με την αύξηση του κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας.
- Στο παράθυρο κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας από 0 GV έως 10 GV παρατηρείται ότι η ποσοστιαία διαφορά παραμένει κάτω του 30%, που αντιστοιχεί στη μέγιστη αποδεκτή απόκλιση, σύμφωνα με την ICRU. Σημειώνουμε ότι οι παραπάνω περιοχές αντιστοιχούν περίπου στα τρία τέταρτα της συνολικής επιφάνειας της Γης.

- Η απόκλιση για κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας από 10 GV έως 17 GV (ισημερινές περιοχές) κυμαίνεται μεταξύ 30% και 40%, δηλαδή υπερβαίνει ελαφρώς τη μέγιστη αποδεκτή απόκλιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιοχές αυτές δεν παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον από πλευράς ακτινοπροστασίας, καθώς η μεγάλη θωράκιση από το γεωμαγνητικό πεδίο οδηγεί σε χαμηλότερη έκθεση.
- Γενικά, το DYASTIMA-R, παρέχει σταθερά μία αποδεκτή υποεκτίμηση του ρυθμού δόσης στα τρία παραπάνω ύψη και στις τρεις χρονικές περιόδους που εξετάσαμε σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς, όπως άλλωστε και τα περισσότερα μοντέλα.

Τελικό συμπέρασμα της παραπάνω αξιολόγησης είναι ότι το εργαλείο DYASTIMA-R πληροί ικανοποιητικά τα κριτήρια που προτείνονται από τις ICRU / ICRP και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της έκθεσης των πληρωμάτων και των επιβατών αεροσκαφών σε ιονίζουσα κοσμική ακτινοβολία (Tezari et al., 2019, 2020).

Οι αποκλίσεις που αναφέρονται ανωτέρω οφείλονται σε συστηματικά σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, τα οποία οφείλονται κυρίως σε πειραματικές αβεβαιότητες των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων εισόδου του DYASTIMA. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Το ατμοσφαιρικό προφίλ της Γης που χρησιμοποιήθηκε το International Standard Atmosphere (ISO, 1975), αν και αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο προφίλ, δεν ανταποκρίνεται πλήρως στις πολικές και ισημερινές περιοχές. Προσδιορίζει κυρίως τις μέσες καιρικές συνθήκες στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Παρόλα αυτά υπερέχει άλλων μοντέλων της ατμόσφαιρας, τα οποία συνήθως περιγράφουν τη σχέση θερμοκρασίας-υψομέτρου στη γήινη ατμόσφαιρα ημι-εμπειρικά.
- Το φάσμα των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων προήλθε από το μοντέλο ISO 15390 (ISO, 2004) για τα στοιχεία *H*, *He*, *C*, *O*, *Si* και *Fe*, το οποίο είναι ένα κοινά αποδεκτό μοντέλο. Η επιλογή του φάσματος επιδρά όχι μόνο στις χαμηλότερες ενέργειες, αλλά και σε άλλες υπολογιστικές πτυχές, όπως για παράδειγμα στον ορισμό μιας τροχιάς που αντιστοιχεί σε μοναδικό Rc, ή στον καθορισμό του κώνου υποδοχής σωματιδίων σε μικρά γεωγραφικά πλάτη.
- Η περιγραφή του γεωμαγνητικού πεδίου βασίστηκε στο μοντέλο IGRF Epoch 2000.0, που ανταποκρίνεται στη χρονική περίοδο που εξετάστηκε. Η επιλογή του μοντέλου επηρεάζει

με τη σειρά του τους υπολογισμούς του ρυθμού δόσης.

Παράλληλα πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης του εργαλείου DYASTIMA-R με αυτά που παρέχονται από άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα, όπως το NAIRAS (Mertens et al., 2013, 2009, 2007), το CARI-7 (Copeland, 2017) και το AVIDOS (Latocha and Beck, 2016; Latocha et al., 2009). Συνοπτικά συμπεραίνουμε:

- Τα ανωτέρω μοντέλα ακολουθούν κατά βάση τα δεδομένα αναφοράς, είτε με μικρότερες είτε με μεγαλύτερες αποκλίσεις, και βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους (Σχήματα 4.6, 4.7, 4.8).
- Οι αποκλίσεις των μοντέλων είναι μικρές στα χαμηλά υψόμετρα (FL310), σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα υψόμετρα (FL390).
- Τα μοντέλα CARI-7 και AVIDOS παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλίσεις από τα δεδομένα αναφοράς (έως 19.8% και 23.2% αντίστοιχα), ενώ το μοντέλο NAIRAS παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις (έως 64.3%).
- Η πλειοψηφία των μοντέλων υποεκτιμούν σταθερά το ρυθμό δόσης σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς, με μικρές εξαιρέσεις στις χαμηλές τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας από τα NAIRAS, CARI-7 και AVIDOS (Σχήματα 4.9, 4.10, 4.11).
- Το NAIRAS παρουσιάζει γενικά τις μεγαλύτερες αποκλίσεις σε όλα τα ύψη για όλες τις τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας και για τις τρεις χρονικές περιόδους που εξετάστηκαν, ενώ το CARI-7 παρουσιάζει τις μικρότερες. Το DYASTIMA-R, αντίστοιχα, παρουσιάζει μικρότερες αποκλίσεις από το NAIRAS, και παρέχει μία καλή εκτίμηση του ρυθμού δόσης σε χαμηλές δυσκαμψίες, δηλαδή μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Γενικά, το εργαλείο DYASTIMA-R βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τα ήδη προϋπάρχοντα και αξιολογημένα μοντέλα, και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκτίμηση του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος για όλο το εύρος τιμών της μαγνητικής δυσκαμψίας για τα συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης. Σημειώνουμε ότι το DYASTIMA / DYASTIMA-R ανανεώνεται διαρκώς στο πλαίσιο της συνεργασίας με την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία, επιδιώκοντας την εύρεση κατάλληλων παραμέτρων εισόδου για αποτελέσματα όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας.

6.6 Χρησιμότητα και Προοπτικές

Η κοσμική ακτινοβολία βομβαρδίζει διαρκώς τη γήινη ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να αποτελεί σημαντικό ποσοστό του φυσικού υποβάθρου ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους, στο οποίο είμαστε όλοι εκτεθειμένοι. Οι καταστάσεις όμως έκθεσης στον εναέριο και διαστημικό χώρο είναι διαφορετικές από εκείνες του γήινου περιβάλλοντος και χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή και διαφορετική προσέγγιση, λόγω της μεγάλης διαφοράς του πεδίου ακτινοβολίας που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της δόσης που δέχονται τα πληρώματα των αεροσκαφών και των διαστημικών αποστολών. Τα συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να είναι άμεσα ή έμμεσα. Οι άμεσες επιπτώσεις συνδέονται κυρίως με ηλιακά γεγονότα υψηλής έντασης, ενώ οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις με τη μακρόχρονη έκθεση στη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία.

Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν και θα προκύψουν από την εφαρμογή του αξιολογημένου εργαλείου DYASTIMA-R παρουσιάζουν τεράστιο ενδιαφέρον για τις ανθρώπινες δραστηριότητες που εξελίσσονται στον ατμοσφαιρικό και διαστημικό χώρο. Πιο συγκεκριμένα θα ωφεληθούν:

- πληρώματα αεροσκαφών (πιλότοι, αεροσυνοδοί)
- επιβάτες (που ταξιδεύουν συχνά, έγκυες γυναίκες, παιδιά)
- αεροπορικές εταιρίες, οργανωτές τοπικών και υπερατλαντικών ταξιδιών
- κατασκευαστές διαφόρων τύπων αεροσκαφών και διαστημοπλοίων
- νομοθέτες Διαστημικού Δικαίου
- πολιτική και στρατιωτική αεροπορία
- πληρώματα μελλοντικών επανδρωμένων αποστολών κλπ.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το εργαλείο αυτό είναι αξιολογημένο με βάση τα διεθνώς αποδεκτά πρότυπα και διατίθεται για ευρεία χρήση από την ιστοσελίδα του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>) και από την ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (<https://swe.ssa.esa.int/dyastima-federated>). Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί το federated product R.137 της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ στο εξειδικευμένο κέντρο Διαστημικής Ακτινοβολίας (ESA SSA SWE R-ESC), στο οποίο συμμετέχει η ομάδα ως expert group.

The screenshot shows the ESA SWE Portal website. At the top, it says 'Welcome to the SSA Space Weather Service Network' and 'Please note that all SSA-SWE Services are under review/construction'. The main navigation bar includes 'Home', 'FAQ', 'Database' (selected), 'Request', 'Publications', and 'Acknowledgments'. The 'Database' section contains a list of simulation scenarios, such as 'January 1998', 'January 2000', 'January 2002', 'Solar Minimum', 'Solar Maximum', and various 'Year' entries with different cut-off values (e.g., 'Year 1996, cut-off 0GV', 'Year 2001, cut-off 2GV', etc.). A small 'Earth' icon is visible on the left side of the list.

Σχήμα 6.5: Η βάση του λογισμικού DYASTIMA στην ιστοσελίδα της ESA όπου παρέχονται διάφορα σενάρια εκτίμησης της έκθεσης σε κοσμική ακτινοβολία.

Διάφορα σενάρια που έχουν προκύψει κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας, τα οποία συνεχώς εμπλουτίζονται είναι διαθέσιμα στη βάση του DYASTIMA στο ESA SSA SWE R-ESC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5.

Παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια και επιστημονικά περιοδικά έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της διατριβής αυτής (Paschalis et al., 2016b; Tezari et al., 2018b, 2019, 2020). Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών και άλλων λογισμικών.

Η αναβάθμιση του εργαλείου DYASTIMA-R και ο εμπλουτισμός της βάσης του θα συνεχιστούν στο άμεσο μέλλον, με στόχο το λογισμικό αυτό να αποτελέσει το πιο αξιόπιστο και εύχρηστο εργαλείο αξιολόγησης έκθεσης στην κοσμική ακτινοβολία τόσο στο γεωδιάστημα όσο και στις ατμόσφαιρες των άλλων πλανητών, για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Αναφορές

- Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., and et al. (2017). Inferences on mass composition and tests of hadronic interactions from 0.3 to 100 eev using the water-cherenkov detectors of the pierre auger observatory. *Physical Review D*, 96. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.122003.
- Adams, J. H. (1986). Cosmic ray effects on microelectronics. *Naval Research Laboratory Memorandum Report 5901 Part IV*. Washington D.C., USA.
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrandian, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytracek, R., and Cooperman, G. (2003). Geant4-a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics A*, 506(3):250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., and the GEANT4 collaboration (2006). Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(1):270–278. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., and the GEANT4 collaboration (2016). Recent developments in geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics A*, 835(1):186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
- Andriopoulou, M., Mavromichalaki, H., Plainaki, C., Belov, A., and Eroshenko, E. (2011). Intense ground level enhancements of solar cosmic rays during the last solar cycles. *Solar Physics*, 269:155–168. DOI: 10.1007/s11207-010-9678-1.
- Angelopoulos, A. and Sakelliou, L. (1994). *Notes on Health Physics (Ionizing Radiation)*. National and Kapodistrian University of Athens. in Greek.
- Axford, W. I. (1965). The modulation of galactic cosmic rays in the interplanetary medium. *Planetary and Space Science*, 13(2):115–130. DOI: 10.1016/0032-0633(65)90181-9.
- Bagshaw, M., Irvine, D., and Davies, D. M. (1996). Exposure to cosmic radiation of british airways flying crew on ultralonghaul routes. *Occupational and Environmental Medicine*, 53(7):495–498. DOI: 10.1136/oem.53.7.495.
- Baily, S. (2000). Air crew radiation exposure. an overview. *Nuclear News*, pages 32–40.

- Baioccoa, G., Giraudob, M., Bocchinib, L., Barbieria, S., Locantoreb, I., Brussolod, E., Giaccosad, D., Meuccid, L., Steffeninod, S., Ballarioe, A., Barresie, B., Barresie, R., M. Benassaif, M., L. Ravagnolof, L., Naricig, L., Rizzog, A., Carrubbai, E., Carubiai, F., Nerii, G., Crisconioj, M., Piccirilloj, S., Valentiniij, G., Barberok, S., Giaccik, M., Lobasciob, C., and Ottolenghia, A. (2018). A water-filled garment to protect astronauts during interplanetary missions tested on board the iss. *Life Sciences in Space Research*, 18:1–11. DOI: 10.1016/j.lssr.2018.04.002.
- Baker, D. N. (1998). What is space weather? *Advances in Space Research*, 22(1):7–16. DOI: 10.1016/S0273-1177(97)01095-8.
- Baker, D. N. (2002). How to cope with space weather. *Science*, 297(5586):1486–1487. DOI: 10.1126/science.1074956.
- Barish, R. J. and Dilchert, S. (2010). Human resource responsibilities: Frequent flyer radiation exposure. *Employee Responsibilities and Rights Journal*, 22:361–369. DOI: 10.1007/s10672-010-9159-6.
- Barr, Y., Bacal, K., Jones, J. A., and Hamilton, D. R. (2007). Breast cancer and spaceflight: Risk and management. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 78(4):26–37.
- Bartlett, D. T., Beck, P., Bottollier Depois, J. F., Lindborg, L., O’Sullivan, D., Tommasino, L., Wissmann, F., d’Erico, F., Heinrich, W., Pelliccioni, M., Roos, H., Schraube, H., Silari, M., and Spurny, F. (2001). Investigation of radiation doses at aircraft altitudes during a complete solar cycle. *Proceedings SOLSPA: The Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, Italy*. 2002ESASP.477.5258.
- Beck, P. (2007). Aircraft crew radiation exposure in aviation altitudes during quiet and solar storm periods. *Lilensten J. (eds) Space Weather. Astrophysics and Space Science Library*, 344:241–266. DOI: 10.1007/1-4020-5446-7_22.
- Beck, P., Bartlett, D., Lindborg, L., McAulay, I., Schnuer, K., Schraube, H., and Frantisek Spurny, F. (2006). Aircraft crew radiation workplaces: Comparison of measured and calculated ambient dose equivalent rate data using the eurados in-flight radiation data base. *Radiation Protection Dosimetry*, 118(2):182–189. DOI: 10.1093/rpd/ncl029.
- Beck, P., Bartlett, D. T., Bilski, P., Dyer, C., Fluckiger, E., Fuller, N., Lantos, P., Reitz, G., Ruhm, W., Spurny, F., Taylor, G., Trompier, F., and Wissmann, F. (2008). Validat-

- tion of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiation Protection Dosimetry*, 131(1):51–58. DOI: 10.1093/rpd/ncn238.
- Becker, D. and Sevilla, M. D. (1993). The chemical consequences of radiation damage to dna. *Advances in Radiation Biology*, 17:121–180. DOI: 10.1016/B978-0-12-035417-7.50006-4.
- Becquerel, H. (1896). Sur les radiations emises par phosphorescence. *Comptes rendus de l'Academie des Sciences*, 122:420–421.
- Belov, A. (2008). Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 4:439–450. DOI: 10.1017/S1743921309029676.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., and Mariatos, G. (2005a). Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on november 2003. *Journal of Geophysical Research, Space Physics*, 110(A9). DOI: 10.1029/2005JA011067.
- Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Plainaki, C., and Yanke, V. (2005b). Solar cosmic rays during the extremely high ground level enhancement on february 23, 1956. *Annales Geophysicae*, 224:2281–2291. SRef-ID: 1432-0576/ag/2005-23-1.
- Benton, E. R. and Benton, E. V. (2001). Space radiation dosimetry in low earth orbit and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 184:255–294. DOI: 10.1016/s0168-583x(01)00748-0.
- Berezinsky, V. S. (1990). Cosmic ray propagation in the galaxy. *Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference*, 11:115.
- Berger, T., Bilski, P., Hajek, M., Puchalska, M., and Reitz, G. (2013). The matroshka experiment: Results and comparison from extravehicular activity (mtr-1) and intravehicular activity (mtr-2a/2b) exposure. *Radiation Research*, 180(6):622–637. DOI: 10.1667/RR13148.1.
- Biermann, P. L., Gaisser, T. K., and Stanev, T. (1995). Origin of galactic cosmic rays. *Physical Review D*, 51(7):3450. DOI: 10.1103/PhysRevD.51.3450.
- Bilski, P., Olko, P., and Horwacik, T. (2004). Air-crew exposure to cosmic radiation on board of polish passenger aircraft. *NUKLEONIKA*, 49(2):77–83. Corpus ID: 31943690.

- Blettner, M., Zeeb, H., Auvinen, A., Ballard, T., Caldora, M., Eliasch, H., Gundestrup, M., Haldorsen, T., Hammar, N., Hammer, G. P., Irvine, D., Langner, I., Paridou, A., Pukkala, E., Rafnsson, V., Storm, H., Tulinius, H., Tveten, U., and Tzonou, A. (2003). Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in europe. *International Journal of Cancer*, 106:946–952. DOI: 10.1002/ijc.11328.
- Boezio, M., Munini, R., and Picozza, P. (2020). Cosmic ray detection in space. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 112. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2020.103765.
- Boteler, D. H., Pirjola, R. J., and Nevanlinna, H. (1998). The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth’s surface. *Advances in Space Research*, 22:17–27. DOI: 10.1016/S0273-1177(97)01096-X.
- Bothmer, V. and Daglis, I. A. (2007). *Space Weather. Physics and Effects*. Praxis Publishing Ltd, Springer.
- Bottollier-Depois, J. F., Beck, P., Latocha, M., Mares, V., Matthiä, D., Rühm, W., and Wissmann, F. (2012). Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation. *European Radiation Dosimetry Group (EURADOS) Report 2012-03*. ISBN: 978-3-943701-02-9.
- Bottollier-Depois, J. F., Biau, A., Blanchard, P., Clairand, I., Dessarps, P., Lantos, P., Saint-Lô, D., and Valero, M. (2003). Assessing exposure to cosmic radiation aboard aircraft: the sievert system. *Radioprotection*, 38(3):357–366. DOI: 10.1051/radiopro:2003013.
- Bottollier-Depois, J. F., Biau, A., Blanchard, P., Dessarps, P., Lantos, P., Saint-Lô, D., and Valero, M. (2002). Cosmic radiation dosimetry on boardanaircraft: the sievert system. *IRSN Scientific and Technical Report*. Chapter 4.
- Bottollier-Depois, J. F., Blanchard, P., Clairand, I., Dessarps, P., Fuller, N., Lantos, P., Saint-Lô, D., and Trompier, F. (2007). An operational approach for aircraft crew dosimetry: the sievert system. *Radiation Protection Dosimetry*, 125(1-4):421–424. DOI: 10.1093/rpd/ncl555.
- Bramlitt, E. and Shonka, J. J. (2015). Radiation exposure of aviation crewmembers and cancer. *Health Physics*, 108(1):76–86. DOI: 10.1097/HP.000000000000166.

- Bütikofer, R. (2018). *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis, Chapter: Ground-Based Measurements of Energetic Particles by Neutron Monitors*. Springer. Editors: Malandraki, O. and Crosby, N. DOI: 10.1007/978-3-319-60051-2-6.
- Butikofer, R., Fluckiger, E., Desorgher, L., and Moser, M. R. (2008). The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the radiation dose rate at aircraft altitude. *Science of the Total Environment*, 391(2):177–183. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.021.
- Cane, H. (2000). Coronal mass ejections and forrush decreases. *Space Science Reviews*, 93:55–77. DOI: 10.1023/A:1026532125747.
- Carmichael, H. (1964). *IQSY Instructions Manual (7)*. The organization, Deep River, Canada.
- Chancellor, J. C. and Scott, G. B. I. and Sutton, J. P. (2014). Space radiation: The number one risk to astronaut health beyond low earth orbit. *Life*, 4:491–510. DOI: 10.3390/life4030491.
- Chancellor, J. C., Blue, R. S., Cengel, K. A., Auñón-Chancellor, S. M., Rubins, K. H., Katzgraber, H. G., and Kennedy, A. R. (2018). Limitations in predicting the space radiation health risk for exploration astronauts. *NPJ Microgravity*, 4:8. DOI: 10.1038/s41526-018-0043-2.
- Cho, J. H. (2020). Analysis of the exposure of domestic flight crews to space radiation. *Journal of the Korean Physical Society*, 77(3):197–200. eISSN:1976-8524.
- Choppin, G., Liljenzin, J., and Rydberg, J. (2002). *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*. Butterworth-Heinemann. Chapter 6: Absorption of Nuclear Radiation.
- Cinelli, G., Gruber, V., De Felice, L., Bossew, P., Hernandez-Ceballos, M. A., Tollefsen, T., Mundigl, S., and De Cort, M. (2017). European annual cosmic-ray dose: estimation of population exposure. *Journal of Maps*, 13(3):812–821. DOI: 10.1080/17445647.2017.1384934.
- Clairand, I., Fuller, N., Bottollier-Depois, J. F., and Trompier, F. (2009). The sievert system for aircrew dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):282–285. DOI: 10.1093/rpd/ncp123.
- Clover, E. W. (2006). The 1859 space weather event: Then and now. *Advances in Space Research*, 38(2):119–129. DOI: 10.1016/j.asr.2005.07.077.

