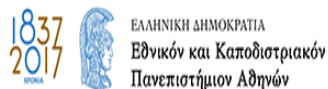


ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

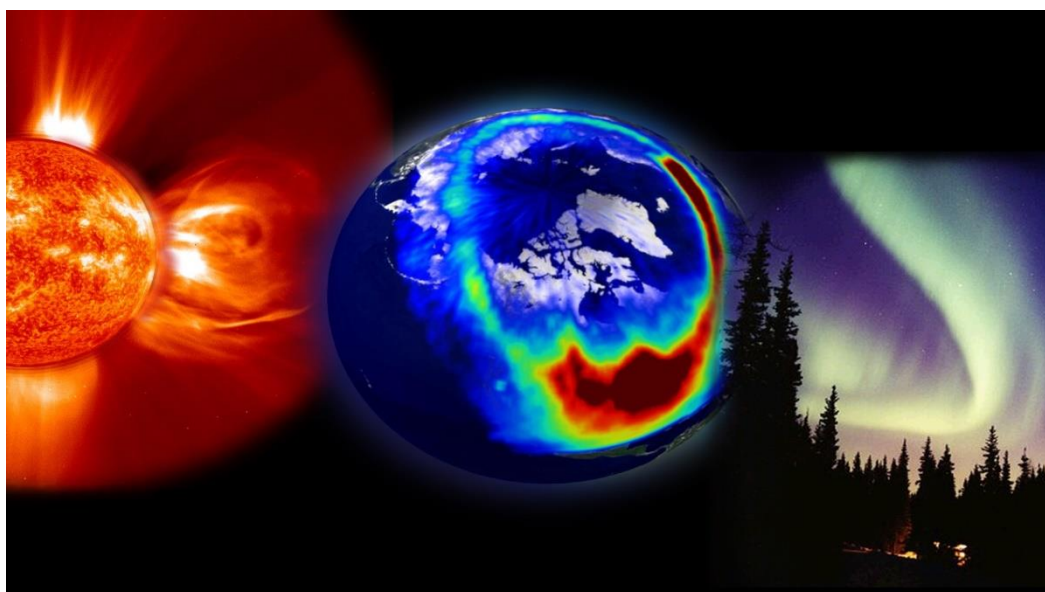


ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΟΥ
23^{ου} ΚΑΙ 24^{ου} ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ”**



Αλεξάκης Παναγιώτης

A.M. 201629

Τριμελής επιτροπή :

Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη, Ομ. Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

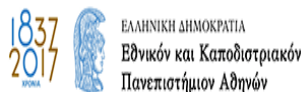
Ιωάννης Δαγκλής, Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα, Επίκ. Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2017

ΑΘΗΝΑ 2017

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΙΓΙΔΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΟΥ 23^{ου} ΚΑΙ 24^{ου} ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ”

Αλεξάκης Παναγιώτης

A.M. 201629

Τριμελής επιτροπή :

Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη, Ομ. Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Ιωάννης Δαγκλής, Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα, Επίκ. Καθ. Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2017

Στον παππού μου,

Στάλιν

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....σελ.6
ABSTRACT.....σελ.7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....σελ.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΗΛΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

1.1 Ήλιος.....σελ.12
• 1.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα.....σελ.15
• 1.1.1.1 Ηλιακές εκλάμψεις.....σελ.15
• 1.1.1.2 Στεμματικές Εκτινάξεις Μάζας.....σελ.19
• 1.1.1.3 Στεμματικές Οπές.....σελ.22
1.2 Διαπλανητικός χώρος.....σελ.23
• 1.2.1 Ηλιακός Άνεμος.....σελ.23
• 1.2.2 Κρουστικά κύματα.....σελ.25
• 1.2.3 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο-Μοντέλο Μπαλαρίνας.....σελ.27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΗΙΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ

2.1 Χαρακτηριστικά και προέλευση της γήινης μαγνητόσφαιρας.....σελ.29
2.2 Δομή της γήινης μαγνητόσφαιρας.....σελ.31
2.3 Ρεύματα στην γήινη μαγνητόσφαιρα.....σελ.36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΥΖΕΥΞΗ ΗΛΙΟΥ-ΓΗΣ - ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΚΑΙΡΟΣ

3.1 Αλληλεπίδραση ηλιακού ανέμου-γεωμαγνητικού πεδίου-Διαστημικός καιρός.....σελ.45
3.2 Γεωμαγνητικές καταιγίδες.....σελ.47
3.3 Γεωμαγνητικοί δείκτες.....σελ.54

• 3.3.1 Δείκτες K , K_p , A_k και A_pσελ.54	σελ.54
• 3.3.2 Πολικός Δείκτης PCσελ.57	σελ.57
• 3.3.3 Δείκτες AEσελ.57	σελ.57
• 3.3.4 Δείκτης Dstσελ.59	σελ.59
3.4 Κέντρα ανίχνευσης γεωμαγνητικής δραστηριότητας και Κοσμικής Ακτινοβολίας.....σελ.61	σελ.61
• 3.4.1 Ανιχνευτές Γεωμαγνητικής Δραστηριότητας.....σελ.61	σελ.61
• 3.4.2 Δορυφορικά Συστήματα Καταγραφής.....σελ.61	σελ.61
• 3.4.3 Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων.....σελ.62	σελ.62
• 3.4.4 Ο Μετρητής Νετρονίων του Πανεπιστημίου της Αθήνας.....σελ.68	σελ.68
3.5 Κέντρο Πρόβλεψης Διαστημικού Καιρού του Πανεπιστημίου της Αθήναςσελ.72	σελ.72
3.6 Διαδικασία πρόγνωσης του Διαστημικού Καιρού από άλλα κέντρασελ.82	σελ.82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ- ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	
4.1 Σκοπός της επεξεργασίας.....σελ.88	σελ.88
4.2 Στατιστική μελέτη της γεωμαγνητικής δραστηριότητας με την χρήση του δείκτη K_pσελ.91	σελ.91
4.3 Στατιστική μελέτη της γεωμαγνητικής δραστηριότητας με την χρήση του δείκτη Dstσελ.108	σελ.108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	
5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....σελ.123	σελ.123
5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....σελ.128	σελ.128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	
6.1 Συμπεράσματα.....σελ.132	σελ.132
6.2 Προοπτικές.....σελ.134	σελ.134
ΑΝΑΦΟΡΕΣσελ.136	σελ.136
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑσελ.141	σελ.141

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί την διπλωματική εργασία στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Τμήμα Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών με ειδίκευση στον Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής και εκπονήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων με την επίβλεψη της ομ. καθηγήτριας κ. Ελένης Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη. Σημαντική είναι η συνεισφορά της διδάκτορος κ. Μαρίας Γεροντίδου-Γιαννάτου ΕΔΙΠ του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών και του διδάκτορα Ευάγγελου Παούρη της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας, οι οποίοι μου έδωσαν τις πρώτες γνώσεις για την πρόγνωση του Διαστημικού καιρού που γίνεται καθημερινά στο κέντρο πρόγνωσης του Τμήματος Φυσικής, καθώς και τις συμβουλές τους στην μελέτη των γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδιάς την ομ. Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ελένη Μαυρομιχαλάκη, κύρια επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και την διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα Φυσικής. Θα ήθελα επίσης να την ευχαριστήσω για την δυνατότητα που μου έδωσε να συμμετέχω στην Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας και να εκπαιδευτώ στο Κέντρο Πρόγνωσης που λειτουργεί στο Σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, του οποίου είναι Επιστημονική Υπεύθυνη.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω και στον καθηγητή κ. Ιωάννη Δαγκλή καθώς και στην επίκ. καθηγ. και σύμβουλό μου κ. Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα για την βοήθεια και τις συμβουλές που μου προσέφεραν τόσο κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας όσο και στις διαλέξεις των μαθημάτων τους τα οποία παρακολούθησα. Η βοήθειά τους αυτή υπήρξε καταλυτική.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους, για την βοήθεια, την υποστήριξη και την κατανόηση που μου έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια της παρούσας εργασίας.

ABSTRACT

In our days the scientific and technological development has given us the ability to expand our horizons and discover valuable knowledge concerning Space Weather and generally the science of Space. An interesting system we need to consider is the dynamic system Sun-Earth, which is rich to phenomena, powerful or not. The offshoot of Space Science, Space Weather, is occupied this dynamic system. A substantial subject of Space Weather is the investigation of geomagnetic storms.

Space Weather is the total of all processings and phenomena that occur in the area of Earth's magnetosphere and around it. Most of these phenomena are born from processings that take place on the Sun and spread out to the interplanetary space, reaching the Earth and affect it's magnetosphere with various effects on and in it. Geomagnetic storms are the most intense of these phenomena and are powerful disturbances of the Earth's magnetosphere, both in its structure and in the intensity of its magnetic field. One effect is the influence on the satellite systems from these solar energetic structures and geomagnetic storms, with the result of malfunction or even destruction to the satellites' systems, facts that can cause much both in economic and in operating terms (e.g. navigating systems).

So it is reasonableness to someone ask if it's possible to forecast Space Weather, just like we forecast the Atmospheric Weather. This question is being investigated for many decades from the scientific community with much of useful results, such us the acquirement of scientific knowledge and technological development.

In this dissertation a statistical study of all geomagnetic storms of the solar cycles 23 and 24 was performed with the usage of data from ground monitors of the geomagnetic indices K_p and Dst. The aim of the dissertation is to investigate the distribution of geomagnetic storms with the use of both geomagnetic indices and to compare the results. The number, intensity and time of occurrence of the occurred storms were recorded and a comparison between the two cycles was done, as well as a study of their monthly and annual distribution for both geomagnetic indices.

Specifically, 1030 geomagnetic storms were recorded with K_p index while with Dst index 523 storms were recorded. This implies that half of the geomagnetic storms that were recorded did not reach the Equator level but only reached the high latitudes. That is, with K_p index we also recorded the low intensity storms that did not have the necessary specifications to reach the Equator.

At the end, the results and the conclusions are being presented, as well as the prospects arising for further research and study of all the above issues. The main ones are:

- a) The form of the storms distribution over the solar cycles, which seems to be slightly shifted to the solar cycles' maximum by 1-2 years, but it is quite clear in its form and in its relation to the solar cycle.
- b) The clear semiannual variation of geomagnetic activity, which shows us that geomagnetic activity is maximal at Equinoxes and minimal at Solstices (Russell and McPherron, 1973).
- c) The occurrence of low geomagnetic activity at solar cycle 24 which confirms the low activity of this cycle (Jiang et al., 2015 ; Svalgaard Leif et al., 2005).

In the first chapter introductory concepts for the Sun, solar activity and interplanetary space are being given. In the second chapter we give the characteristics of the structure and plasma of the Earth's magnetosphere. The third chapter deals with the pairing of Solar-Earth's magnetosphere systems and refers to Space Weather, the geomagnetic indices used to describe it and its forecasting methods. The forth chapter presents the processing of geomagnetic storms' data and the presentation of the results. Finally, in the fifth chapter we give the final conclusions of the processing, as well as the future prospects that appear from the results.

In the Appendix of this dissertation we refer the literature and related publications used throughout it, as well as the tables with all the geomagnetic storms recorded using the two geomagnetic indices.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας η επιστημονική και τεχνολογική ανάπτυξη μας έχει δώσει την δυνατότητα να διευρύνουμε τους ορίζοντές μας και να ανακαλύψουμε χρήσιμες γνώσεις όσον αφορά τον Διαστημικό Καιρό και γενικά την επιστήμη του Διαστήματος. Ένα πολύ ενδιαφέρον σύστημα που χρειάζεται να μελετήσουμε είναι το δυναμικό σύστημα Ηλίου-Γης, το οποίο είναι πλούσιο σε φαινόμενα, ισχυρά και μη. Με την μελέτη αυτού του συστήματος ασχολείται και ο κλάδος του Διαστημικού Καιρού (Space Weather). Ένας πολύ σημαντικός τομέας του Διαστημικού Καιρού είναι οι γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Ο Διαστημικός Καιρός είναι το σύνολο των διεργασιών και γεγονότων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της γήινης μαγνητόσφαιρας και γύρω από αυτήν. Τα γεγονότα αυτά προκαλούνται κυρίως από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο και διαδίδονται στον διαπλανητικό χώρο με την μορφή ενεργειακών δομών (π.χ. στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας) φθάνοντας στη Γη επηρεάζοντας έτσι την μαγνητόσφαιρά της, με ποικίλα αποτελέσματα. Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι τα ισχυρότερα απ'αυτά και αποτελούν ισχυρές διαταραχές της γήινης μαγνητόσφαιρας, τόσο στη δομή της όσο και στην ένταση του μαγνητικού πεδίου της. Ένα αποτέλεσμα είναι η επιρροή των δορυφορικών συστημάτων μας από αυτές τις ισχυρές ηλιακές ενεργειακές δομές και τις γεωμαγνητικές καταιγίδες, με αποτέλεσμα την μη ορθή λειτουργία τους ή ακόμα και την καταστροφή τους, γεγονότα που μπορούν να κοστίσουν αρκετά τόσο σε οικονομικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο (π.χ. συστήματα πλοήγησης).

Είναι επομένως εύλογο να θέσουμε το ερώτημα αν μπορούμε να προβλέψουμε την εμφάνιση και την ένταση των γεωμαγνητικών καταιγίδων και γενικά τον Διαστημικό Καιρό, όπως προβλέπουμε και τον Ατμοσφαιρικό Καιρό. Το ερώτημα αυτό ερευνάται εδώ και πολλές δεκαετίες από την επιστημονική κοινότητα και μας έχει βοηθήσει αρκετά, τόσο στην απόκτηση πολύτιμων επιστημονικών γνώσεων, όσο και στην τεχνολογική ανάπτυξή μας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια στατιστική μελέτη των γεωμαγνητικών καταιγίδων των ηλιακών κύκλων 23 και 24 με την χρήση δεδομένων από τους επίγειους μετρητές για τους γεωμαγνητικούς δείκτες K_p και Dst. Σκοπός της εργασίας είναι να γίνει μια διερεύνηση στην κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων με την χρήση και των δύο γεωμαγνητικών δεικτών και να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων. Καταγράφηκε ο αριθμός, η ένταση και η χρονική στιγμή των καταιγίδων και έγινε μια πρώτη σύγκριση μεταξύ των δύο ηλιακών κύκλων, καθώς και μελέτη της μηνιαίας και ετήσιας κατανομής τους στην διάρκεια των 22 μελετούμενων ετών και για τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες. Επιπλέον έχει γίνει μια

Πιο συγκεκριμένα, με τον δείκτη K_p καταγράφηκαν 1030 γεωμαγνητικές καταιγίδες, ενώ με τον δείκτη Dst καταγράφηκαν 523 καταιγίδες, περίπου το ήμισυ των γεωμαγνητικών καταιγίδων

απ'ότι καταγράφηκαν με τον δείκτη K_p . Αυτό δηλώνει ότι με τον δείκτη K_p καταγράφηκαν και οι μέτριες καταιγίδες (τύπου G1) οι οποίες ήταν σε αριθμό 675 και δεν είχαν τις απαραίτητες προδιαγραφές για να φτάσουν μέχρι το επίπεδο του Ισημερινού, αλλά παρέμειναν μέχρι τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Μελετώντας τις καταιγίδες σε μηνιαία και ετήσια βάση, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα αυτών των μελετών, καθώς και οι προοπτικές που προκύπτουν για περαιτέρω έρευνα και μελέτη. Τα κυριότερα απ'αυτά είναι :

α) η μορφή της κατανομής των καταιγίδων είναι καθαρά συσχετισμένη με την μορφή του εντεκαετούς κύκλου, η οποία όμως φαίνεται ελαφρώς μετατοπισμένη στα μέγιστα της ως προς τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων κατά 1-2 χρόνια.

β) η εποχιακή εξάμηνη μεταβολή της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, η οποία μας δείχνει ότι η γεωμαγνητική δραστηριότητα είναι μέγιστη κοντά στις Ισημερίες και ελάχιστη κοντά στα Ηλιοστάσια (Russell and McPherron, 1973).

γ) η εμφάνιση χαμηλής γεωμαγνητικής δραστηριότητας στον ηλιακό κύκλο 24 η οποία και επιβεβαιώνει την χαμηλή δραστηριότητα αυτού του κύκλου (Jiang et al., 2015 ; Svalgaard Leif et al., 2005).

Η εργασία αυτή αποτελείται από έξι κεφάλαια, τη βιβλιογραφία και το παράρτημα. Στο πρώτο κεφάλαιο δίδονται εισαγωγικές έννοιες για τον Ήλιο, την ηλιακή δραστηριότητα και τον διαπλανητικό χώρο. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται τα χαρακτηριστικά της δομής της γήινης μαγνητόσφαιρας και του πλάσματός της. Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται η σύζευξη των δύο συστημάτων Ηλίου-Γήινης μαγνητόσφαιρας και γίνεται αναφορά στον Διαστημικό Καιρό, τους γεωμαγνητικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του καθώς και τις μεθόδους πρόβλεψής του. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία των δεδομένων για τις γεωμαγνητικές καταιγίδες και στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο δίνονται τα γενικά συμπεράσματα της επεξεργασίας, καθώς και οι προοπτικές που εμφανίζονται.

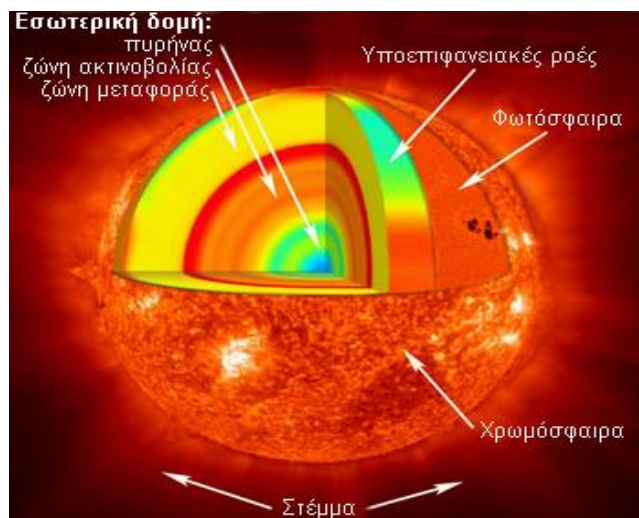
Στη συνέχεια αναφέρεται η βιβλιογραφία και οι σχετικές δημοσιεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας, και στο Παράρτημα δίνονται οι πίνακες των γεωμαγνητικών καταιγίδων που καταγράφηκαν με την βοήθεια των δύο γεωμαγνητικών δεικτών K_p και Dst.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

1.1 Ήλιος

Ο Ήλιος είναι ένας νάνος αστέρας της κύριας ακολουθίας, φασματικού τύπου G2V. Η σύστασή του είναι : 74% H, 25% He και 1% από βαρύτερα μέταλλα, όπως Fe, Ca κτλ (Akasofu and Charman, 1972). Είναι εύκολα παρατηρούμενος από την Γη λόγω της εγγύτητάς του σ' αυτήν, γι' αυτό και η μελέτη του έχει παίξει καθοριστικό παράγοντα στον τομέα της Αστροφυσικής-Αστρονομίας, καθώς και στον τομέα της Πυρηνικής φυσικής και των Στοιχειωδών Σωματιδίων. Η μελέτη του παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς μας επηρεάζει άμεσα και έμμεσα στη ζωή μας. Είναι κύρια η πηγή ενέργειας της επιφάνειας της Γης, γι' αυτό και στα αρχαία χρόνια ονομαζόταν Ζωοδότης Ήλιος. Η λαμπρότητά του είναι $3,86 \times 10^{23}$ kW και η θερμοκρασία της επιφάνειάς (φωτόσφαιρας) του είναι 5780 K. Βρίσκεται σε αέρια κατάσταση και σήμερα δεχόμαστε ότι αποτελείται από τα εξής στρώματα: 1) τον πυρήνα, 2) την ζώνη ακτινοβολίας, 3) την ζώνη μεταφοράς, 4) την φωτόσφαιρα η οποία αποτελεί και την επιφάνειά του, 5) την χρωμόσφαιρα και 6) το στέμμα, το οποίο εκτείνεται προς τα έξω και λόγω της συνεχούς εκτόνωσής του δεν μπορούμε να του αποδώσουμε ένα σαφές τερματικό όριο. Η δομή του φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 1.1.



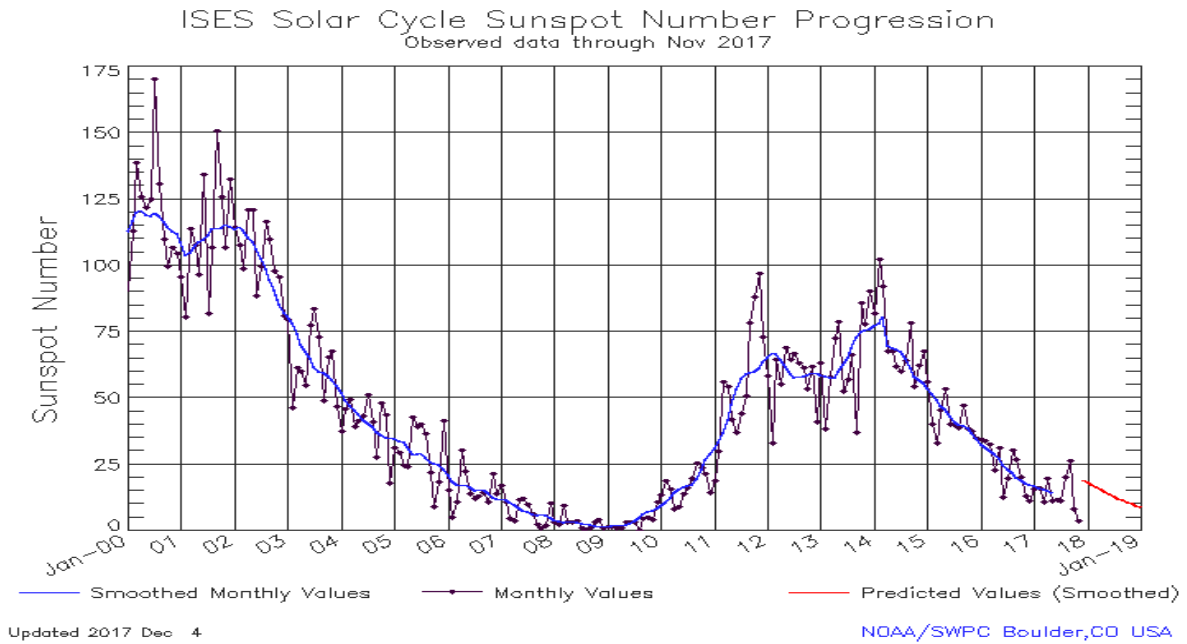
Εικόνα 1.1 Εσωτερική δομή του Ήλιου

Η ηλικία του Ήλιου είναι $4,6 \times 10^9$ έτη και η απόστασή του από την Γη είναι 1 AU ή 150×10^9 m. Η ακτινοβολία του Ήλιου, που προέρχεται από το εσωτερικό του και την επιφάνειά του, είναι

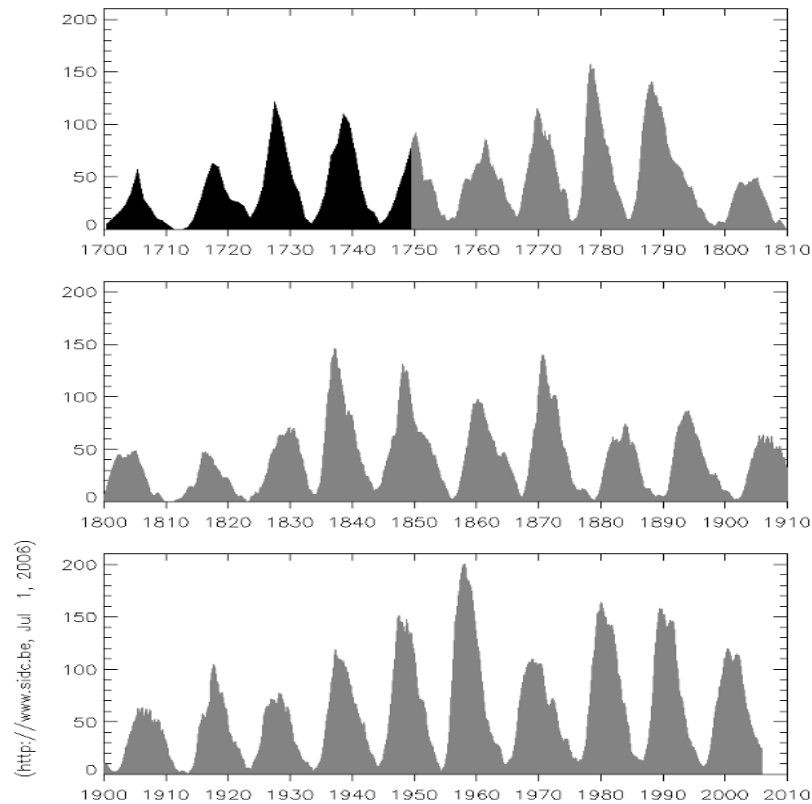
ένα συνεχές φάσμα εκπομπής με μέγιστο μήκος κύματος $\lambda_{\max}=700$ nm. Η ακτινοβολία αυτή μας δίνει τις πληροφορίες για τα συμβάντα στον Ήλιο. Η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία για να φτάσει την Γη είναι 1 AU, και κάνει 8 λεπτά για να φθάσει στην επιφάνειά της.