- CNSC (2013). Linear-non-threshold model. *Canadian Nuclear Safety Commission Fact Sheet*.
- Copeland, K. (2017). Cari-7a: Development and validation. *Radiation Protection Dosimetry*, 175(4):419–431. DOI: 10.1093/rpd/ncw369.
- Copeland, K. (2018). Mira 2017: A cari-7 based solar radiation alert system. *Civil Aerospace Medical Institute, Federal Aviation Administration*. Final Report DOT/FAA/AM-18/6.
- Copeland, K. and Atwell, W. (2019). Flight safety implications of the extreme solar proton event of 23 february 1956. *Advances in Space Research*, 63:665–671. DOI: 10.1016/j.asr.2018.11.005.
- Cortese, F., Klokov, D., Osipov, A., Stefaniak, J., Moskalev, A., Schastnaya, J., Cantor, C., Aliper, A., Mamoshina, P., Ushakov, I., Sapetsky, A., Vanhaelen, Q., Alchinova, I., Karganov, M., Kovalchuk, O., Wilkins, R., Shtemberg, A., Moreels, M., Baatout, S., Izumchenko, E., Pedro de Magalhães, J., Artemov, A. V., Costes, S., Beheshti, A., Wen Mao, X., Pecaut, M. J., Kaminskiy, D., Ozerov, I. V., Scheibye-Knudsen, M., and Zhavoronkov, A. (2018). Vive la radiorésistance!: Converging research in radiobiology and biogerontology to enhance human radioresistance for deep space exploration and colonization. *Oncotarget*, 9(18):14692–14722. DOI: 10.18632/oncotarget.24461.
- Cottin, H., Kotler, J. M., Billi, D., Cockell, C., Demets, R., Ehrenfreund, P., Elsaesser, A., d’Hendecourt, L., J.W.A. van Loon, J., Martins, Z., Onofri, S., Quinn, R. C., Rabbow, E., Rettberg, P., Ricco, A. J., Slenzka, K., de la Torre, R., de Vera, J., Westall, F., Carrasco, N., Fresneau, A., Kawaguchi, Y., Kebukawa, Y., Nguyen, D., Poch, O., Saiagh, K., Stalport, F., Yamagishi, A., Yano, H., and Klamm, B. A. (2017). Space as a tool for astrobiology: Review and recommendations for experimentations in earth orbit and beyond. *Space Science Reviews*, 209:83–181. DOI: 10.1007/s11214-017-0365-5.
- Cottingham, W. N. and Greenwood, D. A. (2004). *An Introduction to Nuclear Physics*. Cambridge University Press. 2nd Edition.
- Courades, J. M. (1999). European legislation on protection against cosmic radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 86(4):343–346. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032971.
- Cucinotta, F. (2014). Space radiation risks for astronauts on multiple international space station missions. *PLoS ONE*, 9(4):1–14. DOI: 10.1371/journal.pone.0096099.

- Cucinotta, F. (2015). Review of nasa approach to space radiation risk assessments for mars exploration. *Health PhysICS*, 108(2):131–142. DOI: 10.1097/HP.0000000000000255.
- Cucinotta, F., Hu, S., Schwadron, N. A., Kozarev, K., Townsend, L. W., and Kim, M. H. Y. (2010). Space radiation risk limits and earth, moon, mars environmental models. *Space Weather*, 156(0-9):1–12. DOI: 10.1029/2010SW000572.
- Cucinotta, F., Kim, M., Chappell, L., and Huff, J. L. (2013). How safe is safe enough? radiation risk for a human mission to mars. *PLoS ONE*, 8(10):1–9. DOI: 10.1371/journal.pone.0074988.
- Cucinotta, F., Manuel, F. K., Jones, J., Iszard, G., Murrey, J., Djojonegroc, B., and Wear, M. (2001). Space radiation and cataracts in astronauts. *Radiation Research*, 156(5):460–466. DOI: 10.1667/0033-7587(2001)156[0460:SRACIA]2.0.CO;2.
- Cucinotta, F. A. and Durante, M. (2006). Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implication for space exploration by human beings. *The Lancet Oncology*, 7(5):431–435. DOI: 10.1016/S1470-2045(06)70695-7.
- Curie, P. and Sklodowska Curie, M. (1898). Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende. *Comptes rendus de l' Academie des Sciences*, 127:175–178.
- Daglis, I. A. (2005). *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Springer Netherlands. Proceedings of the NATO ARW on Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, Rhodes, Greece, from 25 to 29 March 2003.
- D'Andrea, C., Poirier, J., and Balsara, D. S. (2009). Experimental data and analysis of the october 2003 forbush decrease. *Advances in Space Research*, 44(10):1247–1251. DOI: 10.1016/j.asr.2008.11.032.
- Dartnell, L. R., Nordheim, T. A., Patel, M. R., Mason, J. P., Coates, A. J., and Jones, G. H. (2015). Constraints on a potential aerial biosphere on venus: I. cosmic rays. *Icarus*, 257:396–405. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.05.006.
- De Angelis, G., Caldora, M., Santaquilani, M., Scipionea, R., and Verdecchiaa, A. (2001). Health risks from radiation exposure for civilian aviation flight personnel: A study of italian airline crew members. *Radiation Research*, 156:689–694. DOI: 10.1667/0033-7587(2001)156[0689:hrfref]2.0.co;2.

- Desmaris, G. (2016). Cosmic radiation in aviation: radiological protection of air france aircraft crew. *ICRP 2015 Proceedings*, 11:65–74. DOI: 10.1177/0146645316636009.
- Desorgher, L. (2005). Planetocosmics software user manual. *Physikalisches Institut, University of Bern*.
- Desorgher, L., Flückiger, E. O., and Gurtner, M. (2006). The planetocosmics geant4 application. *Proceedings of the 36th COSPAR Scientific Assembly*.
- Dettmann, J., Reitz, G., and Gianfiglio, G. (2007). Matroshka: The first esa external payload on the international space station. *Acta Astronautica*, 60(1):17–23. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.04.018.
- Di Trolio, R., Di Lorenzo, G., Fumo, B., and Ascierio, P. A. (2015). Cosmic radiation and cancer: is there a link? *Future Oncology*, 11(7):1123–1135. DOI: 10.2217/fon.15.29.
- Doherty, P., Coster, A. J., and Murtagh, W. (2004). Space weather effects of october–november 2003. *GPS Solutions*, 8:267–271. DOI: 10.1007/s10291-004-0109-3.
- Dorman, L., Pustil’nik, L. A., Sternlieb, A., Zukerman, I. G., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Yanke, V. G., Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Tatsis, S., Iucci, N., Villorosi, G., Fedorov, Y., Shakhov, B. A., and Murat, M. (2004). Monitoring and forecasting of great solar proton events using the neutron monitor network in real time. *IEEE for Plasma Science*, 32(4):1478–1488.
- Dorman, L. I. (2004). *Cosmic Rays in the Earth’s Atmosphere and Underground*. 303. Springer Netherlands. DOI: 10.1007/978-1-4020-2113-8.
- Dorman, L. I., Paschalis, P., Plainaki, C., and Mavromichalaki, H. (2015). Estimation of the cosmic ray ionization in the earth’s atmosphere during gle71. *34th International Cosmic Ray Conference Proceedings*. The Hague, The Netherlands.
- Dreger, S., Wollschläger, D., Schafft, T., Hammer, G. P., Blettner, M., and Zeeb, H. (2020). Cohort study of occupational cosmic radiation dose and cancer mortality in german aircrew, 1960–2014. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 77:285–291. DOI: 10.1136/oemed-2019-106165.
- Durante, M. (2014). Space radiation protection: Destination mars. *Life Sciences in Space Research*, 1:2–9. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.01.002.

- Eastwood, J. P., Biffis, E., Hapgood, M. A., Green, L., Bisi, M. M., Bentley, R. D., Wicks, R., McKinnell, L. A., Gibbs, M., and Burnett, C. (2017). The economic impact of space weather: Where do we stand? *Risk Analysis*, 37(2):1486–1487. DOI: 10.1111/risa.12765.
- EC (1996). Exposure of air crew to cosmic radiation. *Radiation Protection 85, European Commission, Luxembourg*. ISBN: 92-827-7994-7.
- EC (2004). Radiation protection 140: Cosmic radiation exposure of aircraft crew – compilation of measured and calculated data. *Luxembourg: Directorate-General for Energy and Transport of the European Commission*. ISBN: 92-894-8448-9.
- EC (2009). Radiation protection 156: Evaluation of the implementation of radiation protection measures for aircrew. *Luxembourg: Directorate-General for Energy and Transport of the European Commission*. ISBN: 978-92-79-08409-6.
- EC (2017). Radiation protection 173: Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation. *Luxembourg: Directorate-General for Energy and Transport of the European Commission*. ISBN: 978-92-79-27036-9.
- Echer, E., Gonzalez, W. D., Guarnieri, F. L., DalLago, A., and Vieira, L. E. A. (2006). Introduction to space weather. *Advances in Space Research*, 35(5):855–865. DOI: 10.1016/j.asr.2005.02.098.
- EEAE (2015). Prisma: Holistic assessment of the radial load of the population and development of a national information system on radiation. *Hellenic Atomic Energy Agency*.
- Erinmez, I. A., Kappenman, J. G., and Radasky, W. (2002). Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company’s electric power transmission system. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 64(5-6):743–756. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00036-6.
- Eroshenko, E., Belov, A., Mavromichalaki, H., Mariatos, G., Oleneva, V., Plainaki, C., and Yanke, V. (2004). Cosmic ray variations during the two great bursts of solar activity in the 23rd solar cycle. *Solar Physics*, 224:345–358. DOI: 10.1007/s11207-005-5719-6.
- EURATOM (1996). Directive 96/29/euratom of 13 may 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. *Official Journal of the European Communities*. OJ L159 29/06/1996, p0001 - 0114.

- EURATOM (2013). Council directive 2013/59/euratom of 5 december 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Official Journal of the European Communities*. OJ L13 17/01/2014.
- FAA (1994). Crewmember training on in flight radiation exposure. *Federal Aviation Administration Advisory Circular 120:61*.
- FAA (2006). In flight radiation exposure. *Federal Aviation Administration Advisory Circular 120:61A*.
- FAA (2007). 14 cfr appendix p to part 121. requirements for etops and polar operations. *U.S. Code of Federal Regulations*.
- Federico, C. A., de Castilho Pereira, H. H., Pereira, M. A., Gonçalez, O. L., and Ehlin Caldas, L. V. (2010). Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of dcta's flight test special group. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2(2):137–144. DOI: 10.5028/jatm.2010.02025910.
- Fermi, E. (1940). Reactions produced by neutrons in heavy element. *Nature*, 146:640–642. DOI: 10.1038/146640a0.
- Florios, K., Kontogiannis, I., Park, S. H., Guerra, J. A., Benvenuto, F., Shaun Bloomfield, D., and Georgoulis, M. K. (2018). Forecasting solar flares using magnetogram-based predictors and machine learning. *Solar Physics*, 293(28). DOI: 10.1007/s11207-018-1250-4.
- Forbush, S. (1958). Cosmic ray intensity variations during two solar cycles. *Journal of Geophysical Research*, 63(4):651–669. DOI: 10.1029/JZ063i004p00651.
- Forbush, S. E. (1937). On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm. *Physical Review*, 51:1108–1109. DOI: 10.1103/PhysRev.51.1108.3.
- Forget, F., Hourdin, F., Fournier, R., Hourdin, C., Talagrand, O., Collins, M., Lewis, S. R., Read, P. L., and Huot, J. (1999). Improved general circulation models of the martian atmosphere from the surface to above 80 km. *Journal of Geophysical Research*, 104(10):24155–24176. DOI: 10.1029/1999JE001025.
- Friedberg, W. and Copeland, K. (2003). What aircrews should know about their occupational exposure to ionizing radiation. *Federal Aviation Administration*. DOT/FAA/AM-03/16.

- Friedberg, W., Copeland, K., Duke, F. E., O'Brien III, K., and Darden Jr., E. B. (2000). Radiation exposure during air travel: guidance provided by the federal aviation administration for air carrier crews. *Health Physics*, 79(5):591–595. DOI: 10.1097/00004032-200011000-00018.
- Friedberg, W., Faulkner, D. N., Snyder, L., Darden Jr, E. B., and O'Brien, K. (1989). Galactic cosmic radiation exposure and associated health risks for air carrier crewmembers. *Future Oncology*, 60(11):1104–1108. PMID: 2818404.
- Gaisser, T., Honda, M., Lipari, P., and Stanev, T. (2001). Primary spectrum to 1 tev and beyond. *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference*, pages 643–646. Hamburg, Germany.
- Gaisser, T. K., Engel, R., and Resconi, E. (2016). *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 2 edition.
- Gaisser, T. K. and Stanev, T. (1995). 20. cosmic rays. pages 132–137. Bartol Research Inst., Univ. of Delaware.
- Galata, E., Ioannidou, S., Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Paravolidakis, K., Kouremeti, M., Rentifis, L., Simantirakis, E., and Trachanas, K. (2017). Impact of space weather on human heart rate during the years 2011-2013. *Astrophysics and Space Science*, 362:138. DOI: 10.1007/s10509-017-3118-8.
- Garzon, J., Collazo, J., Cuenca-García, J., Castro, D., Otero, J., Yermo, M., Blanco, J., Kurtukian-Nieto, T., Morozova, A., Pais, M. A., Blanco, A., Fonte, P., Lopes, L., Kornakov, G., Álvarez Pol, H., Cabanelas, P., Pazos, A., Seco, M., Riádigos, I., and Taboada, J. (2016). Tragaldabas. first results on cosmic ray studies and their relation with the solar activity, the earth magnetic field and the atmospheric properties. *XXV ECRS 2016 Proceedings, eConf TBA*. arXiv:1701.07277 [astro-ph.HE].
- Georgoulis, M. K. and Rust, . M. (2007). Quantitative forecasting of major solar flares. *The Astrophysical Journal*, 661:L109–L112. DOI: 10.1086/518718.
- Gerontidou, M., Katzourakis, N., Mavromichalaki, H., Yanke, V., and Eroshenko, E. (2021). World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade. *Advances in Space Research*, 67(7):2231–2240. DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.011.

- Ghia, P. L. (2020a). Cosmic ray detection i. *Lectures for 1FAF27 Cosmic ray astrophysics*. Lectures for 1FAF27 Cosmic ray astrophysics, University of Nova Gorica, Faculty of Natural Sciences.
- Ghia, P. L. (2020b). Cosmic ray detection ii. *Lectures for 1FAF27 Cosmic ray astrophysics*. University of Nova Gorica, Faculty of Natural Sciences.
- Ginzburg, V. L. (1974). On the origin of cosmic rays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 277:463–479.
- Ginzburg, V. L. and Syrovatsky, S. I. (1965). Origin of cosmic rays. *Proceedings of the 9th International Cosmic Ray Conference*, page 53.
- Gnevyshev, M. and Ohl, A. (1948). On the 22-year solar cycle. *Astronomicheskii Zhurnal*, 25(18).
- Gopalswamy, N., Barbieri, L., Cliver, E. W., Lu, G., Plunckett, S. P., and Skoug, R. M. (2005). Introduction to violent sun earth connection events of october november 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110(A09S00). DOI: 10.1029/2005JA011268.
- Gopalswamy, N., Xie, H., Yashiro, S., and Usoskin, I. (2010). Ground level enhancement events of solar cycle 23. *Indian Journal of Radio and Space Physic*, 39:240–248. ISSN: 0367-8393.
- Gosling, F. (1999). *The Manhattan Project: Making the Atomic Bomb*. United States Department of Energy. DOE/MA-0001.
- Grajewski, B., Waters, M. A., Whelan, E. A., and Bloom, T. F. (2002). Radiation dose estimation for epidemiologic studies of flight attendants. *American Journal of Industrial Medicine*, 41(6):27–37. DOI: 10.1002/ajim.10018.
- Grajewski, B., Waters, M. A., Yong, L. C., Tseng, C., Zivkovich, Z., and Cassinelli, R. T. (2011). Airline pilot cosmic radiation and circadian disruption exposure assessment from logbooks and company records. *Annals of Occupational Hygiene*, 55(5):465–475. DOI: 10.1093/annhyg/mer024.
- Grajewski, B., Yong, L. C., Bertke, S. J., Bhatti, P., Little, M., Ramsey, M., Tucker, J., Ward, E. M., Whelan, E. A., Sigurdson, A. J., and Waters, M. A. (2018). Chromosome translocations and cosmic radiation dose in male u.s. commercial airline pilots. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 89(7):465–475. DOI: 10.3357/AMHP.4502.2018.

- Grasty, R. L. and LaMarre, J. R. (2004). The annual effective dose from natural sources of ionising radiation in Canada. *Radiation Protection Dosimetry*, 108(3):215–226. DOI: 0.1093/rpd/nch022.
- Greisen, K. (1966). End to the cosmic-ray spectrum? *Physical Review Letters*, 16(17):201–213. DOI: 10.1103/PhysRevLett.16.748.
- Gudmundsdottir, E. M., Hrafnkelsson, J., and Rafnsson, V. (2017). Incidence of cancer among licenced commercial pilots flying north atlantic routes. *Environmental Health*, 16:86. DOI: 10.1186/s12940-017-0295-4.
- Guembou Shouop, C. J., Ndontchueng Moyo, M., Nguelem Mekongtso, E. J., Cho, K., and Strivay, D. (2020). Radiological protection requirements with regard to cosmic ray exposure during air travel. *The European Physics Journal Plus*, 135:438–284. DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00468-8.
- Gundestrup, M. and Storm, H. H. (1999). Radiation induced acute myeloid leukaemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population based cohort study. *Lancet*, 354:2029–2031. DOI: 10.1016/S0140-6736(99)05093-X.
- Hahn, O. and Strassmann, F. (1939). Über den nachweis und das verhalten der bei der bestrahlung des urans mittels neutronen entstehenden erdalkalimetalle. *Die Naturwissenschaften*, 26(46):755–756.
- Hammer, G. P., Blettner, M., Langner, I., and Zeeb, H. (2012). Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *European Journal of Epidemiology*, 27:419–429. DOI: 10.1007/s10654-012-9698-2.
- Hammer, G. P., Blettner, M., and Zeeb, H. (2009). Epidemiological studies of cancer in aircrew. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):232–239. DOI: 10.1093/rpd/ncp125.
- Hammer, G. P., Zeeb, H., Tveten, U., and Blettner, M. (2000). Comparing different methods of estimating cosmic radiation exposure of airline personnel. *Radiation and Environmental Biophysics*, 39(4):227–231. DOI: 10.1007/s004110000071.
- Hands, A. D. P., Ryden, K. A., and Mertens, C. J. (2016). The disappearance of the Pfotzer-regener maximum in dose equivalent measurements in the stratosphere. *Space Weather*, 14(10):776–785. DOI: 10.1002/2016SW001402.

- Hanslmeier, A. (2010). The sun and space weather. *Heliophysical Processes*, pages 233–249. DOI: 10.1007/978-3-642-11341-3-14.
- Hathaway, D. (2010). The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(1). DOI: 10.12942/lrsp-2010-1.
- Hatton, C. J. (1971). The neutron monitor. *Progress in Elementary Particle and Cosmic-ray Physics*, 10. in J.,G. Wilson and S. A. Wouthuysen (eds.), North Holland Publishing Co., Amsterdam.
- Hatton, C. J. and Carmichael, H. (1964). The title of the work. *Canadian Journal of Physics*, 42:2443–2472.
- Heimers, A. (1999). Cytogenetic analysis in human lymphocytes after exposure to simulated cosmic radiation which reflects the inflight radiation environment. *International Journal of Radiation Biology*, 75(6):691± 698. ISSN: 0955-3002.
- Hellweg, C. and Baumstark-Khan, C. (2007). Getting ready for the manned mission to mars: the astronauts' risk from space radiation. *Naturwissenschaften*, 94:517–526. DOI: 10.1007/s00114-006-0204-0.
- Herbst, K., Banjac, S., Atri, D., and Nordheim, T. A. (2020). Revisiting the cosmic-ray induced venusian radiation dose in the context of habitability. *Astronomy and Astrophysics*, 633:1–12. DOI: 10.1051/0004-6361/201936968.
- Hubert, G. and Aubry, S. (2017). Analysis of solar and galactic cosmic rays induced atmospheric ionizing radiation: Impacts for typical transatlantic flights and antarctica environment. *JSM Environmental Science and Ecology*, 5(3):9–44.
- Hubert, G. and Aubry, S. (2018). Analysis of exposure to solar and galactic cosmic radiations of flights representative of the european international air traffic. *Radiation Research*, 190(3):271–281. DOI: 10.1667/RR15095.1.
- IAEA (2004). Radiation, people and the environment. *International Atomic Energy Agency*.
- IAEA (2018). Radiation protection of the public and the environment. *International Atomic Energy Agency Safety Standards: General Safety Guide No. GSG8*.
- ICAO (1993). Manual of the icao standardatmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)). *International Civil Aviation Organization*. Doc 7488/3.