Σήμερα δεχόμαστε ότι ο Ήλιος αντλεί την ενέργειά του από την σύντηξη του He στον πυρήνα του, σύμφωνα με την αντίδραση αλυσίδας πρωτονίου-πρωτονίου. Η σύντηξη αυτή παράγει ισχύς περίπου με 380×10^{24} W. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται από τον πυρήνα προς το εξωτερικό του Ήλιου με την μορφή ακτινοβολίας (φωτόνια). Τα φωτόνια αυτά, αφού εξέλθουν ύστερα από δεκάδες χιλιάδες χρόνια από την ζώνη ακτινοβολίας, λόγω του μεγάλου οπτικού βάθους της, εξέρχονται στην ατμόσφαιρα και το εξωτερικό του Ήλιου και το θερμαίνουν. Η θέρμανση αυτή, σε συνεργασία με την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του Ήλιου σύμφωνα με την θεωρία του Babcock και την αλληλεπίδρασή του με την αύξηση της θερμοκρασίας, δημιουργεί τα διάφορα φαινόμενα στην επιφάνεια του Ήλιου (όπως κηλίδες, πόρους, εκλάμψεις, στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας, στεμματικές οπές κ.α.), μερικά από τα οποία θα μελετήσουμε στην συνέχεια. Η ροή ακτινοβολίας του Ήλιου σε απόσταση 1 AU (στη τροχιά της Γης) είναι 1367 W/m^2 και μεταβάλλεται μόνο σε τάξη 0.1 % στην διάρκεια ενός 11-ετή ηλιακού κύκλου (Frohlich, 2006). Οι μεταβολές αυτές όμως μπορούν να είναι πολύ μεγαλύτερες σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Εφόσον συγκεκριμένες ακτινοβολίες, όπως είναι οι υπεριώδεις UV και EUV, έχουν μεγάλη επίδραση στην γήινη ιονόσφαιρα και ατμόσφαιρα, αντιλαμβάνεται κανείς την σημαντικότητα της μελέτης των μεταβολών αυτών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι μακροχρόνιες μελέτες του Ήλιου ξεκίνησαν από τον 17^ο αιώνα και μέχρι σήμερα μας έχουν δώσει σημαντικές πληροφορίες για την δραστηριότητά του, όπως για παράδειγμα για τον 11-ετή ή 22-ετή ηλιακό κύκλο. Το μαγνητικό πεδίου του Ήλιου αναστρέφεται κάθε 11 χρόνια από Βορρά σε Νότο και ανάποδα, και επανέρχεται στην αρχική του πολικότητα κάθε 22 χρόνια. Γι'αυτό και ο κύκλος μπορεί να χαρακτηρηστεί 11-ετής ή 22-ετής. Η αναστροφή αυτή δημιουργεί έντονα φαινόμενα στην ηλιακή ατμόσφαιρα, όπως ηλιακές εκλάμψεις, τα οποία εξηγούνται από την θεωρία του Babcock. Ο κύκλος αυτός προσδιορίζεται από την διακύμανση της έντασης των φαινομένων του, όπως για παράδειγμα τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων. Στην εικόνες 1.2 και 1.3 φαίνονται ο μισός τελευταίος ηλιακός κύκλος (23^{ος}) καθώς και ο 24^{ος} που έχει ήδη ξεκινήσει από το τέλος του 2008 και βρισκόμαστε αυτή τη στιγμή (2017) στην καθοδική φάση του και όλοι οι 23 καταγεγραμμένοι ηλιακοί κύκλοι από το 1700 μ.Χ. . Οι ηλιακοί κύκλοι μετρήθηκαν με βάση τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων.



Εικόνα 1.2 Ο μισός 23^{ος} και ο 24^{ος} ηλιακός κύκλος (<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/>)



Εικόνα 1.3 Οι 23 καταγεγραμμένοι ηλιακοί κύκλοι (Boethmer and Daglis, *Space Weather*, 2007)

1.1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Τα ηλιακά φαινόμενα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες :

i) στα φαινόμενα του **ήρεμου Ήλιου**, όπως είναι η συνεχής εκπομπή ακτίνων-Χ και υπεριώδης ακτινοβολίας από το θερμό στέμμα, η συνεχής ροή ηλιακού πλάσματος (ηλιακού ανέμου) προς τον διαπλανητικό χώρο από το ηλιακό στέμμα, η συνεχής εκπομπή ορατής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του Ήλιου, οι πόροι, οι στεμματικές οπές κτλ.

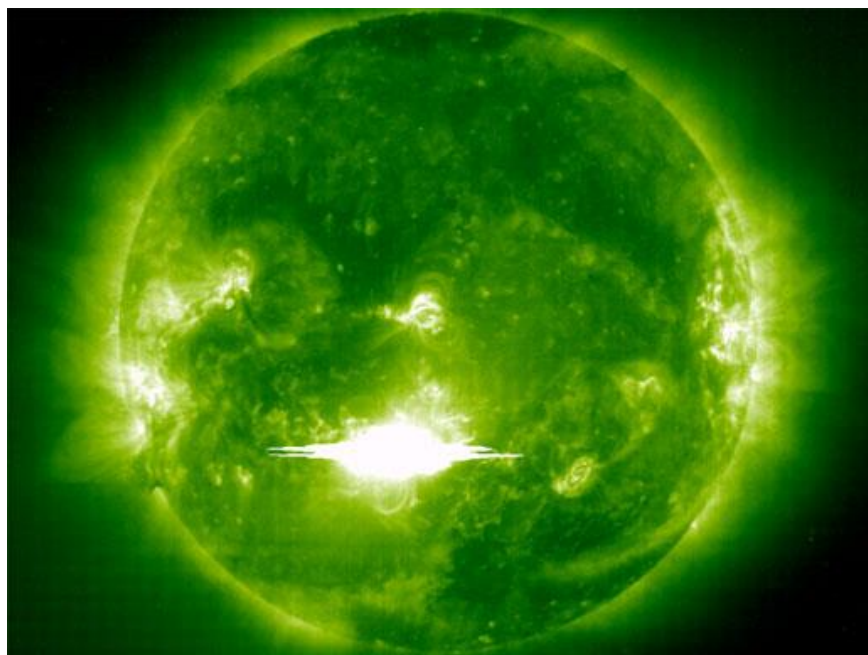
ii) στα φαινόμενα του **δραστήριου Ήλιου**, που είναι περιστασιακά εκρηκτικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην ηλιακή ατμόσφαιρα, όπως οι εκλάμψεις, οι ηλιακές κηλίδες και οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (ΣΕΜ ή CMEs).

1.1.1.1 Εκλάμψεις

Η σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι συνεχώς σταθερή στην επιφάνεια του Ήλιου, όταν δεν υπάρχουν εκρηκτικά φαινόμενα (ήρεμος Ήλιος), ενώ αλλάζει δραματικά στις περιοχές της επιφάνειάς του που εμφανίζονται εκρηκτικά φαινόμενα, όπως οι **εκλάμψεις**.

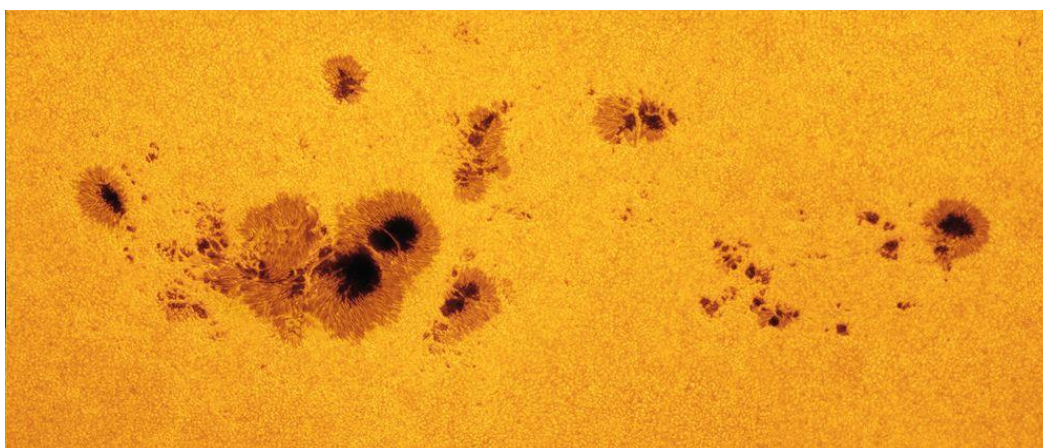
Οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares) είναι αιφνίδια εκρηκτικά φαινόμενα στην ηλιακή ατμόσφαιρα που αυξάνουν τρομερά την λαμπρότητα της περιοχής στην οποία λαμβάνουν χώρα. Εκλύουν ενέργεια στην περιοχή μεταξύ 10^{29} και 10^{32} ergs. Οι διαστάσεις της είναι συνήθως μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ενώ μια μεγάλη έκλαμψη μπορεί να φτάσει μέχρι και 10^5 km σε μέγεθος. Κατά την διάρκειά της ηλιακά σωματίδια (πρωτόνια, ηλεκτρόνια, ιόντα) επιταχύνονται προς το εξωτερικό και εσωτερικό του Ήλιου, φτάνοντας καμιά φορά και στην Γήινη μαγνητόσφαιρα ακολουθώντας τις ανοικτές μαγνητικές γραμμές του ηλιακού μαγνητικού πεδίου οι οποίες φτάνουν μέχρι την γήινη μαγνητοσφαιρα, όπου και εκτρέπονται από την πορεία της δομής του γήινου μαγνητικού πεδίου. Εάν οι ενέργειες των σωματιδίων αυτών είναι μεγάλες, μπορούν να δημιουργήσουν διάφορα φαινόμενα στην γήινη μαγνητόσφαιρα, όπως τα σελάη κυρίως στους πόλους, ενώ σπάνια μπορούν να ξεπεράσουν και το γήινο μαγνητικό πεδίο και να εισέλθουν στην γήινη ατμόσφαιρα.

Κατά την διάρκεια μιας έκλαμψης εκπέμπεται μεγάλης έντασης ακτινοβολία σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και κυρίως την περιοχή H α , στις ακτίνες Χ, τις ακτίνες γ, αλλά και στην περιοχή των ραδιοκυμάτων. Για παράδειγμα κατά την διάρκεια μιας έκλαμψης αυξάνεται απότομα η εκπομπή ακτίνων Χ στην περιοχή της έκλαμψης, και έτσι μπορούμε εύκολα να την εντοπίσουμε στην ηλιακή επιφάνεια.