- ICNIRP (2007). International commission on non-ionizing radiation protection guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, 87(2):171–186. DOI: 10.1097/00004032-200408000-00006.
- ICRP (1966). Recommendations of the icrp. icrp publication 9. *Annals of the ICRP*.
- ICRP (1977). Recommendations of the icrp. icrp publication 26. *Annals of the ICRP*, 1(3).
- ICRP (1984). Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. icrp publication 39. *Annals of the ICRP*, 14(1).
- ICRP (1991). 1990 recommendations of the international commission on radiological protection. icrp publication 60. *Annals of the ICRP*, 21(1-3):1–201. PMID: 2053748.
- ICRP (1997). General principles for the radiation protection of workers. icrp publication 75. *Annals of the ICRP*, 27(1).
- ICRP (2007). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. *Annals of the ICRP*, 37(2-4):1–332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
- ICRP (2012). Icrp statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. icrp publication 118. *Annals of the ICRP*, 41(1-2):1–322. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.02.001.
- ICRP (2013). Assessment of radiation exposure of astronauts in space. icrp publication 123. *Annals of the ICRP*, 42(4):1–339. DOI: 10.1016/j.icrp.2013.05.004.
- ICRP (2016). Radiological protection from cosmic radiation in aviation. icrp publication 132. *Annals of the ICRP*, 45(1):1–48. DOI: 10.1177/0146645316645449.
- ICRU (1980). Radiation quantities and units. report 33. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*. Bethesda, MD.
- ICRU (2010). Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. report 84. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 10(2). DOI: 10.1093/jicru/10.2.Report84.

- IFALPA (2019). Aircrews and ionizing radiation. *IFALPA Human Performance Briefing Leaflet*. 19HUPBL01.
- Inkret, W. C., Meinhold, C. B., and Taschner, J. C. (1995). Radiation and risk: A hard look at the data. *Los Alamos Science*, 23:116–123.
- ISO (1975). Iso 2533:1975 standard atmosphere. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- ISO (2004). Iso 15390:2004 space environment (natural and artificial) — galactic cosmic ray model. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- ISO (2015). Iso 20785-3:2015 dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft part 3: Measurements at aviation altitude. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- ISO (2019). Iso 20785-4:2019 dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft part 4: Validation of codes. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- ISO (2020a). Iso 20785-1:2020 dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft part 1: Conceptual basis for measurements. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- ISO (2020b). Iso 20785-2:2020 dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft part 2: Characterization of instrument response. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- Jingnan Guo, J., Wimmer-Schweingruber, R. F., Grande, M., Lee-Payne, Z. H., and Matthia, D. (2019). Ready functions for calculating the martian radiation environment. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 59. DOI: 10.1051/swsc/2019004.
- Jones, J., McCarten, M., Manuel, K., Djojonegoro, B. Murray, J., Cucinotta, F. Feiversen, A., and Wear, M. (2006). Understanding cataract risk in aerospace flight crew and review of mechanisms of cataract formation. *NASA Technical Reports*. Document ID: 20060051793.
- Kataoka, R., Sato, T., Miyake, S., Shiota, D., and Kubo, Y. (2018). Radiation dose nowcast for the ground level enhancement on 10–11 september 2017. *Space Weather*, 6:917–923. DOI: 10.1029/2018SW001873.

- Keating, G. M., Bertaux, J. L., Bougher, S. W., Dickinson, R. E., Cravens, T. E., Hedin, A. E., Krasnopolsky, V. A., Nicholson, J. Y., Paxton, L. X., and von Zahn, U. (1985). Models of venus neutral upper atmosphere: Structure and composition. *Advances in Space Research*, 5:117–171. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90200-5.
- Kliore, A. J., Moroz, V. I., and Keating, G. M. (1985). The venus international reference atmosphere. *Advances in Space Research*, 5:1–305.
- Krain, L. S. (2019). Aviation, high altitude, cumulative radiation exposure and their associations with cancer. *Medical Hypotheses*, 34(1):33–40. DOI: 10.1016/0306-9877(91)90062-4.
- Kuipers, S., Venemans Jellema, A., Cannegieter, S. C., van Haften, M., Middeldorp, S., Büller, H. R., and Rosendaal, F. R. (2014). The incidence of venous thromboembolism in commercial airline pilots: a cohort study of 2630 pilots. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 12(8):1260–1265. DOI: 10.1111/jth.12627.
- Langner, I., Blettner, M., Gundestrup, M., Storm, H., Aspholm, R., Auvinen, A., Pukkala, E., Hammer, G. P., Zeeb, H., Hrafnkelsson, J., Rafnsson, V., Tulinius, H., De Angelis, G., Verdecchia, A., Haldorsen, T., Tveten, U., Eliasch, H., Hammar, N., and Linnarsjö, A. (2004). Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a european cohort study (escape). *Radiation and Environmental Biophysics*, 42:247–256. DOI: 10.1007/s00411-003-0214-7.
- Lantos, P. and Fuller, N. (2004). Semi-empirical model to calculate potential radiation exposure on board airplane during solar particle events. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 32(4):1468–1477. DOI: 10.1109/TPS.2004.830988.
- Lanzerotti, L. J. (2001). Space weather effects on technologies. *Space Weather*, 125:11–22. DOI: 10.1029/GM125p0011.
- Latocha, M. (2017). Real time radiation dose assessment at civil flight altitudes due to galactic cosmic rays and spontaneous solar particle events. PhD Thesis, The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Kraków.
- Latocha, M. and Beck, P. (2016). Cosmic radiation assessment at esa’s space weather portal with avidos. *16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, pages 1–4. Bremen, DOI: 10.1109/RADECS.2016.8093138.

- Latocha, M. and Beck, P. (2017). Nowcast of radiation exposure at aviation altitudes with avidos. *SEPRAD Workshop 2017*. Seibersdorf, Austria.
- Latocha, M., Beck, P., and Rollet, S. (2009). Avidos - a software package for european accredited aviation dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):286–290. DOI: 10.1093/rpd/ncp126.
- Lewis, B., Bennett, L. G. I., Green, R., Butler, A., Desormeaux, M., Kitching, F., McCall, M., Ellaschuk, B., and Pierre, M. (2005). Aircrew dosimetry using the predictive code for aircrew radiation exposure (pcaire). *Radiation Protection Dosimetry*, 116(1-4):320–326. DOI: 10.1051/swsc/2017026.
- Lewis, B. J., Tume, P., Bennett, L., Pierre, M., Green, A., Cousins, T., Hoffarth, B., Jones, T., and Brisson, J. (1999). Cosmic radiation exposure on canadian-based commercial airline routes. *Radiation Protection Dosimetry*, 86(1):7–24. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032929.
- Lingri, D., Mavromichalaki, H., Belov, A., Abunina, M., Eroshenko, E., and Abunin, A. (2019). An extended study of the precursory signs of forrush decreases: new findings over the years 2008–2016. *Solar Physics*, 294(70). DOI: 10.1007/s11207-019-1461-3.
- Lingri, D., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E. Yanke, V., Abunin, A., and Abunina, M. (2016a). Forrush decreases during the deepmin and minimax of solar cycle 24. *XXV European Cosmic Ray Symposium, Turin, Italy*. eConf C16-09-04.3.
- Lingri, D., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E. Yanke, V., Abunin, A., and Abunina, M. (2016b). Solar activity parameters and associated forrush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24. *Solar Physics*, 291(3):1025–1041. DOI: 10.1007/s11207-016-0863-8.
- Linnarsjö, A., Hammar, N. and Dammström, B., Johansson, M., and Eliasch, H. (2003). Cancer incidence in airline cabin crew: experience from sweden. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 60(11):810–814. DOI: 10.1136/oem.60.11.810.
- Liu, G. S., Cook, A., Richardson, M., Vail, D., Holsinger, F. C., and Oakley-Girvan, I. (2018). Thyroid cancer risk in airline cockpit and cabin crew: a meta-analysis. *Cancers of the Head and Neck*, 3:7. DOI: 10.1186/s41199-018-0034-8.

- Lomax, M., Folkes, L., and O'Neill, P. (2013). Biological consequences of radiation-induced dna damage: Relevance to radiotherapy. *Clinical Oncology*, 25:578–585. DOI: 10.1016/j.clon.2013.06.007.
- Longair, M. S. (2011). *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press. 3rd Edition.
- Mares, V. and Leuthold, G. (2007). Altitude-dependent dose conversion coefficients in epcard. *Radiation Protection Dosimetry*, 126(1-4):581–584. DOI: 10.1093/rpd/ncm118.
- Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G., and Rühm, W. (2009). Air crew dosimetry with a new version of epcard. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):262–266. DOI: 10.1093/rpd/ncp129.
- Mares, V., Roesler, S., and Schraube, H. (2004). Averaged particle dose conversion factors in air crewdosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 110(1-4):371–376. DOI: 10.1093/rpd/nch137.
- Mares, V. and Yasuda, H. (2010). Aviation route doses calculated with epcard.net and jiscard ex. *Radiation Measurements*, 45:1553–1556. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.06.015.
- Margaritis, L. (1987). *Radiobiology: Radiation and Life*. Simmetria Athens. in Greek.
- Mariatos, G., Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., and Souvatzoglou, G. (2005). Alert system for ground level cosmic-ray enhancements prediction at the athens neutron monitor network in real-time. *International Journal of Modern Physics A*, 20:6711–6713. An optional note.
- Marion, J. (1981). *Physics in the Modern World*. Academic Press. Chapter 21: Radiation - Effects and Uses.
- Martin Andersson, M., Ryufuku, S., and Yasuda, H. (2011). Jiscard gui, a graphical interface application for simple and quick calculation of aviation route doses. *Japanese Journal of Health Physics*, 46(4):314–32. DOI: 10.5453/jhps.46.314.
- Matthiä, D. and Berger, T. (2017). The radiation environment on the surface of mars – numerical calculations of the galactic component with geant4/planetocosmics. *Life Sciences in Space Research*, 14:57–63. DOI: 10.1016/j.lssr.2017.03.005.
- Matthiä, D., Hassler, D. M., de Wet, W., Ehresmann, B., Firan, A., Flores-McLaughlin, J., Guoh, J., Heilbronn, L. H., Lee, K., Ratliff, H., Riöse, R. R., Slaba, T. C., Smith, M.,

- Stoffle, N. N., Townsend, L., Berger, T., Reitz, G., F.Wimmer-Schweingruber, R., and Zeitlin, C. (2017). The radiation environment on the surface of mars - summary of model calculations and comparison to rad data. *Life Sciences in Space Research*, 14:18–28. DOI: 10.1016/j.lssr.2017.06.003.
- Matthia, D., Heber, B., Reitz, G., Meier, M., Sihver, L., Berger, T., and Herbst, K. (2009a). Temporal and spatial evolution of the solar energetic particle event on 20 january 2005 and resulting radiation doses in aviation. *Journal of Geophysical Research*, 114. DOI: 10.1029/2009JA014125.
- Matthia, D., Heber, B., Reitz, G., Sihver, L., Berger, T., and Meier, M. (2009b). The ground level event 70 on december 13th, 2006 and related effective doses at aviation altitudes. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):304–310. DOI: 10.1093/rpd/ncp141.
- Mavromichalaki, H. (2005). *Cosmic Radiation*. National and Kapodistrian University of Athens. in Greek.
- Mavromichalaki, H., Belehaki, A., Rafios, X., and Tsagouri, I. (1997). Hale-cycle effects in cosmic-ray intensity during the last four cycles. *Astrophysics and Space Science*, 246:7–14. DOI: 10.1007/BF00637395.
- Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Paschalis, P., Paouris, E., Tezari, A., Sgouropoulos, C., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2018). Real-time detection of the ground level enhancement on 10 september 2017 by a. ne. mo. s.: System report. *Space Weather*, 16(11):1797–1805. DOI: 10.1029/2018SW001992.
- Mavromichalaki, H., Papageorgiou, C., and Gerontidou (2016). Solar cycle and 27-day variations of diurnal anisotropy of cosmic rays during the solar cycle 24. *Astrophysics and Space Science*, 361:69–77. DOI: 10.1007/s10509-016-2661-z.
- Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E. S., and Loucas, P. (2012). Space weather hazards and their impact on humancardio-health state parameters on earth. *Natural Hazards*, 64:1447–1459. DOI: 10.1007/s11069-012-0306-2.
- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Petrides, A., Assimakopoulos, B., Sarlanis, C., and Souvatzoglou, G. (2005a). Cosmic-ray events related to solar activity recorded at the athens neutron monitor station for the period 2000-2003. *International Journal of Modern Physics A*, 20(29):6714–6716. DOI: 10.1142/S0217751X05029903.

- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou, M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V., Flückiger, E. O., Bütikofer, R., Parisi, M., Storini, M., Klein, K. L., Fuller, N., Steigies, C. T., Rother, O. M., Heber, B., Wimmer – Schweingruber, R. F., Kudela, K., Strharsky, I., Langer, R., Usoskin, I., Ibragimov, A., Chilingaryan, A., Hovsepyan, G., Reymers, A., Yeghikyan, A., Kryakunova, O., Dryn, E., Nikolayevskiy, N., Dorman, L. I., and Pustil'nik, L. (1993). Applications and usage of the real – time neutron monitor database. *Advances in Space Research*, 47(2):2210–2222. DOI: 10.1016/j.asr.2010.02.019.
- Mavromichalaki, H., Plainaki, C., Gerontidou, M., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Mariatos, G., Belov, A., Eroshenko, E., Klepach, E., and Yanke, V. (2007). Gles as a warning tool for radiation effects on electronics and systems: A new alert system based on real-time neutron. *IEEE Transactions for Nuclear Science*, 54:1083–1088.
- Mavromichalaki, H., Souvatzoglou, G., Sarlanis, C., Mariatos, G., Gerontidou, M., Papaioannou, A., Plainaki, C., Tatsis, S., Belov, A., Eroshenko, E., and Yanke, V. (2005b). The new athens center on data processing from the neutron monitor network in real time. *Annales Geophysicae*, 23:3103–3110.
- Mavromichalaki, H., Souvatzoglou, G., Sarlanis, C., Mariatos, G., Plainaki, C., Gerontidou, M., Belov, A., Eroshenko, E., and Yanke, V. (2006). Space weather prediction by cosmic rays. *Advances in Space Research*, 37:1141–1147. DOI: 10.1016/j.asr.2005.03.159.
- McAulay, I. R. (2000). Regulatory control of air crew exposure to cosmic radiation: The european approach. *Health Physics*, 79(5):596 –599. DOI: 10.1097/00004032-200011000-00019.
- McCall, M., Lemay, F., Bean, M., Lewis, B., and Bennett, L. G. I. (2009). Development of a predictive code for aircrew radiation exposure. *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4). DOI: 10.1093/rpd/ncp130.
- McKenna-Lawlor, S., Gonçalves, P., Keating, A., Morgado, B., Heynderickx, D., Nieminen, P., Santin, G., Truscott, P., Lei, F., Foing, B., and Balaz, J. (2012). Characterization of the particle radiation environment at three potential landing sites on mars using esa’s merem models. *Icarus*, 218(1):723–734. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.04.004.
- McPhee, J. and Charles, J. (2009). Evidence report: Risk of acute radiation syndromes due

- to solar particle events. *NASA Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions*. Report number: JSC-CN-35747, NASA SP-2009-3405.
- McPhee, J. and Charles, J. (2016). Evidence report: Risk of radiation carcinogenesis. *Aerospace Medicine And Human Performance*, 91. NASA SP-2009-3405.
- Meier, M. M., Copeland, K., Klöble, K. E. J., Matthiä, D., Plettenberg, M. C., Schennetten, K., Wirtz, M., and Hellweg, C. E. (2020). Radiation in the atmosphere. a hazard to aviation safety? *Atmosphere*, 11(1358):1–31. DOI: 10.3390/atmos11121358.
- Meier, M. M. and Daniel Matthia, D. (2014). A space weather index for the radiation field at aviation altitudes. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4(A13). DOI: 10.1051/swsc/2014010.
- Meier, M. M., Hubiak, M., Matthia, D., Wirtz, M., and Reitz, G. (2009). Dosimetry at aviation altitudes (2006-2008). *Radiation Protection Dosimetry*, 136(4):251–255. DOI: 10.1093/rpd/ncp142.
- Meier, M. M., Trompier, F., Ambrozova, I., Kubancak, J., Matthiä, D., Ploc, O., Santen, N., and Wirtz, M. (2016). Concord: comparison of cosmic radiation detectors in the radiation field at aviation altitudes. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6(A24):7. DOI: 10.1051/swsc/2016017.
- Meitner, L. and Frisch, O. (1939). Disintegration of uranium by neutrons: A new type of nuclear reaction. *Nature*, 143(1):239–240.
- Mendenhall, M. H. and Weller, R. A. (2012). A probability-conserving cross-section biasing mechanism for variance reduction in monte carlo particle transport calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 667:38–43. DOI: 10.1016/j.nima.2011.11.084.
- Mertens, C., Meier, M. M., Brown, S., Norman, R., and Xu, X. (2013). Nairas aircraft radiation model development, dose climatology, and initial validation. *Space Weather*, 11(4):603–635. DOI: 10.1002/swe.2010.
- Mertens, C., Tobiska, W. K., Bouwer, D., Kress, B. T., Wiltberger, M., Solomon, S. C., and Murray, J. (2009). Development of nowcast of atmospheric ionizing radiation for aviation safety (nairas) model. *1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, (2009-3633). DOI: 10.2514/6.2009-3633.

- Mertens, C., Wilson, J., Blattnig, S., Kress, B., Norbury, J., Wiltberger, M., Solomon, S., Kent Tobiska, W., and Murray, J. (2008). Influence of space weather on aircraft ionizing radiation exposure. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada*. DOI: 10.2514/6.2008-463.
- Mertens, C., Wilson, J., Blattnig, S., Solomon, S. C., Wiltberger, M., Kunches, J., Kress, B. T., and Murray, J. (2007). Space weather nowcasting of atmospheric ionizing radiation for aviation safety. *45th AIAA Aeropsace Sciences Meeting and Exhibit, (2007-1104)*. DOI: doi.org/10.2514/6.2007-1104.
- Mertens, C. J., Kress, B. T., Wiltberger, M. and Kent Tobiska, W., Grajewski, B., and Xu, X. (2012). *Atmospheric Ionizing Radiation from Galactic and Solar Cosmic Rays*. IntechOpen Limited. In book: Current Topics in Ionizing Radiation Research, Edited by Mitsuru Neno, DOI:10.5772/32664.
- Millour, E., Forget, F., Spiga, A., Vals, M., Zakharov, V., Montabone, L., Lefèvre, F., Montmessin, F., Chaufray, J., López-Valverde, M., González-Galindo, F., Lewis, S. R., Read, P., Desjean, M. C., and Cipriani, F. (2018). The mars climate database (version 5.3). *Scientific Workshop "From Mars Express to ExoMars"*. ESAC, Madrid, Spain.
- Miroshnichenko, L. I. (2003). *Radiation Hazard in Space*. Kluwer Academic Publishers.
- Mishev, A., Poluianov, S., and Usoskin, I. G. (2017). Assessment of spectral and angular characteristics of sub-gle events using the global neutron monitor network. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7(A28). DOI: 10.1051/swsc/2017026.
- Mishev, A. L. (2014). Computation of radiation environment during ground level enhancements 65, 69 and 70 at equatorial region and flight altitudes. *Advances in Space Research*, 54:528–535. DOI: 10.1016/j.asr.2013.10.010.
- Mishev, A. L., Adibpour, F., Usoskin, I. G., and Felsberger, E. (2015). Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71. *Advances in Space Research*, 55:354–362. DOI: 10.1016/j.asr.2014.06.020.
- Mishev, A. L., Tuohino, S., and Usoskin, I. G. (2018). Neutron monitor count rate increase as a proxy for dose rate assessment at aviation altitudes during gles. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 8. DOI: 10.1029/1999JE001025.

- Mishev, A. L. and Usoskin, I. G. (2015). Numerical model for computation of effective and ambient dose equivalent at flight altitudes - application for dose assessment during gles. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5:354–362. DOI: 10.1051/swsc/2015011.
- Mishev, A. L. and Usoskin, I. G. (2018). Assessment of the radiation environment at commercial jet-flight altitudes during gle 72 on 10 september 2017 using neutron monitor data. *Space Weather*, 16:1921–1929. DOI: 10.1029/2018SW001946.
- Miura, K., Olsen, C. M., Rea, S., Marsden, J., and Green, A. C. (2018). Do airline pilots and cabin crew have raised risks of melanoma and other skin cancers? systematic review and meta-analysis. *British Journal of Dermatology*, 181(1). DOI: 10.1111/bjd.17586.
- MOE (2016). Health effects of radiation. *BOOKLET to Provide Basic Information Regarding Health Effects of Radiation*, (18):1297 – 1301. Ministry of the Environment, Government of Japan.
- Mrigakshi, A. I., Matthia, D., Berger, T., Reitz, G., and Wimmer-Schweingruber, R. F. (2013). Estimation of galactic cosmic ray exposure inside and outside the earth’s magnetosphere during the recent solar minimum between solar cycles 23 and 24. *Advances in Space Research*, 52:979–987. DOI: 10.1016/j.asr.2013.05.007.
- Mursula, K., Usoskin, I. G., and Kovaltsov, G. A. (2003). Reconstructing the long-term cosmic ray intensity: linear relations do not work. *Annales Geophysicae*, 21:863–867. DOI: 10.5194/angeo-21-863-2003.
- NASA (2015). Nasa spaceflight human system standard. *Technical Report NASA STD 3001,1, Revision A: Crew Health*.
- NASA (2016). Evidence report: Risk of radiation carcinogenesis. *NASA Human Research Program Space Radiation Element*.
- NASA (2018). Crew health. *NASA Standard 3001, 1*. NASA Space Flight Human-System Standard.
- NCRP (1989). Guidance on radiation received in space activities. *National Council on Radiation Protection and Measurements Technical Report No 98*. ISBN: 0-929600-04-5.
- NCRP (2006). Information needed to make radiation protection recommendations for space missions beyond low earth orbit. *National Council on Radiation Protection and Measurements Technical Report No 153*. ISBN: 978-0-929600-90-1.

- NCRP (2009). Ionizing radiation exposure of the population of the united states. *National Council on Radiation Protection and Measurements Technical Report No 160*. ISBN: 978-0-929600-98-7.
- NCRP (2014). Radiation protection for space activities: Supplement to previous recommendations. *National Council on Radiation Protection and Measurements Technical Report Commentary No 23*.
- Nicholas, J. S., Copeland, K. A., Duke, F. E., Friedberg, W., and O'Brien III, K. (2000). Galactic cosmic radiation exposure of pregnant flight crewmembers. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 71(6):647–648. PMID: 10870825.
- Nicholas, J. S., Swearingen, C. J., and Kilmer, J. B. (2009). Predictors of skin cancer in commercial airline pilots. *Occupational Medicine*, 59:434–436. DOI: 10.1093/occmed/kqp058.
- Nordheim, T. A., Dartnell, L. R., Desorgher, L., Coates, A. J., and Jones, G. H. (2015). Ionization of the venusian atmosphere from solar and galactic cosmic rays. *Icarus*, 245:80–86. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.09.032.
- Nymmik, R., Panasyuk, M., Pervaja, T. I., and Suslov, A. (1992). A model of galactic cosmic ray fluxes. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 20:427–429.
- Nymmik, R., Panasyuk, M., and Suslov, A. (1996). Galactic cosmic ray flux simulation and prediction. *Advances in Space Research*, 17(2):19–30. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00508-C.
- Obe, G. (1999). Manned missions to mars and chromosome damage. *International Journal of Radiation Biology*, 75(4):429–433. DOI: 10.1080/095530099140348.
- O'Brien, K., Friedberg, W., Sauer, H. H., and Smart, D. F. (1996). Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes. *Environment International*, 22(1):9–44. DOI: 10.1016/S0160-4120(96)00086-4.
- Office, U. G. P. (1976). U.s. standard atmosphere. *NOAA, NASA, US Air Force*. Washington D.C.
- Olsen, C., Miura, K., Dusingize, J., Hosegood, I., Brown, R., M., D., Clem, P., Marsden, J., Tinker, R., Karipidis, K., Coroneo, M., and Green, A. (2019). Melanoma incidence in australian commercial pilots, 2011–2016. *Occupational and Environmental Medicine*, 76:462–466. DOI: 10.1136/oemed-2018-105676.

- Paouris, E., Abunina, M., Belov, A., and Mavromichalaki, H. (2021). Statistical analysis on the current capability to predict the ap geomagnetic index. *New Astronomy*, 86:1–12. DOI: 10.1016/j.newast.2021.101570.
- Paouris, E., Mavromichalaki, H., Belov, A., Guischina, R., and Yanke, V. (2012). Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum. *Solar Physics*, 280:255–271. DOI: 10.1007/s11207-012-0051-4.
- Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., and Dimitrova, S. (2002). Cosmic radiation influence on the physiological state of aviators. *Natural Hazards*, 61(5-6):719–727. DOI: 10.1007/s11069-011-0057-5.
- Papaioannou, A., Souvatzoglou, G., Paschalis, P., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2013). The first ground level enhancement of solar cycle 24 on 17 may 2012 and its real time detection. *Solar Physics*, 289:423–436. DOI: 10.1007/s11207-013-0336-2.
- Paridou, A., Velonakis, E., Langner, I., Zeeb, H., Blettner, M., and Tzonou, A. (2003). Mortality among pilots and cabin crew in greece, 1960–1997. *International Journal of Epidemiology*, 32:244–247. DOI: 10.1093/ije/dyg056.
- Parker, E. (1965). The passage of energetic charged particles through interplanetary space. *Planetary Space Science*, 13(1):9–49. DOI: 10.1016/0032-0633(65)90131-5.
- Parks, G. K. (2015). Magnetosphere. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, pages 309–315. DOI: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00211-5.
- Paschalis, P. (2014). *Quality control of high resolution neutron monitor data and development of simulation techniques*. National and Kapodistrian University of Athens. PhD thesis, in Greek.
- Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Dorman, L., Plainaki, C., and D., T. (2014). Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the earth’s atmosphere. *New Astronomy*, 33:26–37. DOI: 10.1016/j.newast.2014.04.009.
- Paschalis, P. and Tezari, A. (2019). Dyastima software user manual. Athens Cosmic Ray Group, National and Kapodistrian University of Athens.
- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2016a). A new tool for radiation exposure calculations in aircraft flights during disturbed solar activity periods. *European Geosciences Union Assembly - EGU2016*. 17–22 April 2016, Vienna, Austria.

- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2017a). A new tool for space radiation exposure calculations. *10 Years NMDB Workshop*. 20–23 March 2017, Athens, Greece.
- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2017b). Space radiation study based on cascades simulations in geospace. *14th European Space Weather Week*. 27 November-1 December 2017, Ostend, Belgium.
- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2017c). A tool for space radiation exposure calculations for aviators. *14th European Space Weather Week*. 27 November-1 December 2017, Ostend, Belgium.
- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., Mavromichalaki, H., and Ioannidou, S. (2017d). Space radiation exposure simulation during different phases of solar activity. *Health Physics Society 50th Midyear Meeting*. 22-25 January 2017, Bethesda, Maryland, USA.
- Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., Mavromichalaki, H., and Nikolopoulou, P. (2016b). Space radiation exposure calculations during different solar and galactic cosmic ray activities. *XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf TBA*. arXiv:1612.08937 [physics.space-ph].
- Paschalis, P., Tezari, A., Mavromichalaki, H., Karaikos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2021). Cosmic radiation exposure of aviators for solar cycles 23 and 24. *Cosmic ray studies with neutron detectors*, 1(4):109–113. DOI: 10.38072/2748-3150/p13.
- Patel, Z. (2018). Health effects from space radiation. *The Red Risk School*. DOI: 10.13140/RG.2.2.13672.37124.
- Pelliccioni, M. (2000). Overview of fluence to effective dose and fluence to ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the fluka code. *Radiation Protection Dosimetry*, 88(4):279–297. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a033046.
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C. (2002). Nrlmsis-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research, Space Physics*, 107(A12):SIA 15–1–SIA 15–16. DOI: 10.1029/2002JA009430.
- Pinkerton, L. E., Hein, M. J., Anderson, J. L., Christianson, A., Little DPhil, M. P., Sigurdson, A. J., and Schubauer Berigan, M. K. (2018). Melanoma, thyroid cancer, and gynecologic cancers in a cohort of female flight attendants. *American Journal of Industrial Medicine*, 61(7):572–581. DOI: 10.1002/ajim.22854.

- Plainaki, C. (2007). *Physics of solar cosmic particles with data from neutron counters and satellites*. National and Kapodistrian University of Athens. PhD thesis, in Greek.
- Plainaki, C., Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., and Yanke, V. (2007). Modeling ground level enhancements: The event of 20 january 2005. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112(A04102). DOI: 10.1029/2006JA011926.
- Plainaki, C., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Andriopoulou, M., and Yanke, V. (2010). A new version of the nmbangle model applied to the gle60. *Solar Physics*, 264:339–254. DOI: 10.1007/s11207-010-9576-6.
- Plainaki, C., Paschalis, P., Grassi, D., Mavromichalaki, H., and Andriopoulou, M. (2016). Solar energetic particle interactions with the venusian atmosphere. *Annales Geophysicae*, 34:595–608. DOI: 10.5194/angeo-34-595-2016.
- Poje, M., Vukovic, B., Varga, M., Radolic, V., Miklavcic, I., Faj, D., and Planinic, J. (2008). Relation between galactic and solar cosmic radiation at aviation altitude. *Advances in Space Research*, 42:1913–1916. DOI: 10.1016/j.asr.2008.06.001.
- Pomerantz, M. A. (1971). *Cosmic Rays*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Potgieter, M. S. (2013). Solar modulation of cosmic rays. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(3). DOI: 10.12942/lrsp-2013-3.
- Pukkala, E., Aspholm, R., Auvinen, A., Eliasch, H., Gundestrup, M., Haldorsen, T., Hammar, N., Hrafnkelsson, J. and Kyyrönen, P., Linnarsjö, A., Rafnsson, V., Storm, H., and Tveten, U. (2002). Incidence of cancer among nordic airline pilots over five decades: occupational cohort study. *British Medical Journal*, 325(7364):567–569. DOI: 10.1136/bmj.325.7364.567.
- Pukkala, E., Auvinen, A., and Wahlberg, G. (1995). Incidence of cancer among finnish airline cabin attendants, 1967-92. *British Medical Journal*, 311:649–652. DOI: 10.1136/bmj.311.7006.649.
- Pulkkinen, T. (2007). Space weather: Terrestrial perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4(1). DOI: 10.12942/lrsp-2007-1.
- Rafnsson, V., Tulinius, H., Gunnlaugur, J. and Jonasson, J., and Hrafnkelsson, J. (2001a). Risk of breast cancer in female flight attendants: a population-based study (iceland). *Cancer Causes and Control*, 12(2):95–101. DOI: 10.1023/a:1008983416836.

- Rafnsson, V., Tulinius, H., Jónasson, J. G., and Hrafnkelsson, J. (2001b). Risk of breast cancer in female flight attendants: a population based study (iceland). *Cancer Causes & Control*, 12(2):95–101. DOI: 10.1023/a:1008983416836.
- Rask, J., Vercootere, W., Navarro, J. W., and Krause, A. (2008). The radiation challenge: Introduction and module 1: Radiation. *Radiation Educator Guide*. NASA’s George C. Marshall Space Flight Center, Huntsville.
- Reed, A. (2001). The history of radiation use in medicine. *Journal of Vascular Surgery*, 53(1):3S–5S. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.07.024.
- Regener, E. and Pfozter, G. (1935). Intensity of the cosmic ultra radiation in the stratosphere with the tube counter,. *Nature*, 134:325–325.
- Reitz, G. and Berger, T. (2006). The matroshka facility: dose determination during an evaluation. *Radiation Protection Dosimetry*, 120(1-4):442–445. DOI: 10.1093/rpd/nci558.
- Richter, D. (2012). Treatment planning for tumors with residual motion in scanned ion beamtherapy. *Dissertation*. Technische Universität Darmstadt.
- Röntgen, W. (1896). On a new kind of rays. *Science*, 3(59):227–231.
- Roesler, S., Heinrich, W., and Schraube, H. (2002). Monte carlo calculation of the radiation field at aircraft altitudes. *Radiation Protection Dosimetry*, 98(4):367–388. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006728.
- Romano, E., Ferrucci, L., Nicolai, F., Derme, V., and De Stefano, G. (1997). Increase of chromosomal aberrations induced by ionising radiation in peripheral blood lymphocytes of civil aviation pilots and crew members. *Mutation Research*, 377:89–93. DOI: 10.1016/s0027-5107(97)00064-x.
- Saez Vergara, J., Romero Gutiérrez, A., Rodriguez Jiménez, R., Dominguez-Mompell Románb, R., Ortiz García, P., and Merelo de Barberá, F. (2005). Monitoring of the cosmic radiation on iberia commercial flights: One year’s experience of in-flight measurements. *Radioactivity in the Environment*, 7:885–893. DOI: 10.1016/S1569-4860(04)07111-6.
- Samara, E., Smponias, A., Lytrosygounis, I., Lingri, D., Mavromichalaki, H., and Sgouropoulos, C. (2018). Unusual cosmic ray variations during the forrush decreases of june 2015. *Solar Physics*, 293(67):17. DOI: 10.1007/s11207-018-1290-9.

- Sanlorenzo, M., Wehner, M. R., Linos, E., Kornak, J., Kainz, W., Posch, C., Vujic, I., Johnston, K., Ghossein, D., Monico, G., McGrath, J. T., Osella-Abate, S., Quaglino, P., Cleaver, J. E., and Ortiz-Urda, S. (2015). The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew: a meta-analysis. *JAMA Dermatology*, 151(1):51–59. DOI: 10.1001/jamadermatol.2014.1077.
- Sanz Fernández de Córdoba, S. (2004). 100km altitude boundary for astronautics. *Fédération Aéronautique Internationale: Astronautic Records Commission (ICARE)*. Retrieved 13 March 2021.
- Sarkara, R., Chakrabarti, S. K., Sarathi Pala, P., Bhowmicka, D., and Bhattacharya, A. (2017). Measurement of secondary cosmic ray intensity at regener-pfotzer height using low cost weather balloons and its correlation with solar activity. *Advances in Space Research*, 60(5):991–998. DOI: 10.1016/j.asr.2017.05.014.
- Sato, T. (2015). Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of parma/expacs. *PLoS ONE*, 10(12). DOI: 10.1371/journal.pone.0144679.
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P., Ratliff, H., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., and Niita, K. (2018). Features of particle and heavy ion transport code system (phits) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(6):684–690. DOI: 10.1080/00223131.2017.1419890.
- Sato, T., Yasuda, H., Niita, K., Endo, A., and Sihver, L. (2008). Development of parma: Phits-based analytical radiation model in the atmosphere. *Radiation Research*, 170(2):244–259. DOI: 10.1667/RR1094.1.
- Sayed, N. S., T.S., E., El Dosoky, T. M., and Gomaa, M. (2010). Estimation of collective effective dose due to cosmic ray exposures to members of the public and to airline passenger. *Tenth Radiation Physics and Protection Conference*, (EG1100463):129–134. Cairo, Egypt.
- Schennetten, K., Meier, M., and Scheibinger, M. (2018). Measurement of uv radiation in commercial aircraft. *Journal of Radiological Protection*, 39(1):85–96. DOI: 10.1088/1361-6498/aaf2a7.
- Schlickeiser, R. and Lerche, I. (2001). Cosmic ray transport in anisotropic magnetohydrodynamic turbulence. *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference*, page 1904.

- Schraube, H., Leuthold, G., Heinrich, W., Roesler, S., Mares, V., and Schraube, G. (2002). Epcard – european program package for the calculation of aviation route doses, user’s manual. *GSF-Report 08/02, GSF-National Research Center, Neuherberg, Germany*. ISSN: 0721-1694.
- Schubauer Berigan, M. K. (2020). Hazards at 10 000 m: studies of aircrew and their importance in understanding cancer risks from cosmic radiation and circadian disruption. *Occupational and Environmental Medicine*, 77(5):283–284. DOI: 10.1136/oemed-2019-106165.
- Schwenn, R. (2002). Space weather: The solar perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3(2). DOI: 10.12942/lrsp-2006-2.
- Seiff, A., Schofield, J. T., Kliore, A. J., Taylor, F. W., Limaye, S. S., Revercomb, H. E., Sromovsky, L. A., Kerzhanovich, V. V., Moroz, V. I., and Marov, M. Y. (1985). Models of the structure of the atmosphere of venus from the surface to 100 kilometers altitude. *Advances in Space Research*, 5(11):3–58. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90197-8.
- Serway, R. and Jewett, J. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Physical Sciences: Mary Finch, Physics and Astronomy: Charlie Hartfor. 9th Edition.
- Shea, M. A. and Smart, D. F. (2000). Cosmic ray implications for human health. *Space Science Reviews*, 93:187–205. DOI: 10.1023/A:1026544528473.
- Sihver, L., Ploc, O., Puchalska, M., Ambrozova, I., Kubancak, J., Kyselova, D., and Shurshakov, V. (2015). Radiation environment at aviation altitudes and in space. *Radiation Protection Dosimetry*, pages 1–7. DOI: 10.1093/rpd/ncv330.
- Silva, R., Folgosa, F., Soares, P., S. Pereira, A., Garcia, R., Gestal-Otero, J., Tavares, P., and D. R. Gomes da Silva, M. (2013). Occupational cosmic radiation exposure in portuguese airline pilots: study of a possible correlation with oxidative biological markers. *Radiation and Environmental Biophysics*, 52:211–220. DOI: 10.1007/s00411-013-0460-2.
- Silverman, S. and Cliver, E. W. (2001). Low latitude auroras: the magnetic storm of 14-15 may 1921. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 63(5):523– 535. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00174-7.
- Simpson, J. A. (1958). Cosmic radiation neutron intensity monitor. *Annals of the Int. Geophysical Year*, 4:351.

- Simpson, J. A. (1983). Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 33:323–382. DOI: 10.1146/annurev-ns.33.120183.001543.
- Simpson, J. A. (2000). The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor. *Space Science Reviews*, 93:11–32. DOI: 10.1023/A:1026567706183.
- Singh, A. K., Siingh, D., and Singh, R. P. (2011). Impact of galactic cosmic rays on earth’s atmosphere and human health. *Atmospheric Environment*, 45:3806–3818. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.027.
- Skłodowska Curie, M. (1911). Radium and the new concepts in chemistry. *Nobel Lecture*.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (1994). Geomagnetic cutoffs: A review for space dosimetry calculations. *Advances in Space Research*, 14(10):10787–10796. DOI: 10.1016/0273-1177(94)90543-6.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (1997). World grid of calculated cosmic ray vertical cut off rigidities for epoch 1990.0. *Proceedings of the 25th International Cosmic Ray Conference*, 2:401–404. 30 July-6 August 1997, Durban, South Africa.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (2005). A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth orbiting spacecraft. *Advances in Space Research*, 36(10):2012–2020. DOI: 10.1016/j.asr.2004.09.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (2008a). World grid of calculated cosmic ray vertical cut off rigidities for epoch 1995.0. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 1:733–736. 3-11 July 2007, Mérida, Yucatán, Mexico.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (2008b). World grid of calculated cosmic ray vertical cut off rigidities for epoch 2000.0. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, 1:737–740. 3-11 July 2007, Mérida, Yucatán, Mexico.
- Smart, D. F. and Shea, M. A. (2019). Vertical geomagnetic cut off rigidities for epoch 2015. *36th International Cosmic Ray Conference*, (PoS(ICRC2019)1154):1–8. 24 July-1 August 2019, Madison, WI, U.S.A.
- Souvatoglou, G., Papaioannou, A., Mavromichalaki, H., Dimitroulakos, J., and Sarlanis, C. (2014). Optimizing the real-time ground level enhancement alert system based on neutron

- monitor measurements: introducing gle alert plus. *Space Weather*, 12:633–649. DOI: 10.1002/2014SW001102.
- Spurny, F. (2001). Radiation doses at high altitudes and during space flights. *Radiation Physics and Chemistry*, 61:301–307. DOI: 10.1016/S0969-806X(01)00253-5.
- Steller, J., Blue, R., Burns, R., Bayuse, T., Antonsen, E. L., Jain, V. and Blackwell, M. M., and Jennings, R. T. (2020). Gynecologic risk mitigation considerations for long-duration spaceflight. *Aerospace Medicine And Human Performance*, 91(7):543–564. DOI: 10.3357/AMHP.5538.2020.
- Stoker, P., Dorman, L. I., and Clem, J. M. (2000). Neutron monitor design improvements. *Space Science Reviews*, 93(1):361–380. DOI: 10.1023/A:1026560932107.
- Störmer, C. (1956). The polar aurora. *Oxford University Press*. DOI: 10.1002/qj.49708235123.
- Svalgaard, L., Cliver, E., and Kamide, Y. (2005). Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophysical Research Letters*, 32(1). DOI: 10.1029/2004GL021664.
- Testard, I. and Sabatier, L. (1999). Biological dosimetry for astronauts: a real challenge. *Mutation Research*, 430:315–326. DOI: 10.1016/S0027-5107(99)00144-x.
- Tezari, A. and Mavromichalaki, H. (2016). Diurnal anisotropy of cosmic rays during intensive solar activity for the period 2001-2014. *New Astronomy*, 46:78–84. DOI: 10.1016/j.newast.2015.12.008.
- Tezari, A., Mavromichalaki, H., Katsinis, D., Kanellakopoulos, A., Kolovi, S., Plainaki, C., and Andriopoulou, M. (2016). Latitudinal and longitudinal distribution of the cosmic ray diurnal anisotropy during 2001-2014. *Annales Geophysicae*, 34:1053–1068. DOI: 10.5194/angeo-34-1053-2016.
- Tezari, A., Paschalis, P., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2018a). Effects of space weather on earth's environment and biological systems. *II International Conference The Dramatic Changes On The Planet And The Hellenic Roots Of Ecological Ethics*. 17-20 June 2018, Patras, Greece.
- Tezari, A., Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., and Karaiskos, P. (2018b). Radiation exposure of aircrews due to space radiation. *HNPS Advances in Nuclear Physics*.