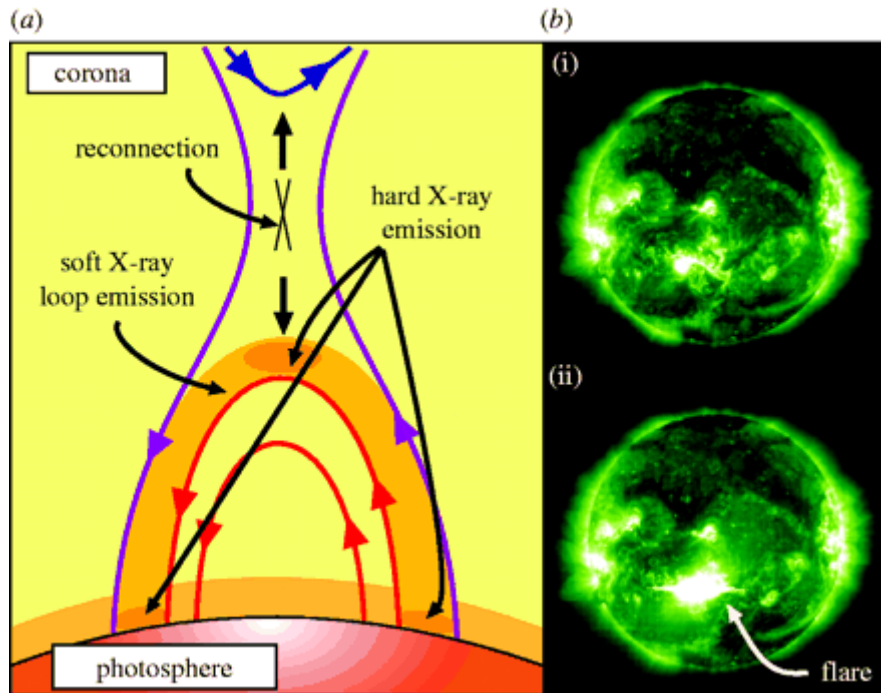


Εικόνα 1.4 Ηλιακή έκλαμψη (<http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery>)

Οι εκλάμψεις εμφανίζονται στις περιοχές διαταραγμένου ηλιακού μαγνητικού πεδίου λόγω αναδίπλωσης και συνεχούς ανύψωσης των μαγνητικών δυναμικών γραμμών (θεωρία Babcock) και δημιουργούνται από την απότομη απελευθέρωση της συσσωρευμένης μαγνητικής ενέργειας της περιοχής. Στην αρχή οι αναδιπλωμένες μαγνητικές γραμμές δημιουργούν μια κηλίδα ή μια ομάδα κηλίδων (εικόνα 1.5), και στην συνέχεια, από μια αστάθεια στην περιοχή, γίνεται σπάσιμο και επανασύνδεση των δυναμικών αυτών γραμμών σε ένα σημείο (X-point) και απελευθερώνεται απότομα η συσσωρευμένη ενέργεια (εικόνα 1.6)



Εικόνα 1.5 Ομάδα ηλιακών κηλίδων στην επιφάνεια του Ήλιου

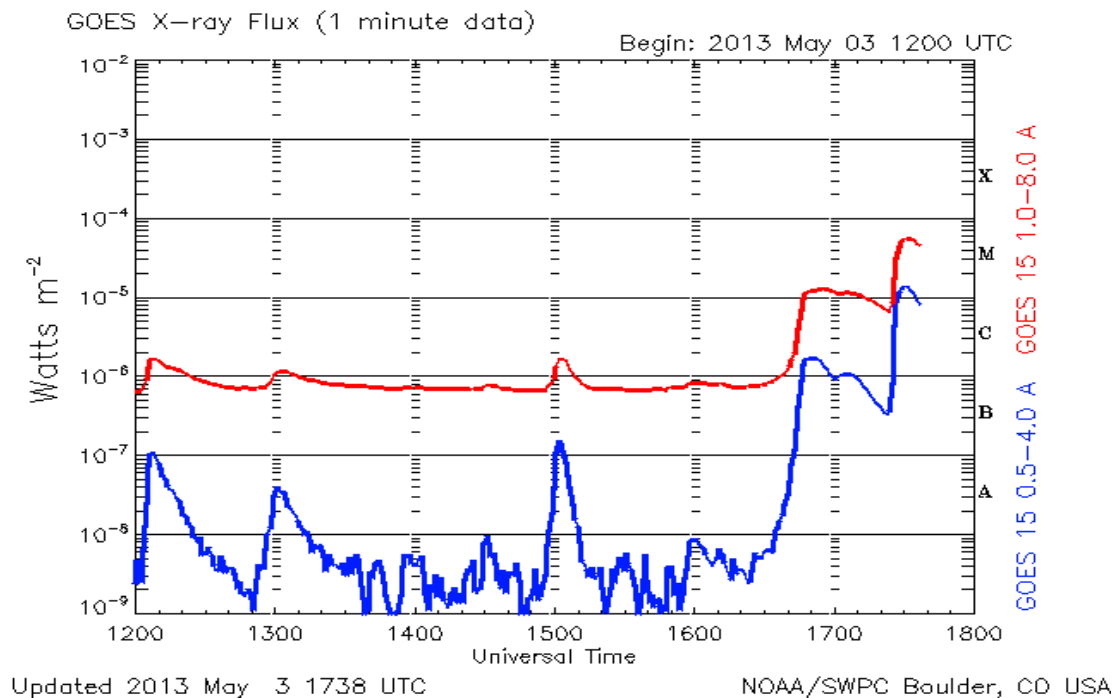


Εικόνα 1.6 Απεικόνιση επανασύνδεσης των μαγνητικών γραμμών και δημιουργία εκρηκτικού φαινομένου κατευθυνόμενου προς τα πάνω
(<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/366/1884/4489>)

Η θερμοκρασία του ηλιακού πλάσματος στην περιοχή αυξάνει απότομα, και μπορεί να φτάσει μέχρι και 10^8 K. Λόγω αυτής της θέρμανσης έχουμε εκπομπή ακτίνων γ και X.

Οι εκλάμψεις ταξινομούνται σε 5 τάξεις μεγέθους: A, B, C, M και X. Η ταξινόμηση γίνεται με βάση την ροή τους στις ακτίνες X σε W/m^2 . Η κλίμακα αυτή είναι λογαριθμική, οπότε η κάθε τάξη χαρακτηρίζει μια έκλαμψη 10 φορές ισχυρότερη από μια έκλαμψη της αμέσως προηγούμενης τάξης. Η κάθε τάξη χωρίζεται σε 9 διαβαθμίσεις, από το 1 μέχρι το 9. Για παράδειγμα μια έκλαμψη M3 είναι 3 φορές ισχυρότερη από μια έκλαμψη M1 κτλ. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται στην περιοχή των ακτίνων X από τους δορυφόρους GOES. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα μιας M5 έκλαμψης (3 Μαΐου 2013).

Η κάθε τάξη και διαβάθμιση καθορίζεται και από το μέγιστο της ροής ενέργειας της έκλαμψης. Για παράδειγμα μια έκλαμψη X4 έχει μέγιστο ροής $4 \times 10^{-5} \text{W/m}^2$. Μια έκλαμψη M7 έχει μέγιστο $7 \times 10^{-6} \text{W/m}^2$ κτλ.



Εικόνα 1.7 Ηλιακή έκλαμψη M5, Μάιος 2013 (<http://www.swpc.noaa.gov/today.html>)

Μια ηλιακή έκλαμψη χωρίζεται σε τρία χρονικά στάδια κατά χρονική σειρά :

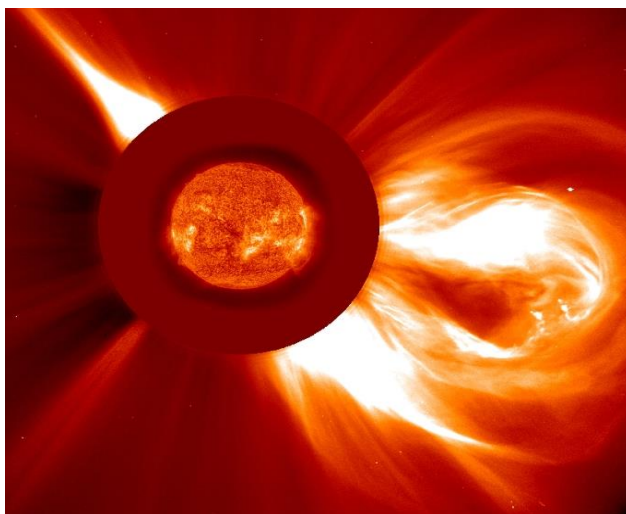
- i) **Το πρόδρομο στάδιο** ή στάδιο προ-έκλαμψης (precursor stage), όπου ενεργοποιείται ο μηχανισμός απελευθέρωσης της συσσωρευμένης μαγνητικής ενέργειας και της εμφάνισης της έκλαμψης. Στο στάδιο αυτό γίνεται εκπομπή H/M ακτινοβολίας στην περιοχή των μαλακών ακτίνων Χ.
- ii) **Το εκρηκτικό στάδιο** (impulsive stage), όπου γίνεται η απελευθέρωση της συσσωρευμένης ενέργειας και κατ'επέκταση η επιτάχυνση και απελευθέρωση φορτισμένων σωματιδίων σε μεγάλες ενέργειες, της τάξης του 1 MeV, που μπορεί πολύ σπάνια να φτάσει και 1 GeV. Εδώ έχουμε εκπομπή ακτινοβολίας κυρίως στις περιοχές των σκληρών ακτίνων Χ, των ακτίνων γ και των ραδιοκυμάτων.
- iii) **Το στάδιο επαναφοράς** (recovery stage), όπου έχουμε βαθμιαία επαναφορά στην ήρεμη κατάσταση. Εδώ έχουμε εκπομπή μαλακών ακτίνων Χ.

Τα τρία αυτά στάδια μπορούν να διαρκέσουν συνολικά από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και μια ώρα. Η θερμοκρασία του πλάσματος στην περιοχή αυτή υπολογίζεται από την εκπεμπόμενη από αυτό ακτινοβολία μαλακών ακτίνων Χ. Μπορεί να φτάσει από 10^7 μέχρι και 10^8 K.

1.1.1.2 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη στην ανθρωπότητα δεν άφησε ανεπηρέαστο τον κλάδο των στεμματογράφων, αφού με την βοήθειά τους έχουμε μελετήσει αρκετά το ηλιακό στέμμα τα τελευταία χρόνια. Αυτές οι μελέτες φανέρωσαν, εκτός των άλλων, και ένα εκρηκτικό φαινόμενο που συμβαίνει στο στέμμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **στεμματική εκτίναξη μάζας (coronal mass ejection-CME)** και είναι η απότομη εκτίναξη τεράστιας ποσότητας υλικού πλάσματος (ύλης) από το ηλιακό στέμμα προς τον διαπλανητικό χώρο.

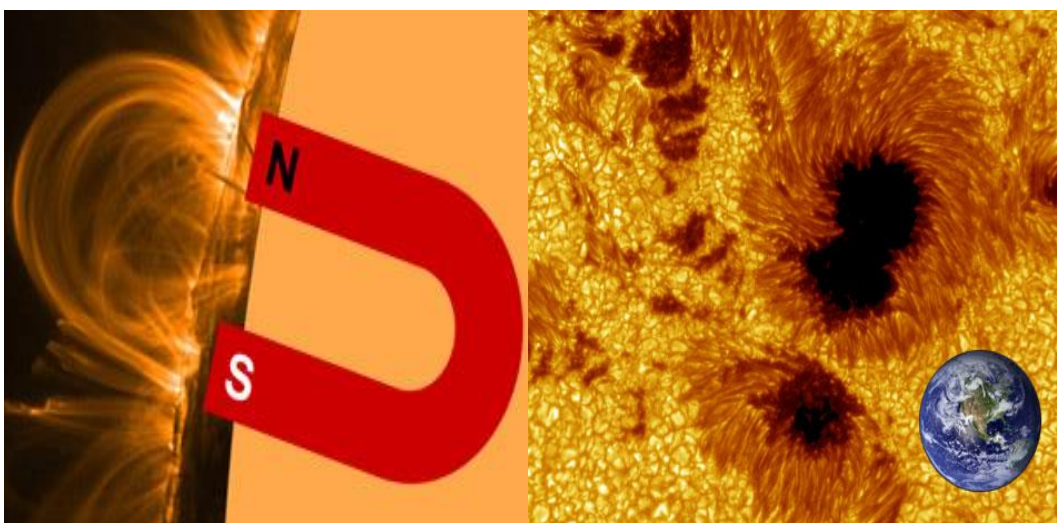
Το υλικό που εκτοξεύεται προέρχεται από το ίδιο το στέμμα, στο οποίο ήταν και παγιδευμένα τα μαγνητικά κορδόνια που περνάνε από την περιοχή του στέμματος. Καθώς γίνεται αυτή η απότομη εκτίναξη υλικού (εικόνα 1.8) το υλικό συμπαρασέρνει το ισχυρό διαταραγμένο μαγνητικό πεδίο μαζί του, και έτσι καθώς απομακρύνεται από τον Ήλιο αποκτάει την μορφή φουσαλίδας ή αλλιώς μαγνητικής φιάλης (flux tubes), έχοντας εγκλωβίσει μέσα του “παγωμένο” ένα ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο. Τα χαρακτηριστικά μιας CME είναι η ταχύτητά της (Linear speed), το γωνιακό της εύρος (angular width) και η γωνία κεντρικής θέσης της (Central PA) πάνω στον ηλιακό δίσκο. Οι ταχύτητες των CMEs μπορούν να είναι από ≈ 500 km/s (αρκετά ήρεμες) μέχρι και 3000 km/s (πολύ ισχυρές). Η μάζα τους κυμαίνεται από 10^{12} g μέχρι και 10^{17} g, ενώ η ενέργειά τους κυμαίνεται από 10^{27} μέχρι και 10^{33} ergs (Gopalswamy, 2004). Η χρονική τους διάρκεια είναι μεγαλύτερη των εκλάμψεων, φτάνοντας μέχρι και τις 2 ώρες. Βέβαια, η πορεία τους στον διαπλανητικό χώρο διαρκεί αρκετές ημέρες. Στην τροχιά της Γης φτάνουν συνήθως μέσα σε 1-3 ημέρες, ανάλογα με την ταχύτητά τους.



Εικόνα 1.8 Μια CME που εκτοξεύεται από τον Ήλιο και καταγράφεται από τον στεμματογράφο του SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>)

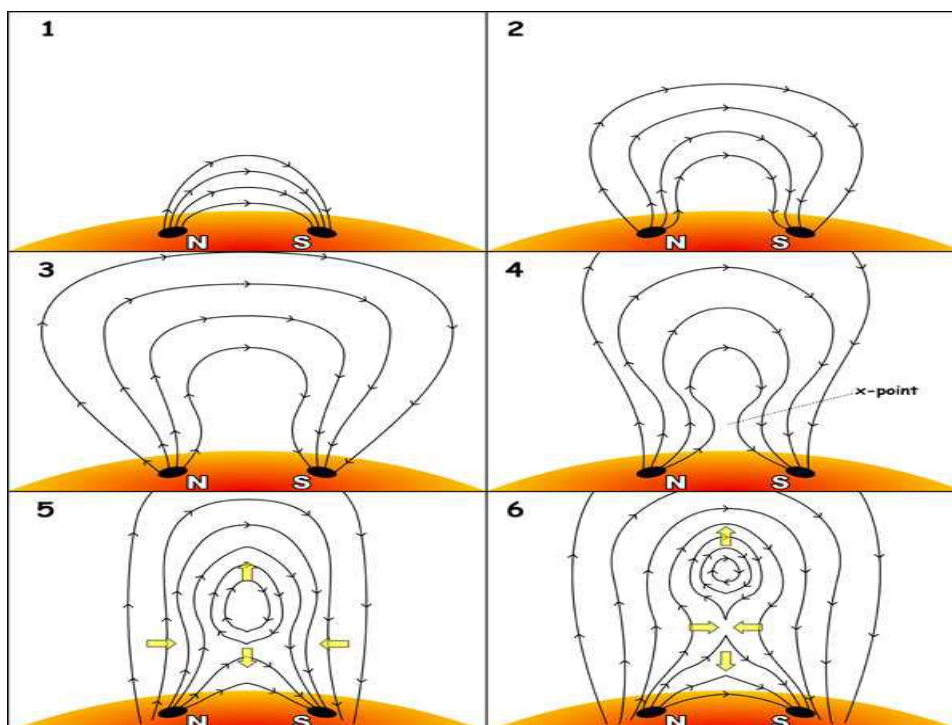
Ο Forbes (2000) παρέχει μια σύνοψη των διαφόρων ιδεών που έχουν προταθεί για να εξηγήσουν την δημιουργία των CMEs. Σήμερα, η πιο αποδεκτή θεωρία δημιουργίας μιας CME αναφέρει ότι προκαλούνται από αστάθειες ή γενικά ελλείψεις ευστάθειας του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού στέμματος. Η δημιουργία τους βρίσκεται στην επανασύνδεση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών του Ήλιου, όπως ακριβώς γίνεται και στις εκλάμψεις. Όπως αναδύονται οι μαγνητικές γραμμές από το εσωτερικό του Ήλιου (θεωρία Barcock) συστρέφονται μεταξύ τους και δημιουργούν μεγαλύτερες δομές, τα μαγνητικά κορδόνια.

Οι αστάθειες στις περιοχές δημιουργίας μιας CME δημιουργούνται από την συνεχή ανάδυση και συστροφή μαγνητικών κορδονιών μεταξύ τους από την ζώνη μεταφοράς του Ήλιου. Καθώς ανέρχονται, δημιουργούν ενεργές περιοχές στην επιφάνεια του Ήλιου, τις κηλίδες, οι οποίες είναι συνήθως σε ζευγάρια με αντίθετη πολικότητα ή μια από την άλλη (εικόνα 1.9), και άλλες φορές είναι περισσότερες, με συνολικό όμως μαγνητικό πεδίο 0.



Εικόνα 1.9 Ηλιακές κηλίδες που έχουν αντίθετη πολικότητα στο μαγνητικό τους πεδίο. Δεξιά συγκρίνεται το μέγεθος των κηλίδων αυτών με το μέγεθος της Γης.

Έτσι, με την ανάδυση και συστροφή των μαγνητικών κορδονιών, αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις στα κορδόνια αυτά, και κάποια στιγμή η ισορροπία μαγνητικής τάσης και μαγνητικής πίεσης χάνεται, με την μαγνητική τάση να υπερτερεί και έτσι να έχουμε μια απότομη έκρηξη και απελευθέρωση της μαγνητικής ενέργειας και του πλάσματος στην περιοχή του στέμματος. Αυτό που στην ουσία γίνεται είναι μια απότομη επανασύνδεση των μαγνητικών δυναμικών σε ένα σημείο (X-point) και απότομη επιτάχυνση υλικού προς τα πάνω και κάτω αλλά και απότομη αύξηση της θερμοκρασίας (άρα και της λαμπρότητας) του πλάσματος στην περιοχή αυτή (εικόνα 1.10).



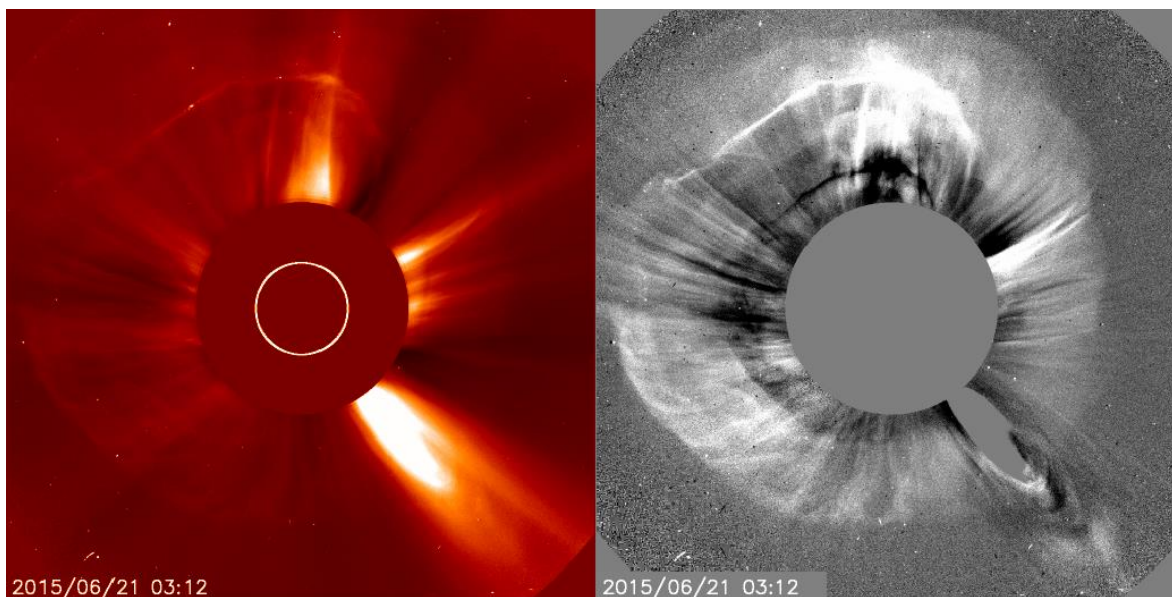
Εικόνα 1.10 Διαδικασία δημιουργίας μιας CME από τον μηχανισμό επανασύνδεσης των μαγνητικών δυναμικών γραμμών σε ένα σημείο (X-point) (<http://www.astro.wisc.edu/~clinch/>)

Βλέπουμε δηλαδή ότι οι CMEs έχουν παρόμοιο μηχανισμό δημιουργίας με τις εκλάμψεις. Μεταξύ τους βέβαια δεν υπάρχει σαφής σύνδεση, αν και έχουμε διαπιστώσει μια ασθενή εξάρτησή τους από τις εκλάμψεις, αλλά δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμα επίσημα. Προς το παρόν ισχύει η άποψη ότι η έκλαμψη ούτε γεννάει, αλλά ούτε και γεννάται άμεσα από μια CME.

Οι περισσότερες CMEs δημιουργούνται κοντά στον ισημερινό του Ήλιου (Yashiro et al., 2005). Οι CMEs που κατευθύνονται μετωπικά προς την Γη δίνουν την αίσθηση ότι είναι μεγαλύτερες από αυτόν καθώς έρχονται προς εμάς, και φαίνονται σαν να δημιουργούν μια άλω γύρω από αυτόν (κάτι σαν φωτεινό δαχτυλίδι), και γι'αυτό ονομάζονται **Halo CMEs** (εικόνα 1.11). Βλέπουμε δηλαδή τον Ήλιο μέσα από αυτές καθώς μας έρχονται μετωπικά, και αυτό συμβαίνει γιατί είναι αρκετά αραιές. Επομένως η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να περάσει από μέσα τους σχεδόν ανέπαφη.

Συνήθως κάνουν 2-3 μέρες να φτάσουν στην Γη, και είναι οι μόνες που δημιουργούν διαταραχές στην μαγνητόσφαιρά της καθώς μόνο αυτές έρχονται σε επαφή μαζί της. Τα

φορτισμένα σωματίδια από τις εκλάμψεις ή από τον μεσοαστρικό χώρο απλά παγιδεύονται και εξέρχονται της γήινης μαγνητόσφαιρας.



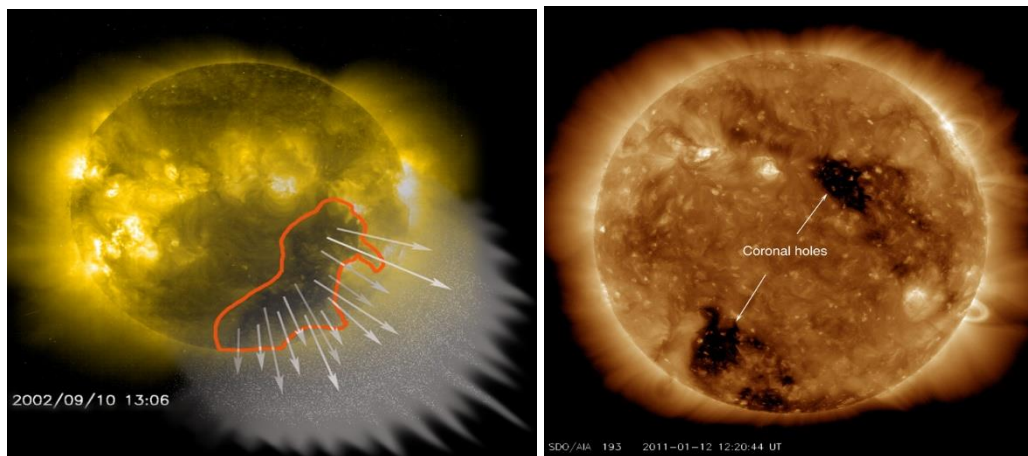
Εικόνα 1.11 Δύο όψεις μιας Halo CME από το όργανο LASCO C2 του SOHO που φωτογραφήθηκε την στιγμή που εκτοξεύτηκε

1.1.1.3 Στεμματικές Οπές

Από τον Ήλιο εξέρχεται συνεχώς υλικό (φορτισμένα σωματίδια) προς τα έξω, ως αποτέλεσμα της συνεχούς εκτόνωσης του στέμματός του (Πρέκκα, Δανέζης, Θεοδοσίου, Καργιολάκη 2009). Το υλικό αυτό ονομάζεται ηλιακός άνεμος, και θα αναλυθεί παρακάτω. Έχουμε παρατηρήσει ότι ο ηλιακός άνεμος έχει περίπου σταθερή ταχύτητα κατά την διάρκεια του 11-ετή ηλιακού κύκλου, από τις μη ενεργές περιοχές του. Έχουμε όμως παρατηρήσει ότι υπάρχουν κάποιες περιοχές στο στέμμα του Ήλιου, από τις οποίες εξέρχεται ταχύς ηλιακός άνεμος (με ταχύτητες ≈ 800 km/s σε απόσταση 1 AU από τον Ήλιο). Οι περιοχές αυτές συναντώνται κυρίως προς τους ηλιακούς πόλους και ονομάζονται **στεμματικές οπές (coronal holes)**.