Proceedings of the 27th Hellenic Symposium Nuclear Physics and Applications, 26:427–436.
DOI: 10.12681/hnps.1822.

Tezari, A., Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2018c). Monte carlo radiation dose calculations in geospace. *26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference*. 6–10 July 2018, Altai, Russia.

Tezari, A., Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2019). Dyastima: Simulating air showers in the atmosphere of a planet. *Proceedings of the 70th International Astronautical Congress (IAC)*, pages 1–8. Washington D.C., United States, 21-25 October 2019.

Tezari, A., Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2020). Assessing radiation exposure inside the earth’s atmosphere. *Radiation Protection Dosimetry*, 190(4):427–436. DOI: 10.1093/rpd/ncaa112.

Tokumar, O., Haruki, K., Bacal, K., Katagiri, T., Yamamoto, T., and Sakurai, Y. (2006). Incidence of cancer among female flight attendants: a meta-analysis. *Journal of Travel Medicine*, 13(3):127–132. DOI: 10.1111/j.1708-8305.2006.00029.x.

Tomova, D., Velinov, P. I. Y., and Yordan Tassev, Y. (2017). Comparison between extreme solar activity during periods march 15-17, 2015 and september 4-10, 2017 at different phases of solar cycle 24. *Aerospace Research in Bulgaria*, 29:10–29.

Tsitomeneas, S. (2011). *Environmental Physics: Radiation, Effects, Protection Measures*. Hellenic Physical Society. in Greek.

Tylka, A. J., Adams Jr, J. H., Boberg, P. R., Brownstein, B., Dietrich, W. F., Flueckiger, E. O., Petersen, E. L., Shea, M. A., Smart, D. F., and Smith, E. C. (1997). Creme96: A revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(6):2150–2160.

Tylka, A. J., Adams Jr, J. H., Boberg, P. R., Brownstein, B., Dietrich, W. F., Flueckiger, E. O., Petersen, E. L., Shea, M. A., Smart, D. F., and Smith, E. C. (2010). Monte carlo simulation of single event effects. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(4):1726–1746.

- UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation (report to general assembly, annex a and b). *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report*. New York, NY (United States).
- Usoskin, I., Desorgher, L., Velinov, P., Storini, M., Flückiger, E., Bütikofer, R., and Kovaltsov, G. (2008). Ionization of the earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays. *Acta Geophysica*, 57(1):88–101. DOI: 10.2478/s11600-008-0019-9.
- VanAllen, J. A. (1968). *Physics of the Magnetosphere*. Springer-Verlag, New York. Chapter Particle Description of the Magnetosphere.
- Waters, M., Bloom, T. F., and Grajewski, B. (2000). The niosh/faa working women's health study: Evaluation of the cosmic radiation exposures of flight attendants. *Health Physics*, 79(5):553–559. DOI: 10.1097/00004032-200011000-00012.
- Watson, A. A. (2014). High-energy cosmic rays and the greisen–zatspepin–kuz'min effect. *Reports on Progress in Physics*, 77(3). DOI: 10.1103/PhysRevLett.16.748.
- Wilkison, B. D. and Wong, E. B. (2017). Skin cancer in military pilots: a special population with special risk factors. *Cutis*, 100(4):218–220. PMID: 29136055.
- Willers, H., Dahm-Daphi, J., and Powell, S. N. (2004). Repair of radiation damage to dna. *British Journal of Cancer*, 90(18):1297 – 1301. DOI: 10.1038/sj.bjc.6601729.
- Wilson, J. W. (2000). Overview of radiation environments and human exposures. *Health Physics*, 79(5):470–494. DOI: 10.1097/00004032-200011000-00005.
- Wissmann, F., Dangendorf, V., and Schrewe, U. (2005). Radiation exposure at ground level by secondary cosmic radiation. *Radiation Measurements*, 39:95–104. DOI: 10.1016/j.radmeas.2004.03.025.
- Wu, C. C., Liou, K., Lepping, R. P., Hutting, L., Plunkett, S., Howard, R. A., and Socker, D. (2016). The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: The st. patrick's day event (17 march 2015). *Earth, Planets and Space*, 68(151). DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y.
- Yasuda, H. (2008a). Jiscard ex personal edition user's manual (ver.1.0). http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/ex/manual_e.pdf.

- Yasuda, H. (2008b). A nirs's product japanese internet system for the calculation of aviation route doses jiscard the program which informs us of cosmic radiation doses in an aircraft. *Hoshasen Kagaku*, 51(11):4–12.
- Yasuda, H., Sato, T., Yonehara, H., Kosako, T., Fujitaka, K., and Sasaki, Y. (2011). Management of cosmic radiation exposure for aircraft crew in japan. *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1-3):123–125. DOI: 10.1093/rpd/ncr133.
- Yong, C., Rahman, T., and Chew, K. (2015a). Wireless industry emission: Electromagnetic field monitoring and analysis. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(20):9800–9807. ISSN: 1819-66.
- Yong, L. C., Pinkerton, L. Y., Yiin, J. H., Anderson, J. L., and James A. Deddens, J. A. (2014). Mortality among a cohort of u.s. commercial airline cockpit crew. *American Journal Of Industrial Medicine*, 57:906–914. DOI: 110.1002/ajim.2231.
- Yong, L. C., Sigurdson, A. J., Ward, E. M., Waters, M. A., Whelan, E. A., Petersen, M. R., Bhatti, P., Ramsey, M. J., Ron, E., and Tucker, J. D. (2015b). Increased frequency of chromosome translocations in airline pilots with long term flying experience. *Occupational and Environmental Medicine*, 66(1):56–62. DOI: 10.1136/oem.2008.038901.
- Youngquist, R. C., Nurge, M. A., Starr, S. O., and Koontz, S. L. (2014). Thick galactic cosmic radiation shielding using atmospheric data. *Acta Astronautica*, 94:132–138. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.08.010.
- Zatsepin, G. T. and Kuzmin, V. A. (1966). Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 4:78–80. DOI: 10.1103/PhysRevLett.16.748.
- Zeeb, H., Blettner, M., Langner, I., Hammer, G. P., Ballard, T., Santaquilani, M., Gundestrup, M., Storm, H., Haldorsen, T., Tveten, U., Hammar, N., Linnarsjö, A., Velonakis, E., Tzonou, A., Auvinen, A., Pukkala, E., Rafnsson, V., and Hrafnkelsson, J. (2003). Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in europe: A collaborative cohort study in eight countries. *Radiation Research*, 158(1):35–46. DOI: 10.1093/aje/kwg107.
- Zeeb, H., Hammer, G. P., and Blettner, M. (2012). Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*, 32(1):N15–9. DOI: 10.1088/0952-4746/32/1/N15.

Zeitlin, C., Cleghorn, T., Cucinotta, F., Saganti, P., Andersen, V., Lee, K., Pinsky, L., Atwell, W., Turner, R., and Badhwar, G. (2004). Overview of the martian radiation environment experiment. *Advances in Space Research*, 33(12):2204–2210. DOI: 10.1016/s0273-1177(03)00514-3.

Ziegler, J. F. (1998). Terrestrial cosmic ray intensities. *IBM Journal of Research and Development*, 42:117 – 140. DOI: 10.1147/rd.421.0117.

Παράρτημα

Α΄ Προσομοιώσεις με το DYASTIMA-R

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται οι τιμές του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό DYASTIMA-R, για όλο το εύρος κατωφλίων μαγνητικής δυσκαμψίας (0 GV έως 17 GV), για τρία συνήθη υψόμετρα ατμοσφαιρικών πτήσεων (FL310, FL350, FL390), για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996 - 2019).

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu\text{Sv/h}$)									
Year	$R_c = 0\text{ GV}$			$R_c = 1\text{ GV}$			$R_c = 2\text{ GV}$		
	FL310	FL350	FL390	FL310	FL350	FL390	FL310	FL350	FL390
1996	4.35	5.27	7.06	3.34	5.08	6.45	3.35	4.62	5.69
1997	3.82	5.29	6.65	3.81	5.28	6.57	3.52	4.85	5.76
1998	3.67	5.44	6.30	4.07	5.08	6.77	3.20	4.84	5.69
1999	3.50	4.60	6.45	3.69	4.69	6.26	3.06	4.35	5.25
2000	3.40	4.36	5.63	3.27	4.27	5.62	3.04	4.04	5.23
2001	2.82	3.84	5.50	2.97	4.17	4.84	2.87	3.83	4.74
2002	3.09	4.36	5.10	2.70	4.14	5.45	2.90	4.00	4.82
2003	3.31	4.47	5.77	2.99	4.27	5.17	3.25	4.24	5.35
2004	3.74	4.75	6.33	3.28	4.77	6.01	3.26	4.29	5.35
2005	3.46	5.06	6.61	3.44	4.94	6.45	3.28	4.44	6.02
2006	3.48	5.06	6.79	3.98	5.06	6.28	3.64	4.47	5.88
2007	3.97	5.08	6.79	3.68	5.12	6.74	3.70	4.79	5.87
2008	3.39	5.27	6.63	3.73	5.36	6.76	3.28	4.97	5.62
2009	3.91	4.97	6.83	3.66	4.87	6.50	3.41	4.78	6.17
2010	3.84	5.22	6.56	3.78	4.85	6.34	3.71	4.48	6.11
2011	3.74	4.93	6.16	4.00	4.96	6.03	3.60	4.62	5.70
2012	3.45	5.16	6.29	3.74	4.99	6.13	3.41	4.46	5.51
2013	3.59	4.46	5.66	3.29	4.43	5.55	3.02	4.06	5.02
2014	2.88	4.11	5.49	3.23	3.96	5.04	2.78	4.05	4.75
2015	3.65	4.31	5.21	3.07	3.90	5.05	2.72	3.80	4.75
2016	3.12	4.50	5.55	2.89	4.06	5.19	2.89	3.89	4.66
2017	3.72	5.17	5.64	3.29	4.74	6.04	3.34	4.33	5.32
2018	3.39	4.86	6.05	3.52	5.25	6.02	3.35	4.53	5.34
2019	4.01	5.23	6.98	3.71	5.43	6.51	3.39	4.50	5.72

Πίνακας 6.1: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δυσκαμψίας 0 GV , 1 GV και 2 GV .

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)									
Year	<i>Rc = 3 GV</i>			<i>Rc = 4 GV</i>			<i>Rc = 5 GV</i>		
	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>
1996	3.05	4.02	5.29	2.55	3.38	4.17	2.36	3.05	3.56
1997	3.28	4.00	5.12	2.60	3.28	4.19	2.36	3.01	3.88
1998	2.96	4.07	5.03	2.51	3.48	4.11	2.33	3.13	3.78
1999	2.87	3.76	4.71	2.49	3.32	3.83	2.35	2.73	3.46
2000	2.94	3.48	4.47	2.44	2.97	3.88	2.20	2.74	3.47
2001	2.79	3.63	4.45	2.38	3.10	3.88	2.18	2.90	3.39
2002	2.30	3.50	4.59	2.44	3.27	4.01	2.12	2.83	3.43
2003	2.73	3.73	4.44	2.52	3.41	4.23	2.22	2.87	3.60
2004	2.88	4.13	4.93	2.65	3.31	4.33	2.43	3.15	3.80
2005	2.82	4.15	4.81	2.61	3.27	4.19	2.32	2.98	3.65
2006	3.38	4.08	5.22	2.67	3.38	4.28	2.23	3.01	3.62
2007	3.05	4.11	4.95	2.61	3.40	4.19	2.34	3.16	3.91
2008	3.21	4.11	5.52	2.48	3.45	4.15	2.33	3.16	3.74
2009	3.22	4.08	5.38	2.59	3.42	4.32	2.37	3.04	3.79
2010	3.20	4.11	5.18	2.69	3.81	4.61	2.26	2.98	3.64
2011	3.24	4.25	4.82	2.60	3.59	4.32	2.30	2.98	3.67
2012	3.30	4.38	5.13	2.42	3.33	4.03	2.31	2.76	3.57
2013	2.73	3.74	4.32	2.52	3.38	4.06	2.12	2.71	3.51
2014	2.45	3.40	4.08	2.32	3.04	3.76	2.00	2.62	3.18
2015	2.68	3.51	4.60	2.34	2.94	3.61	2.08	2.72	3.31
2016	2.65	3.47	4.56	2.31	3.16	3.97	2.02	2.78	3.41
2017	2.86	3.74	4.81	2.51	3.34	4.02	2.17	2.89	3.53
2018	2.93	3.87	4.89	2.51	3.16	4.06	2.20	2.80	3.51
2019	3.00	4.07	4.98	2.59	3.49	4.17	2.28	2.94	3.69

Πίνακας 6.2: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δukaμψίας 3 GV, 4 GV και 5 GV.

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)									
Year	<i>Rc = 6 GV</i>			<i>Rc = 7 GV</i>			<i>Rc = 8 GV</i>		
	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>
1996	2.01	2.64	3.15	1.88	2.42	2.90	1.66	2.14	2.59
1997	2.13	2.77	3.19	1.82	2.46	2.94	1.73	2.16	2.64
1998	2.16	2.68	3.31	1.90	2.42	2.91	1.79	2.15	2.63
1999	1.93	2.53	2.99	1.88	2.35	2.71	1.69	2.11	2.58
2000	1.95	2.47	3.05	1.72	2.36	2.70	1.55	1.95	2.39
2001	1.87	2.44	2.97	1.61	2.21	2.51	1.53	1.97	2.43
2002	1.91	2.42	3.15	1.73	2.26	2.66	1.49	2.03	2.35
2003	1.95	2.61	3.28	1.73	2.24	2.78	1.61	2.04	2.49
2004	2.15	2.85	3.35	1.72	2.17	2.63	1.58	2.15	2.55
2005	2.06	2.66	3.44	1.82	2.45	2.91	1.70	2.07	2.61
2006	2.12	2.75	3.30	1.94	2.41	2.91	1.71	2.23	2.70
2007	2.18	2.77	3.38	1.79	2.50	2.96	1.71	2.18	2.55
2008	2.10	2.78	3.33	1.83	2.56	2.97	1.69	2.28	2.48
2009	2.22	2.85	3.50	1.90	2.37	3.03	1.77	2.25	2.75
2010	2.02	2.70	3.24	1.86	2.39	2.85	1.69	2.08	2.46
2011	2.04	2.59	3.30	1.85	2.36	2.94	1.66	2.14	2.59
2012	1.96	2.53	3.18	1.75	2.30	2.69	1.64	2.02	2.53
2013	1.95	2.37	2.96	1.75	2.17	2.64	1.63	2.03	2.41
2014	1.85	2.44	2.84	1.70	2.16	2.56	1.53	1.94	2.34
2015	1.90	2.54	2.92	1.61	2.16	2.56	1.43	1.90	2.31
2016	1.81	2.29	2.84	1.66	2.18	2.64	1.49	1.92	2.32
2017	1.96	2.64	3.13	1.72	2.22	2.67	1.59	2.03	2.54
2018	2.15	2.75	3.25	1.82	2.16	2.81	1.58	2.05	2.43
2019	2.07	2.67	3.30	1.81	2.26	2.92	1.61	2.13	2.53

Πίνακας 6.3: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δukaμψίας 6 GV, 7 GV και 8 GV.

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)									
Year	<i>Rc = 9 GV</i>			<i>Rc = 10 GV</i>			<i>Rc = 11 GV</i>		
	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>
1996	1.50	1.93	2.37	1.33	1.75	2.14	1.25	1.64	1.90
1997	1.50	1.94	2.37	1.37	1.71	2.12	1.27	1.60	1.91
1998	1.49	1.92	2.32	1.30	1.66	2.08	1.25	1.60	1.93
1999	1.52	1.85	2.22	1.28	1.75	1.94	1.19	1.56	1.82
2000	1.38	1.82	2.19	1.29	1.70	2.07	1.20	1.51	1.85
2001	1.38	1.82	2.10	1.33	1.68	2.03	1.21	1.51	1.81
2002	1.44	1.79	2.15	1.32	1.63	1.97	1.21	1.48	1.79
2003	1.43	1.83	2.16	1.30	1.68	2.06	1.21	1.56	1.82
2004	1.45	1.93	2.28	1.34	1.71	2.05	1.22	1.61	1.86
2005	1.52	1.90	2.28	1.37	1.82	2.16	1.28	1.66	1.91
2006	1.51	1.92	2.33	1.45	1.80	2.06	1.26	1.57	1.95
2007	1.58	1.92	2.34	1.42	1.85	2.19	1.30	1.61	1.95
2008	1.45	2.00	2.38	1.45	1.81	2.18	1.25	1.59	1.93
2009	1.51	1.95	2.34	1.39	1.76	2.19	1.20	1.66	1.99
2010	1.33	1.76	2.17	1.34	1.58	1.93	1.20	1.52	1.78
2011	1.45	1.77	2.23	1.26	1.60	1.96	1.18	1.51	1.81
2012	1.30	1.75	2.13	1.30	1.62	1.95	1.19	1.47	1.77
2013	1.33	1.73	2.06	1.20	1.53	1.90	1.16	1.44	1.77
2014	1.24	1.66	1.99	1.21	1.56	1.80	1.17	1.43	1.74
2015	1.27	1.68	1.99	1.23	1.51	1.82	1.11	1.40	1.69
2016	1.32	1.61	2.05	1.18	1.52	1.81	1.18	1.40	1.72
2017	1.34	1.69	2.06	1.22	1.58	1.91	1.16	1.45	1.73
2018	1.43	1.75	2.05	1.25	1.62	1.93	1.19	1.46	1.85
2019	1.37	1.78	2.13	1.25	1.57	1.88	1.18	1.53	1.76

Πίνακας 6.4: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δukaμψίας 9 GV, 10 GV και 11 GV.

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)									
Year	<i>Rc = 12 GV</i>			<i>Rc = 13 GV</i>			<i>Rc = 14 GV</i>		
	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>
1996	1.17	1.51	1.75	1.08	1.32	1.58	0.97	1.22	1.49
1997	1.17	1.54	1.75	1.08	1.33	1.59	1.02	1.32	1.56
1998	1.18	1.49	1.70	1.07	1.36	1.61	1.00	1.27	1.54
1999	1.15	1.44	1.76	1.03	1.36	1.62	0.97	1.23	1.45
2000	1.13	1.38	1.68	1.05	1.33	1.59	0.98	1.23	1.44
2001	1.12	1.44	1.67	1.04	1.30	1.57	0.97	1.19	1.45
2002	1.13	1.38	1.68	1.04	1.28	1.57	0.98	1.23	1.43
2003	1.13	1.44	1.71	1.04	1.31	1.56	0.95	1.23	1.48
2004	1.17	1.45	1.73	1.06	1.33	1.57	0.99	1.24	1.49
2005	1.22	1.43	1.76	1.12	1.28	1.61	1.01	1.25	1.46
2006	1.07	1.47	1.76	1.02	1.34	1.66	0.99	1.31	1.54
2007	1.18	1.52	1.82	1.09	1.36	1.64	1.01	1.24	1.47
2008	1.19	1.51	1.70	1.12	1.37	1.65	0.98	1.29	1.48
2009	1.21	1.56	1.77	1.09	1.46	1.64	1.04	1.22	1.52
2010	1.10	1.47	1.64	1.04	1.29	1.51	0.96	1.21	1.44
2011	1.09	1.41	1.70	1.03	1.33	1.63	0.97	1.27	1.51
2012	1.06	1.37	1.64	1.00	1.24	1.52	0.95	1.22	1.39
2013	1.01	1.32	1.57	1.05	1.34	1.49	0.94	1.25	1.39
2014	1.07	1.31	1.64	0.99	1.21	1.55	0.90	1.16	1.40
2015	1.08	1.31	1.59	0.99	1.24	1.45	0.99	1.15	1.34
2016	1.05	1.33	1.55	1.02	1.32	1.51	0.99	1.15	1.44
2017	1.09	1.36	1.68	1.01	1.32	1.55	0.90	1.14	1.39
2018	1.07	1.34	1.67	1.00	1.37	1.59	0.92	1.20	1.40
2019	1.09	1.41	1.64	1.04	1.32	1.60	0.98	1.24	1.45

Πίνακας 6.5: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δukaμψίας 12 GV, 13 GV και 14 GV.