Οι στεμματικές οπές είναι σκοτεινές (άρα ψυχρές, σε σχέση με το περιβάλλον τους) περιοχές του στέμματος, όπου εκεί κυριαρχούν ανοικτές μαγνητικές γραμμές οι οποίες κατευθύνονται από το εσωτερικό του Ήλιου προς τον διαπλανητικό χώρο (εικόνα 1.12). Είναι κάτι σαν “τρύπες” στο στέμμα, δεδομένου ότι εκεί η πυκνότητα του ηλιακού πλάσματος είναι κατά πολύ μικρότερη της γύρω περιοχής. Ουσιαστικά οι μαγνητικές γραμμές ξεκινούν από τον έναν πόλο (ημισφαίριο) του Ήλιου και δεν καταλήγουν (κλείνουν) στον άλλον, αλλά συνεχίζουν την

πορεία τους προς τον διαπλανητικό χώρο. Αυτές οι γραμμές επιταχύνουν κατά μήκος τους τα φορτισμένα ηλιακά σωματίδια, επομένως ο ηλιακός άνεμος εκεί να είναι ταχύτερος από τον άνεμο που εξέρχεται από το στέμμα του Ήλιου.



Εικόνα 1.12 Στεμματική σπή φωτογραφημένη από το διαστημόπλοιο SDO (καλλιτεχνική και πραγματική απεικόνιση)
(<https://sohowww.nascom.nasa.gov/pickoftheweek/old/12sep2002/index.html>)

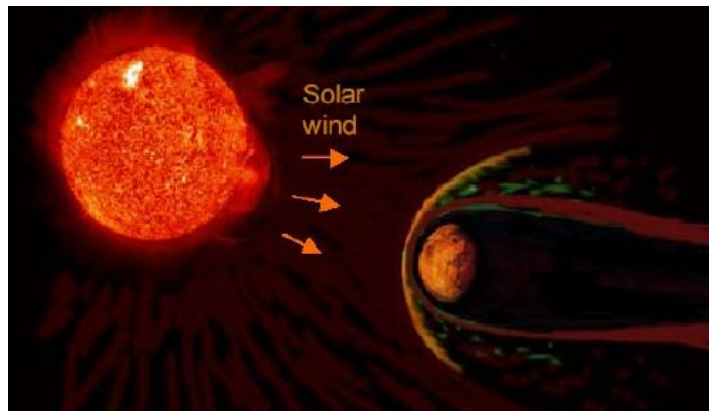
1.2 ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

1.2.1 Ηλιακός άνεμος

Η ιστορία της ανακάλυψης και παρατήρησης του ηλιακού ανέμου ξεκινάει την 5^η δεκαετία του 20^{ου} αιώνα, όπου οι Charman και Ferraro θεωρούσαν ότι ο Ήλιος εκπέμπει προς τα έξω φορτισμένα σωματίδια και πλάσμα μόνο κατά την διάρκεια εκλάμψεων, και ότι ο διαπλανητικός δεν είχε τίποτε άλλο εκτός από αυτά τα λίγα νέφη πλάσματος. Και όμως, μέσω των κομητών ήρθε η αντίθεση στην θεωρία αυτή, καθώς οι ουρές των κομητών δεν είναι τελείως ακτινικές σε σχέση με τον Ήλιο και την πορεία του κομήτη, αλλά αποκλίνει μερικές μοίρες από την ακτινική διεύθυνση. Η εξήγηση στην απόκλιση αυτή ήρθε με την ύπαρξη του ηλιακού ανέμου (Hoffmeister, 1943; 1944), ο οποίος καθορίζει το σχήμα της ουράς των κομητών.

Όπως είπαμε και πριν Ήλιος εκτονώνεται συνεχώς προς τον διαπλανητικό χώρο. Το υλικό που στέλνει προς τα έξω ο Ήλιος αποτελείται από ενεργητικά σωματίδια (φορτισμένα ή μη), καθώς και από υλικό (πλάσμα). Όλες αυτές οι υλικές ποσότητες απαρτίζουν τον **ηλιακό άνεμο**, που ονομάστηκε έτσι γιατί ο Ήλιος είναι σαν να τον “φυσάει” συνεχώς προς τα έξω.

Ο ηλιακός άνεμος έχει κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την ηλιακή δραστηριότητα. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια μιας CME ο ηλιακός άνεμος που “χτυπιέται” από την CME, επιταχύνεται. Ενώ όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ελάχιστό του, ο ηλιακός άνεμος έχει συνεχή και σχετικά χαμηλή ταχύτητα.



Εικόνα 1.13 Ο Ηλιακός άνεμος

Τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου είναι τα εξής (Gazis, 1996; Schwenn, 1990; Srivastana et al., 2000) : Έχει ταχύτητα ≈ 400 km/s και ως εκ τούτου κάνει ≈ 4 ημέρες να φτάσει στην Γη. Μεταφέρει μαζί του “παγωμένο” το ηλιακό μαγνητικό πεδίο, γι’ αυτό και επηρεάζει το σχήμα, αλλά και την ένταση της γήινης μαγνητόσφαιρας. Η μεταφορά αυτή συμβαίνει λόγω της εξαιρετικά υψηλής αγωγιμότητας του ηλιακού πλάσματος (ηλιακού ανέμου) και ταυτόχρονα των υψηλών του ταχυτήτων στον διαπλανητικό χώρο.

Αυτό σημαίνει ότι από την εξίσωση μεταφοράς διάχυσης (Longair, 1990) :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \vec{B}$$

όπου ο πρώτος όρος στο δεξί σκέλος αναφέρεται στην μεταφορά του μαγνητικού πεδίου και ο δεύτερος όρος στην διάχυσή του, διαπιστώνουμε ότι λόγω μεγάλης αγωγιμότητας του πλάσματος ($\sigma \gg$) ο όρος της διάχυσης γίνεται αμελητέος, επομένως κυριαρχεί ο όρος της μεταφοράς του $B_{\text{Ηλίου}}$ από τον ηλιακό άνεμο (ΗΑ).

Ο ηλιακός άνεμος μπορεί να διαχωριστεί σε δύο γενικές κατηγορίες :

i) τον **αργό ηλιακό άνεμο (ή αλλιώς ήσυχος ηλιακός ρεύμα)**, που έχει ταχύτητες $\approx 250-400$ km/s και πυκνότητα 8 ions/cm^3 σε απόσταση 1 AU από τον Ήλιο. Προέρχεται από τον ηλιακό μαγνητικό ισημερινό, κυρίως κατά το ηλιακό ελάχιστο, ενώ η προέλευσή του συναντάται και στις στεμματικές οπές, απ’ όπου μπορεί να επιταχυνθεί και να φτάσει και τα 800 km/s. Είναι

έντονα μεταβλητός και τυρβώδης, ενώ συνήθως στο εσωτερικό του εμφανίζει δομές μεγάλης κλίμακας, όπως κρουστικά κύματα που θα αναλύσουμε παρακάτω.

ii) το **γρήγορο ηλιακό άνεμο** (ή **αλλιώς διαταραγμένο ηλιακό ρεύμα**), που έχει ταχύτητες πάνω από 800km/s και πυκνότητα 3 ions/cm^3 σε απόσταση 1 AU. Προέρχεται από ενεργές περιοχές του Ήλιου ή εκρηκτικά ηλιακά φαινόμενα, όπως εκλάμψεις, στεμματικές οπές, CMEs κτλ.

Τα δύο πιο γνωστά μοντέλα για το στέμμα και τον ηλιακό άνεμο είναι :

i) του Chapman (1957), όπου θεώρησε το στέμμα στατικό, στο οποίο ισχύει η υδροστατική ισορροπία μεταξύ της βαθμίδας της πίεσης και της βαρύτητας.

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{GM_s}{r^2}$$

ii) του Parker, το οποίο είναι και το επικρατέστερο σήμερα. Στο μοντέλο αυτό ο Parker ισχυρίζεται πως η υψηλή θερμοκρασία του στέμματος δεν του αφήνει περιθώρια να παραμείνει στατικό και ότι η θερμότητα αυτή πρέπει να μεταφέρεται από μερικά σωματίδια. Προσέγγισε υδροδυναμικά το πρόβλημα αυτό, προσθέτοντας στην υδροστατική εξίσωση έναν όρο που περιέγραψε τη ροή ενός ρευστού, που ουσιαστικά παριστάνει την ροή του ηλιακού ανέμου ο οποίος και μεταφέρει την θερμότητα του στέμματος προς τα εξωτερικά στρώματά του.

1.2.2 Κρουστικά κύματα

Ένα ισχυρό φαινόμενο το οποίο συμβαίνει στον διαπλανητικό χώρο και επηρεάζει αρκετά την γήινη μαγνητόσφαιρά μας (με πλήθος αποτελεσμάτων στην Γη) είναι τα **κρουστικά κύματα**. Τα κρουστικά κύματα δημιουργούνται από την σύγκρουση του αργού ηλιακού ανέμου με τον ταχύ ηλιακό άνεμο που προέρχεται από μια έκλαμψη ή και με μια CME. Καθώς έρχεται από τον Ήλιο προς τα έξω το ταχύ ηλιακό πλάσμα, συναντάει στο δρόμο του τον αργό ηλιακό άνεμο. Στην συνάντηση αυτή αν η διαφορά των ταχυτήτων ΔV του γρήγορου με τον αργό

ηλιακό άνεμο είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη ταχύτητα $V_A = \sqrt{\frac{B^2}{4\pi\rho}}$ η οποία ονομάζεται

ταχύτητα Alfven και είναι η ταχύτητα του ήχου στην συγκεκριμένη περιοχή, τότε έχουμε την δημιουργία ενός μετώπου κρούσης (Μαυρομιχαλάκη, 2009). Δηλαδή το βασικό φαινόμενο δημιουργίας των κρουστικών κυμάτων είναι η ορή του ηλιακού πλάσματος με υπερηχητική ταχύτητα σε μια περιοχή. Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές του πεδίου επανασυνδέονται στο σημείο σχηματισμού του κρουστικού κύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κλειστές

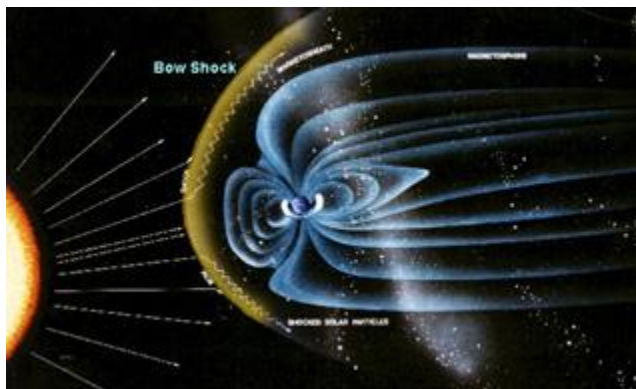
μαγνητικές δομές μέσα στην περιοχή της έκρηξης, οι οποίες δομές μεταφέρονται από το κρουστικό κύμα και επηρεάζουν τις μαγνητόσφαιρες των πλανητών.

Η ταχύτητα δV είναι η ταχύτητα της διαταραχής. Ο λόγος $\frac{\delta V}{V_A}$ ονομάζεται αριθμός Mach και στα διαπλανητικά κρουστικά κύματα κυμαίνεται από την τιμή 1 μέχρι και 13.

Τα κρουστικά κύματα προκαλούν τις εξής απότομες μεταβολές :

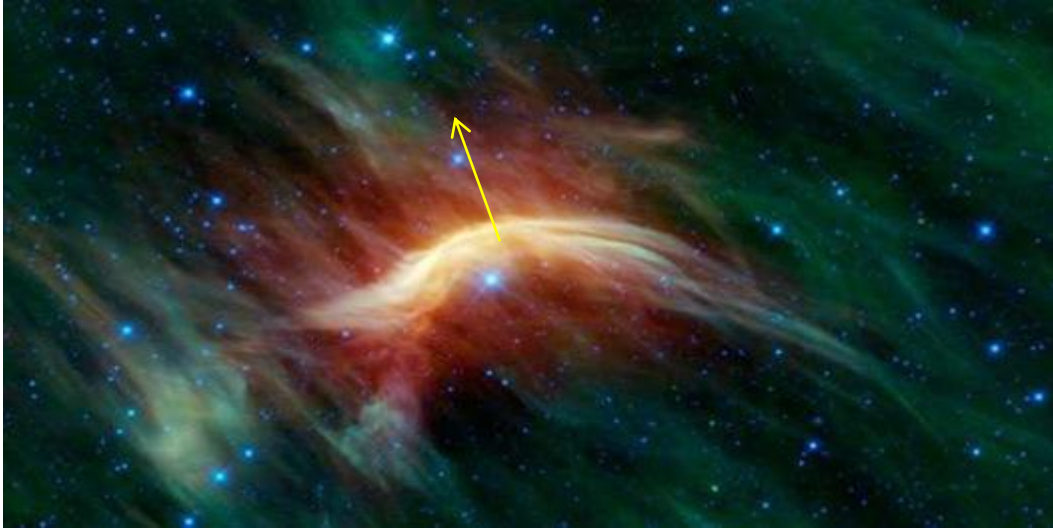
- Απότομη αύξηση της πυκνότητας του ηλιακού ανέμου που σαρώνουν
 - Απότομη αύξηση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου
 - Απότομη αύξηση του πλάσματος του ηλιακού ανέμου
 - Απότομη αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που μεταφέρει ο ηλιακός άνεμος
- ενώ χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες :

i) τα **στάσιμα κρουστικά κύματα**, τα οποία προέρχονται από την απότομη επιβράδυνση ενός γρήγορα κινούμενου ρεύματος (ηλιακού ανέμου) και ονομάζονται τοξοειδή κρουστικά κύματα (bow shocks). Δημιουργούνται μπροστά από τις πλανητικές και τις κομητικές μαγνητόσφαιρες οι οποίες επιβραδύνουν το ηλιακό ρεύμα.



Εικόνα 1.14 Το στάσιμο κρουστικό κύμα (bow shock) της γήινης μαγνητόσφαιρας
(http://www.igpp.ucla.edu/public/THEMIS/SCI/Pubs/Nuggets/FTE_nugget/themis%20nugget.html)

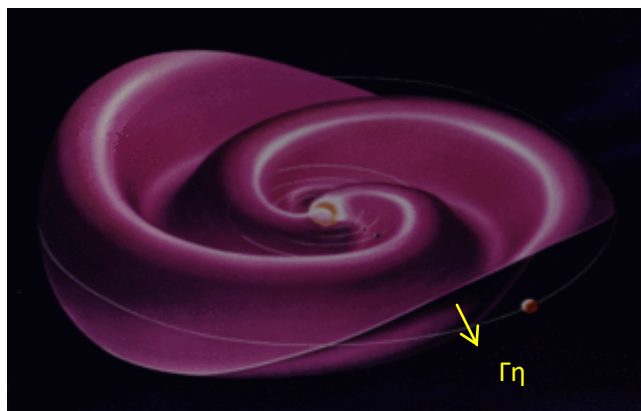
ii) τα **οδεύοντα κρουστικά κύματα** είναι εκείνα στα οποία το μέτωπο του κρουστικού κύματος ταξιδεύει. Αυτά τα κρουστικά κύματα δημιουργούνται στον διαπλανητικό χώρο από τις ηλιακές εκλάμψεις και τις CMEs, οι οποίες επιταγχύνουν τον ηλιακό άνεμο αρκετά, με αποτέλεσμα αυτός κατά την διάδοσή του στον διαπλανητικό χώρο να συναντάει τον βραδύτερο ηλιακό άνεμο και να δημιουργείται το οδεύον κρουστικό κύμα.



Εικόνα 1.15 Οδεύον κρουστικό κύμα στον διαπλανητικό χώρο (WISE space telescope, NASA/JPL-Caltech/UCLA)

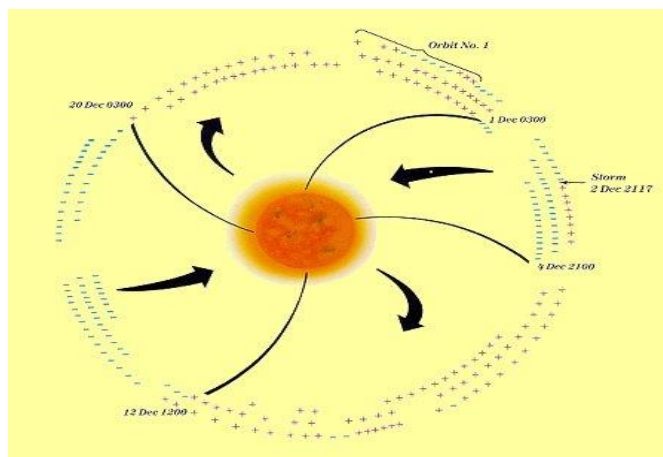
1.2.3 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο-Μοντέλο μπαλαρίνας

Από τον Ήλιο εξέρχονται ταχέα και αργά ρεύματα, κυρίως από τους πόλους του. Στον μαγνητικό ισημερινό υπάρχει μια επιφάνεια που εκτείνεται προς τον διαπλανητικό χώρο και διαχωρίζει αυτά τα δύο είδη ρευμάτων, επομένως και τις δύο περιοχές αντίθετης πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Δηλαδή η επιφάνεια αυτή χωρίζει (συμβατικά) πάνω και κάτω τις μαγνητικές περιοχές αντίθετης πολικότητας του Ήλιου. Η επιφάνεια αυτή λέγεται μανδύας ρεύματος (current sheet). Όπως είπαμε προηγουμένως, ο ηλιακός άνεμος καθώς φεύγει από τον Ήλιο δεν σχηματίζει ακτινικές δομές προς τον διαπλανητικό χώρο (δηλαδή ευθείες που ξεκινούν από τον Ήλιο και κατευθύνονται προς τα έξω), αλλά λόγω της περιστροφής του Ήλιου, σχηματίζει μια δομή δίνης (σπείρες του Αρχιμήδη ή σπείρες Parker). Επιπλέον, ο μανδύας ρεύματος σχηματίζει μια κλίση με την εκλειπτική $7,25^\circ$. Ο συνδυασμός αυτών των 2 γεγονότων κάνει τον μανδύα ρεύματος να αποκτά την μορφή φούστας μπαλαρίνας (εικόνα 1.16) (Μαυρομιχαλάκη, 2005):



Εικόνα 1.16 Καλλιτεχνική απεικόνιση της μορφής του μανδύα ρεύματος
(keelynet.com/spider/magfield.htm)

Έτσι, καθώς ο Ήλιος κάνει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά του σε 25 ημέρες, η Γη περνάει μέσα από 4 περιοχές διαφορετικής εναλάξ πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Η κάθε περιοχή σταθερής πολικότητας ονομάζεται τομέας (sector). Επομένως σε διάρκεια 25 ημερών η Γη περνάει μέσα από τέσσερις τομείς, διαφορετικής πολικότητας ο καθένας. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου βρίσκεται στην κυματιστή μορφή του μανδύα ρεύματος που είδαμε στην προηγούμενη εικόνα. Παρακάτω φαίνεται μια κάτοψη του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (που επηρεάζεται σχεδόν αποκλειστικά από τον Ήλιο, άρα σχεδόν ταυτίζεται με το ηλιακό μαγνητικό πεδίο μέσα στο Ηλιακό μας σύστημα) όπου φαίνονται καθαρά οι 4 τομείς πολικότητας :



Εικόνα 1.17 Κάτοψη του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Τα βέλη δείχνουν την πολικότητα του κάθε τομέα
(north πολικότητα=βέλος προς τα έξω, ενώ south πολικότητα=βέλος προς τα μέσα)
(<https://history.nasa.gov/EP-177/ch3-3.html>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΗΙΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ

2.1 Χαρακτηριστικά και προέλευση της γήινης μαγνητόσφαιρας

Η μορφή της γήινης (αλλά και κάθε άλλης) μαγνητόσφαιρας δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με το μαγνητικό πεδίο του εκάστωτε ουράνιου σώματος (Vassiliadis et. al., 1995). Η γήινη μαγνητόσφαιρα σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου με τον ηλιακό άνεμο. Την προέλευση του ηλιακού ανέμου την αποδώσαμε στην συνεχή εκτόνωση του ηλιακού στέμματος προς τον διαπλανητικό χώρο. Πώς δημιουργείται όμως το γήινο μαγνητικό πεδίο;

Σήμερα επικρατεί η θεωρία του δυναμό για την δημιουργία του γήινου μαγνητικού πεδίου, η οποία βασίζεται στην γρήγορη περιστροφή του ρευστού και αγώγιμου μεταλλικού πυρήνα της Γης. Η Γη έχει εσωτερική μαγνητική διπολική περιστροφή $M=8 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ η οποία προέρχεται από την περιστροφή της ίδιας και του ρευστού αγώγιμου πυρήνα της (θεωρία δυναμό) και δημιουργεί στην επιφάνειά της μαγνητικό πεδίο έντασης $\approx 30000\text{-}60000 \text{ nT}$, ενώ σε απόσταση $10R_{\text{Γ}}$ (10 ακτίνες Γης) πεδίο έντασης 30 nT (Russel, 2000). Συγκεκριμένα, ο εξωτερικός στερεός πυρήνας της Γης περιστρέφεται με μικρότερη ταχύτητα περιστροφής απ'ότι ο εσωτερικός ρευστός πυρήνας, και λόγω της σύστασής του (απαρτίζεται κυρίως από σίδηρο) και της μεγάλης αγωγιμότητάς του, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο E με κατεύθυνση προς τον άξονα περιστροφής του πυρήνα. Αυτό το E δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο ρεύμα γύρω από τον πυρήνα, με φορά αντίθετη του ρολογιού, που με την σειρά του δημιουργεί το γήινο διπολικό (σχεδόν) μαγνητικό πεδίο το οποίο εκτείνεται προς τον διαπλανητικό χώρο. Ο ηλιακός άνεμος, έχοντας πυκνότητα 8 ions/cm^3 και ταχύτητα 400 km/s , σε απόσταση 1 AU , δηλαδή στην τροχιά της Γης, προκαλεί μαγνητική πίεση $\approx 2 \text{ nPa}$, η οποία εξισορροπεί την μαγνητική πίεση του γήινου μαγνητικού πεδίου που έχει την ίδια τιμή με την πίεση του ηλιακού ανέμου στην περιοχή αυτή. Δηλαδή στην περιοχή αυτή ισχύει :

$$\frac{B^2}{8\pi} = 2N\mu v^2 \cos^2 \theta$$

Όπου:

$B=B_K$: η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο K της μαγνητόπαυσης.

θ : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της γραμμής που ενώνει το K με τη Γη και της γραμμής Ηλίου-Γης.

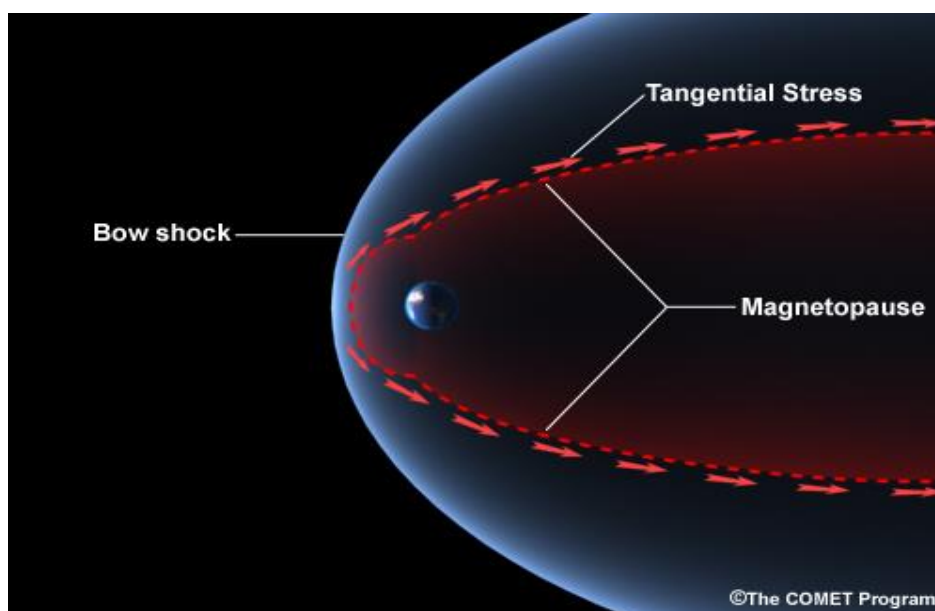
N : η σωματιδιακή πυκνότητα στο σημείο που μελετάμε.

v : η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου.

m : η μάζα του σωματιδίου.