DYASTIMA-R $dH^*(10)/dt$ ($\mu Sv/h$)									
Year	<i>Rc = 15 GV</i>			<i>Rc = 16 GV</i>			<i>Rc = 17 GV</i>		
	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>	<i>FL310</i>	<i>FL350</i>	<i>FL390</i>
1996	0.92	1.19	1.41	0.91	1.14	1.33	0.84	1.04	1.22
1997	0.96	1.16	1.40	0.89	1.13	1.31	0.83	1.06	1.27
1998	0.91	1.21	1.40	0.89	1.08	1.29	0.87	1.06	1.23
1999	0.92	1.13	1.32	0.86	1.10	1.28	0.83	1.03	1.22
2000	0.92	1.15	1.35	0.85	1.08	1.24	0.82	1.01	1.21
2001	0.90	1.10	1.36	0.83	1.06	1.25	0.81	1.02	1.18
2002	0.78	1.02	1.18	0.82	1.07	1.24	0.80	1.00	1.22
2003	0.90	1.13	1.31	0.87	1.12	1.27	0.81	1.02	1.23
2004	0.91	1.18	1.37	0.87	1.11	1.28	0.83	1.04	1.23
2005	0.89	1.15	1.38	0.88	1.08	1.29	0.84	1.05	1.24
2006	0.87	1.11	1.28	0.84	1.07	1.26	0.82	1.03	1.25
2007	0.97	1.21	1.39	0.89	1.05	1.31	0.83	1.09	1.26
2008	0.91	1.24	1.34	0.92	1.10	1.30	0.84	1.03	1.24
2009	0.95	1.16	1.36	0.90	1.13	1.30	0.82	1.07	1.24
2010	0.94	1.15	1.41	0.88	1.12	1.34	0.84	1.08	1.23
2011	0.97	1.19	1.46	0.87	1.11	1.34	0.87	1.11	1.24
2012	0.90	1.17	1.34	0.86	1.15	1.26	0.79	1.02	1.23
2013	0.94	1.17	1.36	0.87	1.04	1.29	0.78	1.01	1.19
2014	0.88	1.17	1.31	0.85	1.08	1.21	0.83	1.01	1.18
2015	0.88	1.13	1.33	0.91	1.03	1.31	0.79	0.96	1.16
2016	0.91	1.12	1.32	0.89	1.09	1.24	0.85	1.00	1.23
2017	0.92	1.19	1.37	0.88	1.12	1.31	0.83	1.01	1.22
2018	0.95	1.15	1.37	0.85	1.12	1.37	0.79	1.08	1.23
2019	0.92	1.16	1.41	0.88	1.14	1.30	0.84	1.04	1.26

Πίνακας 6.6: Ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος, όπως υπολογίστηκε με το DYASTIMA-R, για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2019), για τα τρία συνήθη ατμοσφαιρικά υψόμετρα πτήσης (FL310, FL350, FL390) για κατώφλια μαγνητικής δukaμψίας 15 GV, 16 GV και 17 GV.

Β' Πολυωνυμική Προσαρμογή

Στο σημείο αυτό, ορίζονται ανά τιμή κατωφλίου μαγνητικής δυσκαμψίας και ανά ύψος οι τιμές των συντελεστών της πολυωνυμικής προσαρμογής τετάρτου βαθμού που έχει πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 5.1.3, για τη μελέτη του ρυθμού ισοδύναμης δόσης περιβάλλοντος συναρτήσει της ηλιακής δραστηριότητας.

$$R_c = 0 \text{ GV} \quad (6.1)$$

$$FL310 : a_1 = 1.512 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.215, a_3 = 3659, a_4 = -4.898 \cdot 10^6, a_5 = 2.459 \cdot 10^9$$

$$FL350 : a_1 = 1.881 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.215, a_3 = 4550, a_4 = -6.091 \cdot 10^6, a_5 = 3.057 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 3.161 \cdot 10^{-4}, a_2 = -2.538, a_3 = 7645, a_4 = -1.023 \cdot 10^7, a_5 = 5.135 \cdot 10^9$$

$$R_c = 1 \text{ GV} \quad (6.2)$$

$$FL310 : a_1 = 1.128 \cdot 10^{-4}, a_2 = -0.9062, a_3 = 2730, a_4 = -3.654 \cdot 10^6, a_5 = 1.835 \cdot 10^9$$

$$FL350 : a_1 = 2.316 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.859, a_3 = 5599, a_4 = -7.493 \cdot 10^6, a_5 = 3.761 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 2.671 \cdot 10^{-4}, a_2 = -2.145, a_3 = 6460, a_4 = -87.647 \cdot 10^7, a_5 = 4.34 \cdot 10^9$$

$$R_c = 2 \text{ GV} \quad (6.3)$$

$$FL310 : a_1 = 1.335 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.072, a_3 = 3229, a_4 = -4.321 \cdot 10^6, a_5 = 2.16459 \cdot 10^9$$

$$FL350 : a_1 = 1.504 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.208, a_3 = 3639, a_4 = -4.87 \cdot 10^6, a_{51} = 2.445 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 2.227 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.789, a_3 = 5387, a_4 = -7.209 \cdot 10^7, a_{51} = 3.618 \cdot 10^9$$

$$R_c = 3 \text{ GV} \quad (6.4)$$

$$FL310 : a_1 = 1.016 \cdot 10^{-4}, a_2 = -0.8165, a_3 = 2459, a_4 = -3.292 \cdot 10^6, a_5 = 1.653 \cdot 10^9$$

$$FL350 : a_1 = 1.278 \cdot 10^{-4}, a_2 = -1.026, a_3 = 3090, a_4 = -4.136 \cdot 10^6, a_5 = 3.057 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 3.161 \cdot 10^{-4}, a_2 = -2.538, a_3 = 7645, a_4 = -1.023 \cdot 10^7, a_{51} = 2.076 \cdot 10^9$$

$$R_c = 4 \text{ GV} \tag{6.5}$$

$$FL310 : a_1 = 4.871 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3911, a_3 = 1178, a_4 = -1.576 \cdot 10^6, a_5 = 7.907 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 7.137 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.5732, a_3 = 1726, a_4 = -2.31 \cdot 10^6, a_5 = 1.16 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 9.399 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.7548, a_3 = 2273, a_4 = -3.042 \cdot 10^7, a_5 = 1.527 \cdot 10^9$$

$$R_c = 5 \text{ GV} \tag{6.6}$$

$$FL310 : a_1 = 4.378 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3516, a_3 = 1059, a_4 = -1.417 \cdot 10^6, a_5 = 7.109 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 6.888 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.553, a_3 = 1665, a_4 = -2.228 \cdot 10^6, a_5 = 1.118 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 7.358 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.5908, a_3 = 1779, a_4 = -2.38 \cdot 10^6, a_5 = 1.195 \cdot 10^9$$

$$R_c = 6 \text{ GV} \tag{6.7}$$

$$FL310 : a_1 = 4.858 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.39, a_3 = 1174, a_4 = -1.572 \cdot 10^6, a_5 = 7.886 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 6.785 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.5448, a_3 = 1640, a_4 = -2.195 \cdot 10^6, a_5 = 1.101 \cdot 10^9$$

$$FL390 : a_1 = 8.412 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.6753, a_3 = 2033, a_4 = -2.72 \cdot 10^7, a_5 = 1.365 \cdot 10^9$$

$$R_c = 7 \text{ GV} \tag{6.8}$$

$$FL310 : a_1 = 3.533 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2837, a_3 = 854.5, a_4 = -1.144 \cdot 10^6, a_5 = 5.741 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 4.103 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3296, a_3 = 992.7, a_4 = -1.329 \cdot 10^6, a_5 = 6.67 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 7.638 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.6134, a_3 = 1847, a_4 = -2.472 \cdot 10^7, a_5 = 1.241 \cdot 10^9$$

$$R_c = 8 \text{ GV} \tag{6.9}$$

$$FL310 : a_1 = 3.098 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2489, a_3 = 749.6, a_4 = -1.003 \cdot 10^6, a_5 = 5.037 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 4.905 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3939, a_3 = 1186, a_4 = -1.587 \cdot 10^6, a_5 = 7.966 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 4.318 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3468, a_3 = 1044, a_4 = -1.398 \cdot 10^6, a_5 = 7.015 \cdot 10^8$$

$$R_c = 9 \text{ GV} \tag{6.10}$$

$$FL310 : a_1 = 2.822 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2265, a_3 = 681.9, a_4 = -9.123 \cdot 10^5, a_5 = 4.577 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 3.801 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3052, a_3 = 918.9, a_4 = -1.23 \cdot 10^6, a_5 = 6.17 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 4.87 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3911, a_3 = 1178, a_4 = -1.576 \cdot 10^6, a_5 = 7.913 \cdot 10^8$$

$$R_c = 10 \text{ GV} \tag{6.11}$$

$$FL310 : a_1 = 2.766 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.221, a_3 = 668.6, a_4 = -894.6 \cdot 10^5, a_5 = 4.489 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 2.974 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2387, a_3 = 718.7, a_4 = -9.615 \cdot 10^5, a_5 = 4.824 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 4.057 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.3258, a_3 = 980.9, a_4 = -1.313 \cdot 10^6, a_5 = 6.587 \cdot 10^8$$

$$R_c = 11 \text{ GV} \tag{6.12}$$

$$FL310 : a_1 = 1.41 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1132, a_3 = 340.8, a_4 = -4.561 \cdot 10^5, a_5 = 2.288 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 3.185 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2557, a_3 = 770, a_4 = -1.03 \cdot 10^6, a_5 = 5.17 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 2.889 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.232, a_3 = 698.6, a_4 = -9.348 \cdot 10^5, a_5 = 4.691 \cdot 10^8$$

$$R_c = 12 \text{ GV} \tag{6.13}$$

$$FL310 : a_1 = 1.383 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.111, a_3 = 334.2, a_4 = -4.471 \cdot 10^5, a_5 = 2.243 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 2.897 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.2327, a_3 = 700.6, a_4 = -9.377 \cdot 10^5, a_5 = 4.706 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 2.094 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1681, a_3 = 506.1, a_4 = -6.772 \cdot 10^5, a_5 = 3.398 \cdot 10^8$$

$$R_c = 13 \text{ GV} \tag{6.14}$$

$$FL310 : a_1 = 1.255 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1007, a_3 = 303.3, a_4 = -4.059 \cdot 10^5, a_5 = 2.037 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 1.135 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.0911, a_3 = 274.3, a_4 = -3.669 \cdot 10^5, a_5 = 1.841 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 1.7 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1365, a_3 = 410.7, a_4 = -5.494 \cdot 10^5, a_5 = 2.756 \cdot 10^8$$

$$R_c = 14 \text{ GV} \tag{6.15}$$

$$FL310 : a_1 = 6.86 \cdot 10^{-6}, a_2 = -0.05508, a_3 = 165.8, a_4 = -2.219 \cdot 10^5, a_5 = 1.113 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 1.435 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1152, a_3 = 346.9, a_4 = -4.643 \cdot 10^5, a_5 = 2.33 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 1.659 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1332, a_3 = 401.2, a_4 = -5.369 \cdot 10^5, a_5 = 2.695 \cdot 10^8$$

$$R_c = 15 \text{ GV} \tag{6.16}$$

$$FL310 : a_1 = 6.904 \cdot 10^{-6}, a_2 = -0.05548, a_3 = 167.2, a_4 = -2.239 \cdot 10^5, a_5 = 1.125 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 1.081 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.08686, a_3 = 261.7, a_4 = -3.506 \cdot 10^5, a_5 = 1.761 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 1.401 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.1125, a_3 = 339, a_4 = -4.54 \cdot 10^5, a_5 = 2.28 \cdot 10^8$$

$$R_c = 16 \text{ GV} \tag{6.17}$$

$$FL310 : a_1 = 6.181 \cdot 10^{-6}, a_2 = -0.04968, a_3 = 149.7, a_4 = -2.005 \cdot 10^5, a_5 = 1.007 \cdot 10^8$$

$$FL350 : a_1 = 9.436 \cdot 10^{-6}, a_2 = -0.07578, a_3 = 228.2, a_4 = -3.055 \cdot 10^5, a_5 = 1.533 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 1.234 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.09908, a_3 = 298.4, a_4 = -3.995 \cdot 10^5, a_5 = 2.005 \cdot 10^8$$

$$R_c = 17 \text{ GV} \tag{6.18}$$

$$FL310 : a_1 = 4.281 \cdot 10^{-6}, a_2 = -0.0349, a_3 = 103.6, a_4 = -1.387 \cdot 10^5, a_5 = 6.962 \cdot 10^7$$

$$FL350 : a_1 = 1.126 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.09042, a_3 = 272.3, a_4 = -3.644 \cdot 10^5, a_5 = 1.829 \cdot 10^8$$

$$FL390 : a_1 = 1.094 \cdot 10^{-5}, a_2 = -0.0878, a_3 = 264.3, a_4 = -3.536 \cdot 10^5, a_5 = 1.774 \cdot 10^8$$

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις

1. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Stassinakis, A., H., Karaiskos, P., Alexandridis, D., Kanelakopoulos, A., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2021). Radiation exposure in the lower atmosphere during different periods of solar activity. (*Under submission*).
2. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2021). Cosmic Radiation Exposure of Aviators for Solar Cycles 23 and 24. *NMDB@Home: Cosmic ray studies with neutron detectors*, 1(4):109-113. DOI: 10.38072/2748-3150/p13.
3. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2020). *Radiation Protection Dosimetry*, 190(4):427-436. DOI: 10.1093/rpd/ncaa112.
4. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2019). Dyastima: Simulating air showers in the atmosphere of a planet. *Proceedings of the 70th International Astronautical Congress (IAC)*, pages 1-8. Washington D.C., USA.
5. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., and Karaiskos, P. (2018). Radiation exposure of aircrews due to space radiation. *HNPS Advances in Nuclear Physics. Proceedings of the 27th Hellenic Symposium Nuclear Physics and Applications*, 26:427-436. DOI: 10.12681/hnps.1822.
6. Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Paschalis, P., Paouris, E., **Tezari, A.**, Sgouropoulos, C., Crosby, N. and Dierckxsens, M. (2018). Real-time detection of the ground level enhancement on 10 September 2017 by A.Ne.Mo.S.: System report, *Space Weather*, 16(11), 1797-1805. DOI: 10.1029/2018SW001992.

Εγχειρίδια Χρήσης

1. Paschalis, P. and **Tezari, A.** (2019). *Dyastima software user manual*. Athens Cosmic Ray Group, National and Kapodistrian University of Athens.

Ομιλίες σε Διεθνή Συνέδρια και Ημερίδες

1. **Tezari, A.** (2019). Does Space Weather affect our health?, SWE-MED Workshop under SSA – P3-SWE-XXIII User Requirements for the Mediterranean Region. 23 Sept 2019, Athens, Greece.
2. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2019). Dyastima: Simulating air showers in the atmosphere of a planet. 70th International Astronautical Congress (IAC), pages 1-8. Washington D.C., United States, 21-25 October 2019.
3. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, M. and Karaiskos, P. (2019). A simulation tool for radiation dose calculations in the Earth’s atmosphere. NMDB Meeting 2019. 5-7 Mar 2019, Athens, Greece.
4. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2018). Effects of space weather on earth’s environment and biological systems. II International Conference The Dramatic Changes On The Planet And The Hellenic Roots Of Ecological Ethics. 17-20 June 2018, Patras, Greece.
5. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2017). A tool for space radiation exposure calculations for aviators. 14th European Space Weather Week. 27 November-1 December 2017, Ostend, Belgium.

Παρουσιάσεις σε Διεθνή Συνέδρια και Ημερίδες

1. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Stassinakis, A., H., Karaiskos, P., Alexandridis, D., Kanellakopoulos, A., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2021) Radiation assessment in geospace due to cosmic rays. 17th European Space Weather Week. 25-29 Oct 2021, Glasgow, UK.
2. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2020). Cosmic Radiation Exposure of Aviators for Solar Cycles 23 and 24. NMDB@Home: Virtual symposium on cosmic ray studies with neutron detectors. 13-17 Jul 2020 (online).
3. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Mavromichalaki, H., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2019) Validation of DYASTIMA and Integration to ESA SSA R-ESC. 16th European Space Weather Week. 18-22 Nov 2019, Liege, Belgium.

4. Cid, C., Guerrero, A., Mavromichalaki, H., Messerotti, M., Rouillard, A. P., Barata, T., Ariza, C., Fernandes, J., Grande, I., Hernandez, M., Negrin, S., Paouris, E., Pinto, R., Saiz, E. and **Tezari, A.** (2019). Identifying the Customer Requirements of the Mediterranean Space Weather Users. 16th European Space Weather Week. 18-22 Nov 2019, Liege, Belgium.
5. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2018). Integration of DYASTIMA to European Space Agency, 15th European Space Weather Week, 5-9 Nov 2018, Leuven, Belgium.
6. Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Paschalis, P., **Tezari, A.**, Sgouropoulos, C., Crosby, N., Dierckxsens, M., Kurt, V., Belov, A. and Kudela, K. (2018). Detection in real time and post analysis of the GLE72 event. 15th European Space Weather Week. 5-9 Nov 2018, Leuven, Belgium.
7. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaiskos, P., Crosby, N., and Dierckxsens, M. (2018). Monte carlo radiation dose calculations in geospace. 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference. 6-10 July 2018, Altai, Russia.
8. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Karaiskos, P. and Crosby, N. (2018). Radiation Dose Calculations at Aviation Altitudes. SCK-CEN Space Summer School. 25 June-6 July 2018, Mol, Belgium.
9. **Tezari, A.**, Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., and Karaiskos, P. (2018). Radiation exposure of aircrews due to space radiation. 27th Hellenic Symposium Nuclear Physics and Applications. 8-9 June 2018, Athens, Greece.
10. Paschalis, P., **Tezari, A.**, Gerontidou, M., and Mavromichalaki, H. (2017). Space radiation study based on cascades simulations in geospace. 14th European Space Weather Week. 27 November-1 December 2017, Ostend, Belgium.
11. Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Paschalis, P., Paouris, E. and **Tezari, A.** (2017). The multi-usage of usage of cosmic ray data to Space Weather services. 14th European Space Weather Week. 26 Nov–1 Dec 2017, Oostende, Belgium.

ASSESSING RADIATION EXPOSURE INSIDE THE EARTH'S ATMOSPHERE

Anastasia Tezari^{1,2}, Pavlos Paschalis², Helen Mavromichalaki^{2,*}, Pantelis Karaiskos¹, Norma Crosby³ and Mark Dierckxsens³

¹Medical Physics Laboratory, Faculty of Medicine, National and Kapodistrian University of Athens, 75 Mikras Asias Street, Goudi, 11527 Athens, Greece

²Athens Cosmic Ray Group, Faculty of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Panepistimioupolis, Zografos, 15784 Athens, Greece

³Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, Ringlaan-3-Avenue Circulaire, 1180 Brussels, Belgium

*Corresponding author: emavromi@phys.uoa.gr

Received 17 April 2020; revised 25 June 2020; editorial decision 19 July 2020; accepted 19 July 2020

The study of the particle showers created inside the Earth's atmosphere due to interactions of cosmic rays of solar and galactic origin is of great importance for the determination of the radiation impact on technological and biological systems. DYASTIMA is a Geant4-based software application that simulates the evolution of secondary particle cascades inside the atmosphere of Earth. DYASTIMA-R is a new feature especially created for assessing the exposure of flight-personnel and frequent flyers to cosmic radiation by performing calculations of radiobiological quantities, such as dose and equivalent dose rates for several air-flight scenarios. In this work, the validation of DYASTIMA/DYASTIMA-R, according to internationally accepted ICRP and ICRU standards, is discussed. Initial results for radiobiological quantities for several air-flight scenarios are also included. The results for specific scenarios calculated by DYASTIMA/DYASTIMA-R are provided as a federated product through the European Space Agency Space Situational Awareness Space Weather Service Centre Network.

INTRODUCTION

As primary cosmic rays propagate through the interplanetary medium, at some point they reach the Earth's magnetic field. Some of these particles penetrate the geomagnetic field and finally arrive at the top of our atmosphere, where they interact with the atmospheric molecules, nuclei and ions^(1,2). Several physical interactions take place, such as decay, elastic and inelastic scattering, ionisation, photoelectric effect, Compton scattering, annihilation, pair production and bremsstrahlung radiation, resulting in the creation of secondary particles. These secondary particles, which are basically protons, neutrons, charged pions and kaons but also electrons, positrons, muons, neutrinos and photons, continue to interact either with each other or with the atmospheric molecules, creating the evolution of the so-called atmospheric showers^(2–4).

The study of these cascades is essential for a better understanding of space weather phenomena and effects and can provide useful insights for the assessment of radiation effects on both technological and biological systems^(5,6). Typical examples can be radiation protection aviation of crews and passengers^(7–10), as well as prevention of damage on avionics^(11,12). Air showers can also provide significant information about the primary cosmic ray particles and the cosmogenic nuclides production^(13,14).

Atmospheric showers can be detected by balloons flying at different altitudes inside Earth's atmosphere or by a variety of ground-based detectors located at various geographic coordinates at several altitudes (ranging from sea level to mountain tops)⁽¹⁵⁾, such as the global network of neutron monitors⁽¹⁶⁾ or muon counters⁽¹⁷⁾. Nevertheless, the simulation of the atmospheric cascade is a critical tool, as most of the particle detectors, such as neutron and muon monitors, are ground-based and are usually sensitive to a specific type of particle. Furthermore, there are not enough adequate experimental data for all space weather conditions and phenomena^(18,19). As a result, the information collected from the detectors and the balloons at different atmospheric altitudes is not sufficient for the study of particle propagation through the atmosphere and its effects. Another great advantage of the simulations is to facilitate a realistic connection between the particle flux in the atmosphere with the actual particles that enter the atmosphere, providing all the necessary information in order to study all the physical processes of the cascade. Therefore, simulations allow the study of the shower evolution, the ionisation of the atmosphere, the interaction of the shower with a matter of the atmosphere as well as the calculation of several radiobiological quantities. Various programmes have been developed for this reason, with most of them making use of the well-known GEometry ANd Tracking (Geant4)^(20–22), or

FLUKtuierende KAskade (FLUKA)^(23,24) simulation toolkits.

A typical example is PLANETOCOSMICS, a Monte Carlo simulation in Geant4 of the evolution of the air showers inside the atmosphere^(25,26). Other models include the Cosmic Ray Ionisation Model for Ionosphere and Atmosphere (CORIMIA) and the Cosmic Ray Simulations for Cascade (CORSIKA), both developed in FLUKA. CORIMIA takes into account the ionization losses in the atmosphere and can be used for the study of cosmic-ray ionisation at atmospheric altitudes above 30 km for a specific time and location⁽²⁷⁾, while CORSIKA studies the low-energy cascade development below 30 km^(28,29).

Moreover, various software applications and models have been developed for radiation dosimetry calculations, in order to assess the radiation effects induced by galactic and solar cosmic rays to space crews and aircrews⁽³⁰⁾. Some typical examples are the Aviation Dosimetry (AVIDOS), the Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation System (NAIRAS), SIEVERT, CARI, the Space Environment Information System (SPENVIS) and the CALculated and Verified Aviation (CALVADOS). AVIDOS is a software application for the estimation of radiation exposure during a flight and is accessible through ESA's Space Weather portal⁽³¹⁾. SPENVIS is a useful web interface collecting various models of the space environment, developed by the Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB), and is also available through ESA's portal⁽³²⁾. NAIRAS is also a model for the prediction of radiation due to galactic cosmic rays and solar energetic particles, developed by the NASA Langley Research Centre⁽³³⁾. CARI^(34,35) and SIEVERT^(36,37) are also easily operated computer programmes that perform calculations of the effective dose due to galactic cosmic radiation on an aircraft, developed at the Federal Aviation Administration Civil Aerospace Medical Institute and the Institute of Radioprotection and Nuclear Safety (IRSN), respectively. CALVADOS is a system for the determination of aircrew dose exposure by the German Aerospace Centre (DLR) already applied to the flight crew of the flying company LUFTHANSA⁽³⁸⁾.

Dynamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA) is also a software application for the study of secondary particle cascades inside the atmosphere, based on Geant4⁽⁴⁾. It is implemented by the Athens Cosmic Ray Group and is provided by the Athens Neutron Monitor Station (A.Ne.Mo.S.) portal (<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/dyastima>). The latest version includes DYASTIMA-R, a feature especially created for radiation dosimetry calculations inside the atmosphere of a planet⁽³⁹⁻⁴²⁾. The results for specific scenarios calculated by DYASTIMA and DYASTIMA-R are provided as a federated product

through the European Space Agency Space Situational Awareness Space Weather Service Centre Network (<http://swe.ssa.esa.int/web/guest/dyastima-federated>).

In this work, the new version of DYASTIMA with the addition of DYASTIMA-R is used. Its validation process according to globally accepted standards is described. The initial results obtained by DYASTIMA and DYASTIMA-R are presented and discussed. Conclusions of the paper are summarised and potential next steps are given.

DYASTIMA SOFTWARE

As mentioned above, DYASTIMA is a standalone application in Geant4 providing Monte Carlo simulations of the secondary cosmic ray particle cascades and the propagation of these particles through the atmosphere of Earth or generally through the atmospheric layers of a planet having its own atmosphere⁽⁴⁾. DYASTIMA, so far, has been successfully used for the study of the cascades in the atmosphere of Earth⁽⁴⁾, the estimation of the ionisation of the Earth's atmosphere due to cosmic radiation during the ground level enhancement (GLE) on 17 May 2012 (GLE71)⁽⁴³⁾ as well as the calculation of the ion production rate in the atmosphere of Venus⁽⁴⁴⁾.

DYASTIMA input and output parameters

DYASTIMA software is based on a user-friendly graphical user interface (GUI), which allows easy parameterization for a more accurate study of the cascade developing not only in Earth's atmosphere but also in the atmosphere of other planets^(4,45). The model requires several input parameters, all defined by the user. These parameters concern the general characteristics of the planet and its surrounding atmosphere, where the air showers are developed, such as its radius, its surface type and pressure, the components of the magnetic field (north, east and vertical) and the gravitational acceleration as well as the atmospheric structure and temperature profile. The primary cosmic ray spectra, i.e. the particle's type, the flux etc., is one of the most important input parameters of the simulation. The spectrum can be extracted by various models and tools such as the ISO model⁽⁴⁶⁾, CREME96⁽⁴⁷⁻⁴⁹⁾ and Nymmik *et al.* model⁽⁵⁰⁾. The Geant4 settings alongside with the simulation geometry settings should also be taken into consideration. These may include the geometry model of the simulation, the division of the atmosphere, the appropriate Geant4 physics list that best describes the physical interactions taking place between the primary and secondary cosmic ray particles and the atmospheric matter, as well as

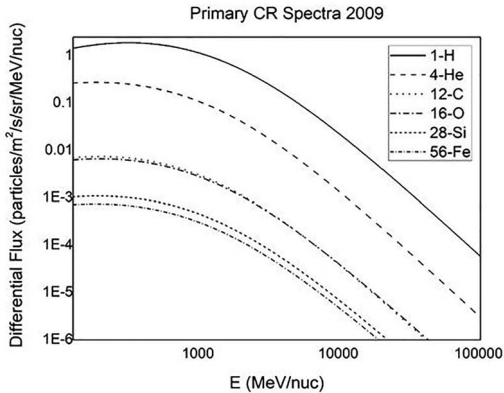


Figure 1: A typical example of the primary cosmic ray spectra for 6 elements (^1H , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{28}Si and ^{56}Fe) used as an input parameter in DYASTIMA. This one is extracted by using the software tools OMERE and CRÈME for 2009 for a cut-off rigidity of 0 GV

the definition of the atmospheric altitudes where the tracking of particles will take place^(4, 39–42).

This large amount of information is processed during each simulation scenario, providing, as output, accurate values for various aspects of the developing cascade. These may be the number of the secondary particles present at different atmospheric altitudes, their energy and the energy deposition, as well as their direction and arrival time. All this information is separately collected for each particle type at each defined tracking layer.

In this work, the primary cosmic ray spectra for six chemical elements (^1H , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{28}Si and ^{56}Fe) is based on the ISO15390⁽⁴⁶⁾ model for lower energies (below 10 MeV/nuc), and on Nymmik *et al.* model⁽⁵⁰⁾ for higher energies, as these models are quite similar for energies above 10 MeV/nuc. A typical spectrum used as input in DYASTIMA is shown in Figure 1. It should be noted that the primary spectra have been derived by using the OMERE software offered by TRAD⁽⁵¹⁾. The atmospheric profile, i.e. the temperature as a function of the atmospheric altitude, is based on the International Standard Atmosphere (ISA) model^(52, 53). The mean annual values for the North, East and Vertical components of the magnetic field used in the simulation are provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration, based on the IGRF model (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>) at mean sea level.

DYASTIMA-R radiation dosimetry calculations

The radiation environment of the Earth's atmosphere, directly affected by space radiation, plays a key role

in the safety of aircrews and passengers during commercial flights. The calculation of several radiometric quantities, such as the absorbed dose and the equivalent dose, is essential for the determination of human exposure to ionizing solar and galactic cosmic radiation during a flight.

For this reason, the DYASTIMA software is enhanced with DYASTIMA-R, a new feature performing radiation dosimetry calculations inside the atmosphere of Earth^(39–42). More specifically, DYASTIMA-R is a Monte Carlo simulation performed on a human phantom for the calculation of the dose and equivalent dose rates at different atmospheric altitudes during various flight scenarios covering various geographic coordinates and phases of solar activity. It should be noted that DYASTIMA-R is not an autonomous software, as it requires the output provided by DYASTIMA. The user can define the characteristics of the cylindrical phantom that simulates the human body, such as the dimension and the material, the number of iterations, i.e. the interactions of the collected particles with the phantom matter at each atmospheric altitude, and the reference Geant4 physics list. The radiation weighting factors used for the calculation of the equivalent dose rate are according to well-accepted international standards, as found in the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Reports 103, 123 and 132^(54, 55).

Validation of DYASTIMA-R

The quantities most widely used for the determination of the exposure limits to radiation are (1) the mean absorbed dose D (measured in Gray), corresponding to the mean energy deposited on a mass due to an ionizing radiation type, (2) the equivalent dose H (in Sievert), that takes into account each radiation type's radiobiological effectiveness, as well as (3) the effective dose E (also in Sievert), which considers additionally the type of tissue or organ being irradiated^(54–56). However, these quantities are not suitable for the radiation risk assessment during an air flight or a manned space mission, since they are not measurable quantities. For this reason, the ICRP and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) recommend the use of other operational quantities, such as the ambient dose equivalent $H^*(10)$, also expressed in Sievert^(54–57). This is the equivalent dose at a point in a radiation field that would be produced by the corresponding expanded and aligned field in the ICRU sphere (a reference phantom of tissue-equivalent material⁽⁵⁸⁾), at a depth of 10 mm on the radius vector opposing the direction of the aligned field.

Both ICRP 123 and ICRU Report 84 documents provide ambient dose equivalent reference data for

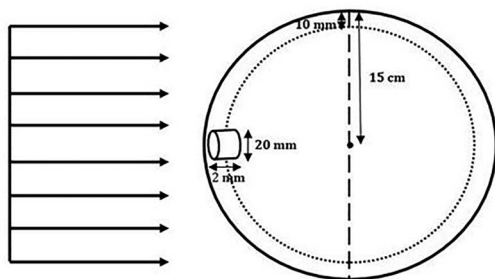


Figure 2: A schematic description of the dosimetry setup used for the validation of DYASTIMA-R

cosmic radiation exposure, which are actual measurements realised onboard flights from 1992 to 2006, and may be used for the assessment and validation of models and tools providing a calculation of radiation quantities for air flights^(55,57). The acceptable discrepancy limit recommended between the reference data and the model-calculated values are of the order of 30%. The flight scenarios based on these measurements and proposed by ICRP and ICRU cover three different time periods corresponding to different solar activity conditions (January 1998, January 2000, January 2002), 18 values of vertical geomagnetic cut-off rigidity with an increment of 1 GV (0–17 GV), and three flying altitudes, 9448.8 m/31 000 ft (FL310), 10 668.0 m/35 000 ft (FL350) and 11 887.2 m/39 000 ft (FL390), corresponding to the most frequent range of commercial aircraft flights. Many accredited tools and software applications, such as AVIDOS⁽³¹⁾ and NAIRAS⁽³³⁾, have followed the above validation process. The validation of DYASTIMA and DYASTIMA-R, as required by ESA, has been presented successfully^(59–61).

DYASTIMA-R configuration

For the validation of DYASTIMA and DYASTIMA-R^(59–61), a special version of DYASTIMA-R was implemented in order to calculate the operational quantity ambient dose equivalent $H^*(10)$. The dosimetry setup is according to the one already successfully used by Pelliccioni⁽⁶²⁾. The ICRU sphere is used, instead of a human phantom, and a cylindrical volume of 10 mm radius and 2 mm width is placed at a depth of 10 mm from the sphere surface. The sphere is then illuminated, with the secondary particles collected at each atmospheric layer. A visual representation of this setup is given in Figure 2.

The atmospheric profile of Earth as well as the spectrum of the primary cosmic ray particles at the top of the Earth's atmosphere (86 km altitude) are two basic factors not only for the validation of DYASTIMA/DYASTIMA-R but also for their

operation in general. More specifically, the ISA^(52,53) and the ISO Galactic Cosmic Ray model⁽⁴⁶⁾ have been used for the description of Earth's atmosphere and the primary cosmic ray spectra, respectively.

The effect of the geomagnetic field for various geographic coordinates is introduced by the usage of the vertical cut-off rigidity values in the primary spectra calculations. These values represent the geomagnetic field's continuous evolution and are calculated with the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) for Epoch 2000.0⁽⁶³⁾.

Comparison with the reference data

DYASTIMA and DYASTIMA-R runs have been performed for all the flight scenarios proposed by ICRU (three time periods, 18 vertical cut-off rigidity values, three flying altitudes)^(59–61). The ambient dose equivalent values $H^*(10)$ obtained by simulations with DYASTIMA-R, as well as the ICRU reference data, as a function of the vertical geomagnetic cut-off rigidity threshold R_c and the discrepancy for each time period (January 1998, January 2000, January 2002) are given in Tables 1–3. It is reminded that the acceptable percentage difference is 30%.

It is interesting to note that DYASTIMA-R values for cut-off rigidity thresholds ranging between 0 and 10 GV are in good agreement with the ICRU reference data, with a discrepancy generally not more than 30%. This range of cut-off rigidities corresponds to polar and middle geographic latitudes, covering almost 75% of the globe's surface. In equatorial regions, i.e. above 10 GV, a greater discrepancy of the order of up to 40% is observed, which is probably due to the more complicated geomagnetic field at this region. In these regions, DYASTIMA-R underestimates the $H^*(10)$ in agreement with other models^(33,34). A similar behaviour can also be observed in other models, with the $H^*(10)$ and the reference data being compatible up to 10 GV^(33,34).

More specifically, during January 1998, corresponding to solar minimum conditions, the DYASTIMA-R obtained values and the reference data are almost identical for higher geographic latitudes (0–3 GV). The discrepancy increases for higher R_c values (10–17 GV), varying from 30 to 40% and is greater in the case of the highest-flying altitude FL390. Moreover, in January 2000, which corresponds to the ascending phase of Solar Cycle 23, the discrepancy follows the same pattern as mentioned above. Finally, during January 2002, near solar maximum conditions, the DYASTIMA-R values are in very good accordance with the reference data up to 12 GV, with the discrepancy between the values being significantly lower compared to 1998 and 2000⁽⁵⁶⁾.

The observed differences may be attributed to the input parameters used in the DYASTIMA

Table 1. DYASTIMA-R ambient dose equivalent $H^*(10)$ (microSv) as a function of geomagnetic vertical cut-off rigidity (R_c) for January 1998 (solar minimum) for three flight levels (FLs). The Diff (%) corresponds to the percentage difference between the values obtained from DYASTIMA-R and the reference data provided by ICRU Rep. 84.

R_c (GV)	FL310		FL350		FL390	
	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)
0	4	-6.5	5.3	-10.2	6.8	-10.8
1	3.9	-8.8	5.1	-11.4	6.9	-6.7
2	3.9	-2.8	4.8	-11.9	6.3	-10.5
3	3.2	-15.4	4.3	-16.7	5.4	-17.9
4	2.9	-17.7	3.8	-20.2	4.7	-21.7
5	2.5	-22.3	3.3	-25	4	-28.1
6	2.2	-22.6	2.9	-28.4	3.6	-29
7	2	-26.5	2.5	-31.5	3.1	-32.2
8	1.7	-31.7	2.2	-32	2.6	-35.7
9	1.6	-29.5	1.9	-35.3	2.4	-36.4
10	1.5	-29.3	1.9	-31	2.2	-34.5
11	1.3	-33.7	1.7	-33.5	2	-34.2
12	1.2	-32.7	1.6	-30.4	1.9	-33.2
13	1.1	-35.8	1.4	-31.6	1.7	-35.2
14	1.1	-33	1.3	-37	1.5	-38.8
15	1	-35.3	1.2	-36.3	1.4	-40.7
16	0.9	-39.1	1.2	-36.9	1.3	-39.9
17	0.9	-41.2	1.1	-37.5	1.3	-41.4

Table 2. DYASTIMA-R ambient dose equivalent $H^*(10)$ (microSv) as a function of geomagnetic vertical cut-off rigidity (R_c) for January 2000 (solar transition) for three FLs. The Diff (%) corresponds to the percentage difference between the values obtained from DYASTIMA-R and the reference data provided by ICRU Rep. 84.

R_c (GV)	FL310		FL350		FL390	
	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)
0	3.3	-17.4	4.4	-15.6	5.7	-10.9
1	3.3	-15.7	4.5	-12.5	5.5	-12.6
2	3.1	-16.6	4.3	-11	5.2	-13.4
3	2.9	-16.6	3.7	-18.5	4.6	-18.4
4	2.5	-22.8	3.5	-16.7	4.1	-22.1
5	2.4	-20.7	3.1	-21.1	3.7	-22.9
6	2.1	-25.7	2.7	-26.1	3.2	-27.1
7	1.8	-27.8	2.3	-30.1	2.8	-30.1
8	1.6	-29.1	2.1	-29.2	2.6	-27.3
9	1.5	-30.6	2	-27.4	2.3	-31.7
10	1.4	-31.7	1.7	-31	2.1	-29.9
11	1.2	-35.7	1.6	-29.8	1.9	-32.4
12	1.1	-33.5	1.5	-34.1	1.7	-34.4
13	1	-38.5	1.3	-37.6	1.6	-36.4
14	1	-40.4	1.2	-38.2	1.5	-37.8
15	0.9	-40.3	1.1	-39.6	1.4	-40.5
16	0.9	-42.6	1	-41.8	1.3	-42.1
17	0.8	-43.8	1	-42	1.2	-43.2

simulation. For example, the ISA is not suitable for use in the polar and equatorial regions, since it is based on average conditions for middle geographic latitudes^(52,53). Other models describing the

characteristics of the atmosphere are also semi-empirical. Additionally, since the primary cosmic ray spectra can be derived through various models and software tools, substantial differences may

Table 3. DYASTIMA-R ambient dose equivalent $H^*(10)$ (microSv) as a function of geomagnetic vertical cut-off rigidity (R_c) for January 2002 (solar maximum) for three FLs. The Diff (%) corresponds to the percentage difference between the values obtained from DYASTIMA-R and the reference data provided by ICRU Rep. 84.

R_c (GV)	FL310		FL350		FL390	
	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)	$H^*(10)$ (microSv)	Diff (%)
0	3.3	-10.2	4.5	-4.1	5.2	-8.5
1	3.2	-11.5	4.3	-6.9	5.3	-5.5
2	3	-11.1	3.9	-10.2	5.1	-3.8
3	2.8	-14.6	3.9	-5.5	4.7	-6.6
4	2.4	-20.5	3.3	-15.1	3.9	-16.1
5	2.3	-18.6	2.9	-19.5	3.7	-14.7
6	2	-25	2.6	-19.8	3.1	-22
7	1.8	-25.1	2.3	-24.7	2.7	-27.6
8	1.6	-25.6	2.1	-23.8	2.5	-26.4
9	1.5	-30.8	1.9	-26.4	2.2	-29.5
10	1.3	-31.9	1.7	-28.1	2	-30.4
11	1.2	-32.7	1.6	-27.1	1.9	-30.4
12	1.2	-29.9	1.5	-30.5	1.7	-33
13	1	-36.7	1.4	-31.8	1.6	-34.1
14	1	-37	1.2	-37.4	1.5	-32.9
15	0.9	-38.7	1.2	-37.7	1.4	-38.2
16	0.9	-42.1	1.1	-37.7	1.3	-42.2
17	0.8	-42.5	1	-43.2	1.2	-43.5

present not only in the lower energies but also in computational aspects, such as the definition of a single R_c orbit. For these reasons, DYASTIMA is under constant improvement and in the pursuit of more appropriate input parameters in order to provide more precise results.

INITIAL RESULTS

The ionizing energy deposition on the different atmospheric layers due to the evolving cascade of secondary particles is calculated for solar minimum conditions (2008) as well as during solar maximum conditions (2014), and the results are presented in Figure 3. It is observed that the evolution of the cascade starts at ~ 40 km altitude inside the atmosphere and reaches its peak at 13 and 12 km altitude for 2008 and 2014, respectively, where the maximum energy deposition takes place. The average altitude corresponding to the majority of commercial air-flights is at 10–12 km, and therefore it is necessary to perform radiation dosimetry calculations at these altitudes.

The average ambient equivalent dose rate per year as a function of altitude is given in Figure 4, for 2 years (2008 and 2014) that correspond to different phases of solar activity. It is observed that $H^*(10)$ increases up to 40 km altitude (roughly the altitude where the cascade begins) and then it remains averagely constant. Furthermore, the dose rate is significantly higher during 2008 that

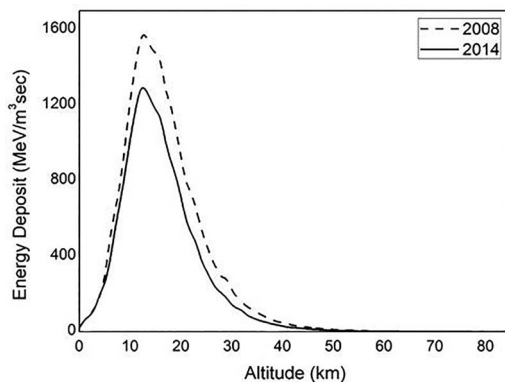


Figure 3: The ionizing energy deposition in the atmospheric matter for 2008 (solar minimum conditions) and 2014 (solar maximum conditions) as calculated by DYASTIMA software

corresponds to solar minimum conditions, due to the anticorrelation of the solar activity and the galactic cosmic ray intensity.

The average ambient dose equivalent $H^*(10)$ rate (in microSv per hour) on an annual basis, as calculated by DYASTIMA-R during Solar Cycle 24 for a rigidity threshold of 0 GV for the three most frequent flying altitudes (FL310, FL350, FL390), is presented in Figure 5. The higher dose rate is observed during 2009⁽⁶⁴⁾, the solar minimum between

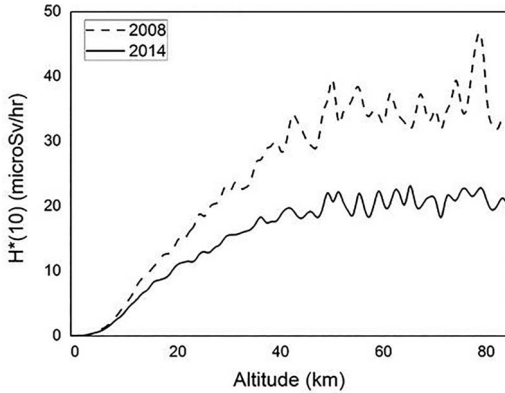


Figure 4: The ambient dose equivalent $H^*(10)$ rate as a function of altitude, covering the whole atmosphere of Earth, for 2008 and 2014, as calculated by DYASTIMA-R

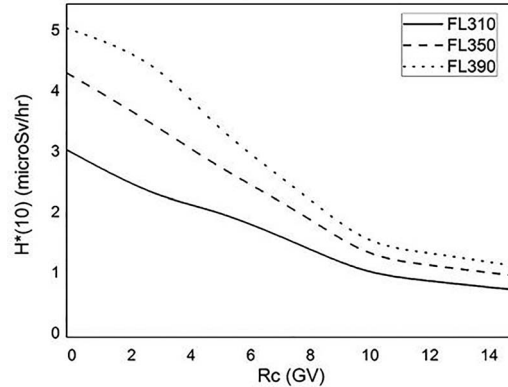


Figure 6: The ambient dose equivalent $H^*(10)$ rate as a function of the cut-off rigidity threshold R_c for 2002 as calculated by DYASTIMA-R, for three different flying altitudes (FL310, FL350, FL390)

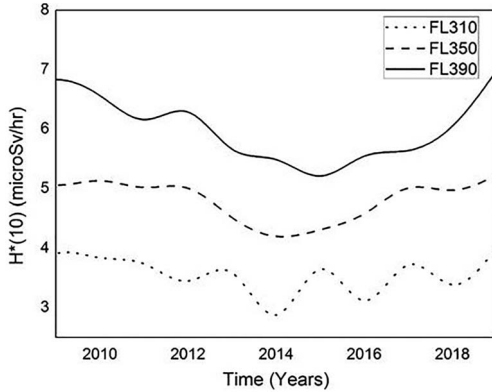


Figure 5: The ambient dose equivalent $H^*(10)$ rate during Solar Cycle 24 as calculated by DYASTIMA-R for a cut-off rigidity of 0 GV, for three different flying altitudes (FL310, FL350, FL390)

Solar Cycles 23 and 24, while the lower dose and ambient equivalent dose rate take place during the solar maximum of Solar Cycle 24 (2014), indicating once more the anticorrelation between cosmic ray intensity and solar activity. Generally, the dose rate presents very little variation in the equatorial regions during the solar cycle, but a higher variation at higher latitudes⁽³⁴⁾. Hereby, it can be observed that this effect is more evident for higher altitudes (FL390) at polar regions (0 GV). The average ambient dose equivalent $H^*(10)$ rate as a function of the cut-off rigidity threshold R_c for 2002, for three flying altitudes, is presented in Figure 6. The dose rate dependence of the geographic latitude is evident, as $H^*(10)$ decreases with the increasing of the rigidity threshold⁽⁶⁵⁾.

CONCLUSIONS AND NEXT STEPS

Currently, there is constant growth in the number of air flights since more and more passengers choose flying as a mean of transportation, increasing eventually air traffic. For this reason, many aircrafts are obliged to fly at higher atmospheric altitudes or even altering their routes, resulting in a higher radiation accumulation due to cosmic rays for both the aircraft crew and the passengers⁽⁶⁵⁾. Additionally, there is also an increase in trans-polar flights, where the radiation exposure is significantly higher. Therefore, the calculation of quantities useful for radiation assessment is very important, especially for higher geographic latitudes, as more particles can penetrate through the atmosphere due to the lower cut-off rigidity threshold.

DYASTIMA-R is validated according to the standards provided by ICRP 123 and ICRU Report 84 documents. Dosimetry calculations were performed for three flying altitudes, 18 vertical cut-off rigidities and three-time stamps, which correspond to different periods of solar activity (solar maximum, ascending phase and solar maximum of Solar Cycle 23). From the above analysis, it is concluded that DYASTIMA/DYASTIMA-R meet on a satisfactory level the criteria proposed by ICRP and ICRU as the discrepancy observed between the reference data and the calculated values does not exceed in general the acceptable limit of 30%. Therefore, DYASTIMA-R can be used for reliable dosimetry calculations of the exposure of aviators and passengers to ionizing cosmic radiation during air flights.

The preliminary results are also very promising for better understanding the evolution of the secondary particle cascade inside the atmosphere and the determination of the radiation exposure at different

atmospheric layers. DYASTIMA and DYASTIMA-R may be useful software tools for radiation dosimetry calculations inside the atmospheres of other planets as well. The GUI of DYASTIMA makes the software accessible and user-friendly allowing easy parameterization, so it can be used by entities concerned with the radiation effects on aircrews, frequent travellers, legislators, etc., either for scientific or educational purposes.

So far, DYASTIMA-R radiation dosimetry calculations are performed for specific points inside the atmosphere defined by atmospheric altitude, geographic coordinates and magnetic rigidity threshold dosimetry calculations. The following phase will include dosimetry calculations during a whole flight, by taking into account the flight route as well as the duration of the flight. The structure of the airplane as a parameter is also under further consideration. Therefore, DYASTIMA-R will soon be enhanced by more flight scenarios by performing a long-term analysis, covering a wider range of different solar activity periods, as well as different rigidity thresholds, covering most of the geographic coordinates. DYASTIMA/DYASTIMA-R will be also applied for radiation dosimetry calculations during different Space Weather events of high temporal variability, such as GLEs. During such events, the exposure at aircraft altitudes is significantly increased, since the cosmic ray intensity may increase several orders of magnitude in minutes^(66–70).

DYASTIMA is based on a friendly GUI, offering free parameterization to the user. The user can define the characteristics of the planet and the simulation, the primary cosmic ray spectra and the atmospheric profile. The spectrum may be derived by various models and tools such as the ISO model⁽⁴⁶⁾, CREME96^(47–49) and Nymmik *et al.* model⁽⁵⁰⁾. The characteristics of the atmosphere can also be provided, by several models, such as the ISA, the Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter (NRLMSISE-00), Marshall Engineering Thermosphere (MET-V 2.0) or the Drag Temperature Model (DTMB78). Most of these models are semi-empirical. Therefore, differences may occur, depending on the model chosen by the user.

In summary, DYASTIMA provides all the important parameters for the description of the cascade, such as the type and the number of the secondary particles, their direction and arrival time, as well as the energy and the energy deposit at different atmospheric altitudes. Based on all these parameters, radiation dosimetry calculations can be performed. All this information can be either derived as a whole, or for each particle type of the cascade individually. This allows to study the atmospheric showers at other planets too. Next steps will also include the simulation of the atmospheric cascades in other planets, such as the atmosphere of Mars, as it may provide the

necessary information needed to evaluate the radiation exposure of spacecraft crews due to cosmic radiation in future manned missions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by ESA SSA SWE Space Radiation Expert Service Centre activities (ESA contract number 4000113187/15/D/MRP). The European Neutron Monitor Services research is funded by the ESA SSA SN IV-3 Tender: RFQ/3-13556/12/D/MRP. A.Ne.Mo.S is supported by the Special Research Account of Athens University (70/4/5803). A.T. thanks the Hellenic State Scholarship Foundation (IKY) for supporting her with a doctoral scholarship through the Operational Programme <<Human Resources Development, Education and Lifelong learning>> in the context of the project ‘Strengthening Human Resources Research Potential via Doctorate Research – 2nd Cycle’ (MIS-5000432), co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund- ESF).

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

1. Dorman, L. I. *Cosmic Rays in the Earth’s Atmosphere and Underground*. New York: Kluwer Academic Publishers (2004).
2. Singh, A. K., Singh, D. and Singh, R. P. *Impact of galactic cosmic rays on Earth’s atmosphere and human health*. *Atmos. Environ.* **45**, 3806–3818 (2011).
3. Kudela, K. *On energetic particles in space*. *Acta Phys. Slovaca* **59**, 537–652 (2009).
4. Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Dorman, L. I., Plainaki, C. and Tsirigkas, D. *Geant4 software application for the simulation of cosmic ray showers in the Earth’s atmosphere*. *New Astron.* **33**, 26–37 (2014).
5. Liliensten, J. and Belehaki, A. *Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting space weather*. *Acta Geophys.* **57**, 1–14 (2009).
6. Kudela, K., Storini, M., Hofer, M. Y. and Belov, A. *Cosmic rays in relation to space weather*. *Space Sci. Rev.* **93**, 153–174 (2000).
7. Cucinotta, F. A. and Durante, M. *Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings*. *Lancet Oncol.* **7**, 431–435 (2006).
8. Beck, P., Barlett, D., Lindborg, L., McAulay, I., Schnuer, K., Schraube, H. and Spurny, F. *Aircraft crew radiation workplaces: comparison of measured and calculated ambient dose equivalent rate data using the EURADOS in-flight radiation data base*. *Radiat. Prot. Dosimetry* **118**(2), 182–189 (2006).

9. Beck, P., Latocha, M., Dorman, L., Pelliccioni, M. and Rollet, S. *Measurements and simulations of the radiation exposure to aircraft crew workplaces due to cosmic radiation in the atmosphere*. Radiat. Prot. Dosimetry **126**(1–4), 564–567 (2007).
10. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS). *Cosmic radiation exposure of aircraft crew - Compilation of measured and calculated data*, EU Commission Radiation Protection Issue No. 140 Lindborg, L., Bartlett, D. T., Beck, P., McAulay, I. R., Schnuer, K., Schraube, K. and Spurný, F., Eds. (2004) (ISBN 92-894-8448-9).
11. Baker, D. N., Daly, E., Daglis, I., Kappenman, J. G. and Panasyuk, M. *Effects of space weather on technology infrastructure*. Space Weather **2**(2) (2004).
12. Bothmer, V. and Daglis, I. *Space Weather. Physics and Effects* (Springer Praxis). (Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd) (2007).
13. Kovaltsov, G. A., Mishev, A. and Usoskin, I. G. *A new model of cosmogenic production of radiocarbon ^{14}C in the atmosphere*. EarthPlanet. Sc. Lett. **114**(337), 120–338 (2012).
14. Poluianov, S. V., Kovaltsov, G. A., Mishev, A. and Usoskin, I. G. *Production of cosmogenic isotopes ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , and ^{36}Cl in the atmosphere: altitudinal profiles of yield functions*. J. Geophys. Res. Atmos. **121**, 8125–8136 (2016).
15. Bütikofer, R. *Ground-Based Measurements of Energetic Particles by Neutron Monitors*. In: *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis*. Astrophysics and Space Science Library. Vol. **444**. Malandraki, O. and Crosby, N., Eds. (Cham: Springer) (2018).
16. Mavromichalaki, H. *et al. Applications and usage of the real-time neutron monitor database*. Adv. Space Res. **47**, 2210–2222 (2011).
17. Supanitsky, A. D., Etchegoyen, A., Medina-Tanco, G., Allekotte, I., Gómez Berisso, M. and Medina, M. C. *Underground muon counters as a tool for composition analyses*. Astropart. Phys. **29**(6), 461–470 (2008).
18. Eroshenko, E., Velinov, P., Below, A., Yanke, V., Pletnikov, E., Tassev, Y. and Mishev, A. *Relationships between cosmic ray neutron flux and rain flows*. In: Proc. 21th ECRS. (2008).
19. Mares, V., Brall, T., Bütikofer, R. and Rühm, W. *Influence of environmental parameters on secondary cosmic ray neutrons at high-altitude research stations at Jungfraujoch, Switzerland, and Zugspitze, Germany*. Radiat. Phys. Chem. **168**, 108557 (2020).
20. Agostinelli, S. *et al. Geant4—a simulation toolkit*. Nucl. Instrum. Methods A **506**, 250–303 (2003).
21. Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. *et al. Geant4 developments and applications*. IEEE Trans. Nuclear Sci **53**, 270–278 (2006).
22. Allison, J. *et al. Recent developments in Geant4*. Nucl. Instrum. Methods A **835**, 186–225 (2016).
23. Ferrari, A., Sala, P. R., Fasso, A. and Ranft, J. *A multi-particle, transport code*, CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773 (2005).
24. Battistoni, G., Ferrari, A., Montaruli, T. and Sala, P. R. *The FLUKA atmospheric neutrino flux calculation*. Astropart. Phys. **19**, 269 (2003).
25. Desorgher, L. *et al. Atmocosmics: a GEANT4 code for computing the interaction of cosmic rays with the Earth's atmosphere*. Int. J. Mod. Phys. A **20**(29), 6802–6904 (2005).
26. Usoskin, I., Desorgher, L., Velinov, P. I. Y., Storini, M., Flueckiger, E., Buetikofer, R. and Kovaltsov, G. A. *Solar and galactic cosmic rays in the Earth's atmosphere*. Acta Geophys. **57**, 88–101 (2009).
27. Velinov, P. I. Y., Asenovski, A., Kudela, K., Lastovicka, J., Mateev, L., Mishev, A. and Tonev, P. *Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere*. J. Space Weather Space Clim. **3**, A14 (2013).
28. Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J. N., Schatz, G. and Thouw, T. *CORSIKA: a Monte Carlo code simulate extensive air showers*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, V +90P, TIB Hannover, D-30167 Hannover, Germany (1998).
29. Velinov, P. I. Y. and Mishev, A. *Cosmic ray induced ionization in the atmosphere estimated with CORSIKA code simulations*. C. R. Acad. Bulg. Sci. **60**(5), 493–500 (2007).
30. European Commission. *Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation*, Directorate-General for Energy, Directorate D—Nuclear Safety & Fuel Cycle, Unit D4—Radiation Protection. (2012).
31. Latocha, M., Beck, P. and Rollet, S. *AVIDOS—a software package for European accredited aviation dosimetry*. Radiat. Prot. Dosimetry **136**(4), 286–290 (2009).
32. SPENVIS, <https://www.spennis.oma.be/>, (accessed 30 August 2019).
33. 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**, 603–635 (2013).
34. Friedberg, W., Copeland, K., Duke, F. E., O'Brien, K. and Darden, E. B. Jr. *Guidelines and technical information provided by the US federal aviation administration to promote radiation safety for air carrier crew members*. Radiat. Prot. Dosimetry **86**, 323–327 (1999).
35. CARI, <http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>, (accessed 30 August 2019).
36. IRNS. *Scientific and technical report*. IRNS. **4**, 121–124 (2002).
37. SIEVERT, <https://www.sievert-system.org/>, (accessed 30 August 2019).
38. Berger, T., Meier, M., Reitz, G. and Schridde, M. *Long-term dose measurements applying a human anthropomorphic phantom onboard an aircraft*. Radiat. Meas. **43**, 580–584 (2008).
39. Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M. and Mavromichalaki, H. *A new tool for radiation exposure calculations in aircraft flights during disturbed solar activity periods*. EGU, Vienna, Austria, (2016).
40. Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., Mavromichalaki, H. and Nikolopoulou, P. *Space radiation exposure calculations during different solar and galactic cosmic ray activities*, XXV European Cosmic Ray Symposium. (2016).
41. Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., Mavromichalaki, H. and Ioannidou, S. *Space radiation exposure simulation during different phases of solar activity*. In: HPS 50th Midyear Meeting. (Bethesda, Maryland, USA) (2017).

42. Paschalis, P., Tezari, A., Gerontidou, M., Mavromichalaki, H. and Karaïskos, P. Radiation exposure of aircrews due to Space Radiation. In: Proc. 27th HNPS Annual Symposium. (Athens, Greece) (2018).
43. Dorman, L. I., Paschalis, P., Plainaki, C. and Mavromichalaki, H. Estimation of the cosmic ray ionization in the Earth's atmosphere during GLE71. Proc. 34th International Cosmic Ray Conference, Hague, The Netherlands, (2015).
44. Plainaki, C., Paschalis, P., Grassi, D., Mavromichalaki, H. and Andriopoulou, M. *Interactions of cosmic rays with the Venusian atmosphere during different solar activity conditions*. Ann. Geophys. **34**, 595–608 (2016).
45. Athens Cosmic Ray Group. *DYASTIMA Software User Manual*. (2019). Accessible at http://cosray.phys.uoa.gr/apps/DYASTIMA/DYASTIMA_USER_MANUAL.pdf.
46. International Organization for Standardization (ISO). *Space environment (natural and artificial)—Galactic cosmic ray model*. **15390**, 2004 (2004).
47. Tylka, A. J., Adams, J. H., Boberg, P. R. Jr., Brownstein, B., Dietrich, W. F., Flueckiger, E. O., Petersen, E. L., Shea, M. A., Smart, D. F. and Smith, E. C. *CREME96: a revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code*. IEEE Trans. Nucl. Sci. **44**, 2150–2160 (1997).
48. Weller, R. A., Mendenhall, M. H., Reed, R. A., Schrimpf, R. D., Warren, K. M., Sierawski, B. D. and Massengill, L. W. *Monte Carlo simulation of single event effects*. IEEE Trans. Nucl. Sci. **57**, 1726–1746 (2010).
49. Mendenhall, M. H. and Weller, R. A. *A probability-conserving cross-section biasing mechanism for variance reduction in Monte Carlo particle transport calculations*. Nucl. Instrum. Methods A **667**, 38–43 (2012).
50. Nymmik, R. A., Panasyuk, M. I. and Suslov, A. A. *Galactic cosmic ray flux simulation and prediction*. Adv. Space Res. **17**(2), 19–30 (1996).
51. OMERE. <http://www.trad.fr/en/space/omere-software/> (accessed 30 August 2019).
52. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Manual of The ICAO Standard Atmosphere*. In: Doc 7488-CD third ed. (1993).
53. International Organization for Standardization (ISO). *Standard Atmosphere*. **2533**, 1975 (2007). <https://www.iso.org/standard/7472.html>.
54. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Ann. ICRP **37** **103** (2007, 2007).
55. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space*. Ann. ICRP **42**(4), 123 (2013).
56. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Radiological protection from cosmic radiation in aviation*. Ann. ICRP **45**(1), 132 (2016).
57. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew*. J Int Comm Radiat Units Meas **10**(2), Report 84, Oxford University Press (2010).
58. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). *Radiation quantities and units*. J Int Comm Radiat Units Meas **33** (1980). ICRU Report 33.
59. Tezari, A., Paschalis, P., Mavromichalaki, H., Karaïskos, P., Crosby, N. and Dierckxsens, M. *DYASTIMA: simulating air showers in the atmosphere of a planet*. Proc. 70th IAC, Washington, DC, (2019).
60. ESA. *ESA SSA P3 SWE-III Acceptance Test Report*, R.137 Dynamic Atmospheric Tracking Interactive Model Application (DYASTIMA). (2019).
61. Paschalis, P., Tezari, A., Mavromichalaki, H., Crosby, N. and Dierckxsens, M. *Validation of DYASTIMA and integration to ESA SSA R-ESC*. 16th ESWW, Liege, Belgium, (2019).
62. Pelliccioni, M. *Overview of Fluence-to-effective dose and Fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code*. Radiat. Prot. Dosimetry **88**(4), 279–297 (2000).
63. Smart, D.F. and Shea, M.A. *World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 2000.0*. Proc. 30th ICRC, Mexico, 2007.
64. Mrigakshi, A. I., Matthiä, D., Berger, T., Reitz, G. and Wimmer-Schweingruber, R. F. *Estimation of galactic cosmic ray exposure inside and outside the Earth's magnetosphere during the recent solar minimum between solar cycles 23 and 24*. Adv. Space Res. **52**, 979–987 (2013).
65. Jones, J. B. L., Bentley, R. D., Hunter, R., Iles, R. H. A., Taylor, G. C. and Thomas, D. J. *The practical issues of utilizing a european space weather programme for airline operations*. Proc. ESA space weather workshop, 194 (2001).
66. Matthiä, D., Heber, B., Reitz, G., Sihver, L., Berger, T. and Meier, M. *The ground level event 70 on December 13th, 2006 and related effective doses at aviation altitudes*. Radiat. Prot. Dosimetry **136**(4), 304–310 (2009).
67. Copeland, K. and Atwell, W. *Flight safety implications of the extreme solar proton event of 23 February 1956*. Adv. Space Res. **63**, 665–671 (2019).
68. Mishev, A. and Usoskin, I. *Numerical model for computation of effective and ambient dose equivalent at flight altitudes-application for dose assessment during GLEs*. J Space Weather Space Climate **5**, A10 (2015).
69. Mishev, A., Adibpour, F., Usoskin, I. and Felsberger, E. *Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71. Flight safety implications of the extreme solar proton event of 23 February 1956*. Adv. Space Res. **55**(1), 354–362 (2015).
70. Flückiger, E. and Bütikofer, R. *Radiation doses along selected flight profiles during two extreme solar cosmic ray events*. Astrophys. Space Sci. Trans. **7**(2), 105–109 (2011).