Το αριστερό μέλος της παραπάνω εξίσωσης δίνει την πίεση του μαγνητικού πεδίου της μαγνητόσφαιρας στην οποία θεωρούμε αμελητέα την σωματιδιακή πυκνότητα, ενώ το δεξιό μέλος δίνει την πίεση της μαγνητοθήκης που σε πρώτη προσέγγιση είναι η πίεση των σωματιδίων του ηλιακού ανέμου (Chapman and Ferraro, 1931).

Το σημείο αυτής της ισορροπίας ονομάζεται **μαγνητόπαυση** (magnetopause, εικόνα 2.1) .



Εικόνα 2.1 Η μαγνητόπαυση της γήινης μαγνητόσφαιρας
(<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/magnetopause.html>)

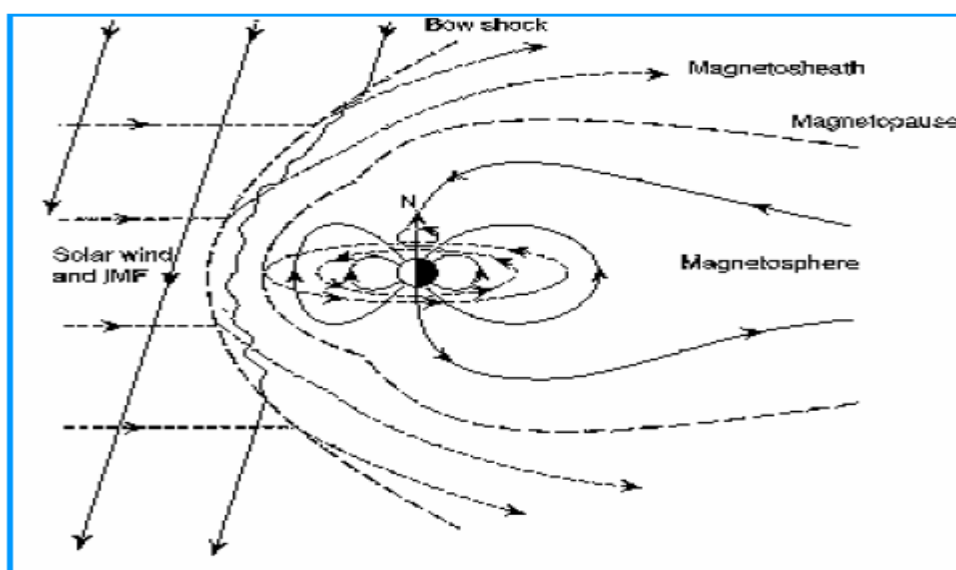
Όπως φαίνεται και στην εικόνα, μπροστά από την μαγνητόπαυση δημιουργείται ένα στάσιμο κρουστικό κύμα (bowshock), όπως το περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δηλαδή, επειδή η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είναι πολύ μεγάλη (μεγαλύτερη της ταχύτητας Alfven στην απόσταση 1 AU από τον Ήλιο), μπροστά από την φωτεινή πλευρά της Γης δημιουργείται το στάσιμο κρουστικό κύμα.

Γύρω από την μαγνητόπαυση υπάρχει ο λεγόμενος **μαγνητοφλοιός**, πάνω στον οποίο κινείται ο ηλιακός άνεμος (κόκκινα βελάκια), από την στιγμή που θα ξεπεράσει το κρουστικό κύμα και θα εισέλθει στα όρια της μαγνητόσφαιρας.

2.2 Δομή της γήινης μαγνητόσφαιρας

Η μελέτη του γεωμαγνητικού πεδίου έχει ξεκινήσει από πολύ παλιά. Ο William Gilbert το 1600 δέχεται ότι το γήινο μαγνητικό πεδίο είναι διπολικό. Γενικά τα μαγνητικά πεδία των πλανητών θεωρήθηκαν διπολικά, για διευκόλυνση υπολογισμών. Εξάλλου η συνεισφορά από πολύπολα πεδία είναι πολύ μικρότερη απ'αυτή του διπολικού πεδίου. Το κατά προσέγγιση διπολικό γήινο μαγνητικό πεδίο έχει κλίση $11,5^\circ$ με τον άξονα περιστροφής της Γης.

Η προσπάθεια εξήγησης της δομής της μαγνητόσφαιρας έχει οδηγήσει σε διάφορα μοντέλα δομής της. Το πρώτο από αυτά τα μοντέλα είναι **το μοντέλο Chapman – Ferraro** (1931) στο οποίο αναφέρεται ότι η γήινη μαγνητόσφαιρα είναι τελείως κλειστή (εικόνα 2.2) και δεν εισέρχεται σχεδόν τίποτα μέσα σ'αυτήν, ενώ ο ηλιακός άνεμος μεταφέρει πάντα παγωμένο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο.

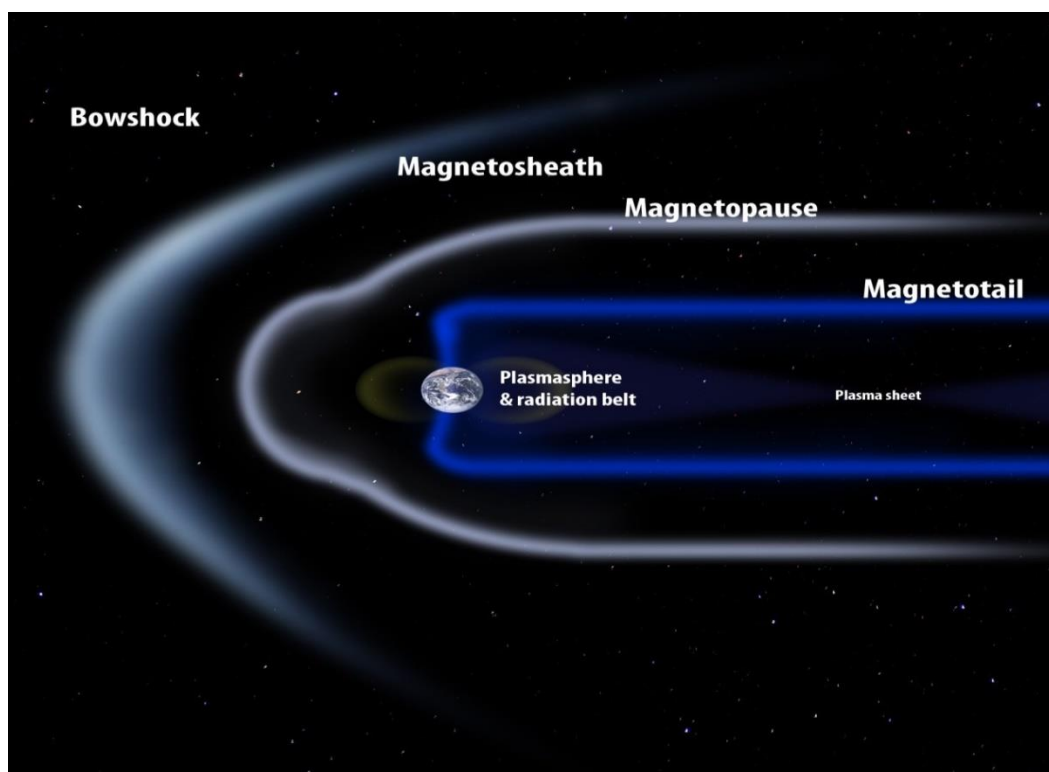


Εικόνα 2.2 Το μοντέλο κλειστής μαγνητόσφαιρας Chapman-Ferraro. Οι κατακόρυφες γραμμές αριστερά δείχνουν το διαπλανητικό (ηλιακό) μαγνητικό πεδίο.

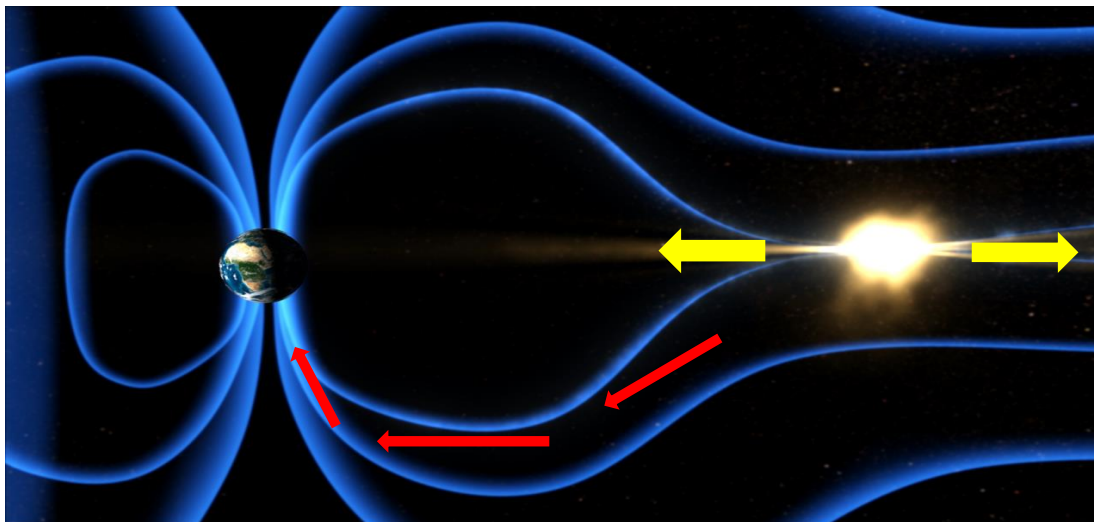
Το μοντέλο αυτό όμως παρουσιάζει κάποιες σοβαρές ατέλειες, καθώς δεν μπορεί να εξηγήσει την εισροή φορτισμένων σωματιδίων και ηλιακού πλάσματος στην γήινη μαγνητόσφαιρα, τα οποία δημιουργούν διάφορα φαινόμενα όπως τα σελάη και οι μαγνητικές καταιγίδες.

Το κενό αυτό μπορεί να εξηγήσει ένα άλλο μοντέλο, που είναι και το επικρατέστερο στις μέρες μας, **το μοντέλο του Dungey** (Πρέκκα, 2003). Αυτό το μοντέλο βασίζεται στη μαγνητική

επανασύνδεση των δυναμικών γραμμών του ηλιακού και του γήινου μαγνητικού πεδίου. Το παγωμένο μαγνητικό πεδίο, που κουβαλάει ο ηλιακός άνεμος, αρχίζει να διαχέεται στην μαγνητόπαυση και έτσι δημιουργείται ένα “άνοιγμα” στην μαγνητόσφαιρα, με αποτέλεσμα την σύνδεση των μαγνητικών γραμμών του γήινου με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ένωση επιταχύνει το πλάσμα κατα μήκος του μαγνητοφλοιού και το οδηγεί πάνω από τους πόλους και στο πίσω (νυκτερινό) μέρος της μαγνητόσφαιρας και έτσι δημιουργείται μια κυλινδρική ουρά προς τα πίσω, **η μαγνητοουρά**. Η μαγνητοουρά σχηματίζεται επειδή ο ηλιακός άνεμος γίνεται όλο και περισσότερο εφαιπτομενικός στο γήινο μαγνητικό πεδίο καθώς ρέει γύρω απ’τον πλανήτη μας και κάποια στιγμή που δεν μπορεί να συμπίεσει περισσότερο το πεδίο, το “σέρνει” σε μεγάλες αποστάσεις (Μαυρομιχαλάκη, 2009). Εκεί το πλάσμα αυτό συσσωρεύεται στην κεντρική περιοχή της μαγνητοουράς και έτσι δημιουργείται μια περιοχή συσσώρευσης πλάσματος, ο πλασμοφλοιός (plasma sheet). Ο πλασμοφλοιός εκτείνεται στο πίσω μέρος της γληνής μαγνητόσφαιρας και έχει πάχος 4-6 R_E . Κάτω από συνθήκες αστάθειας, στον πλασμοφλοιό δημιουργείται επανασύνδεση μαγνητικών γραμμών (όπως ακριβώς και στις εκλάμψεις), το πλάσμα επιταχύνεται και προς την Γη και προς τα πίσω και κατευθυνόμενο από τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, και φθάνει στους πόλους, όπου δημιουργείται το σέλας από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων αυτών με τα άτομα και μόρια της ατμόσφαιρας (εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.3 Καλλιτεχνική απεικόνιση της δομής και των χαρακτηριστικών περιοχών της γήινης μαγνητόσφαιρας (μοντέλο *Dungey*)

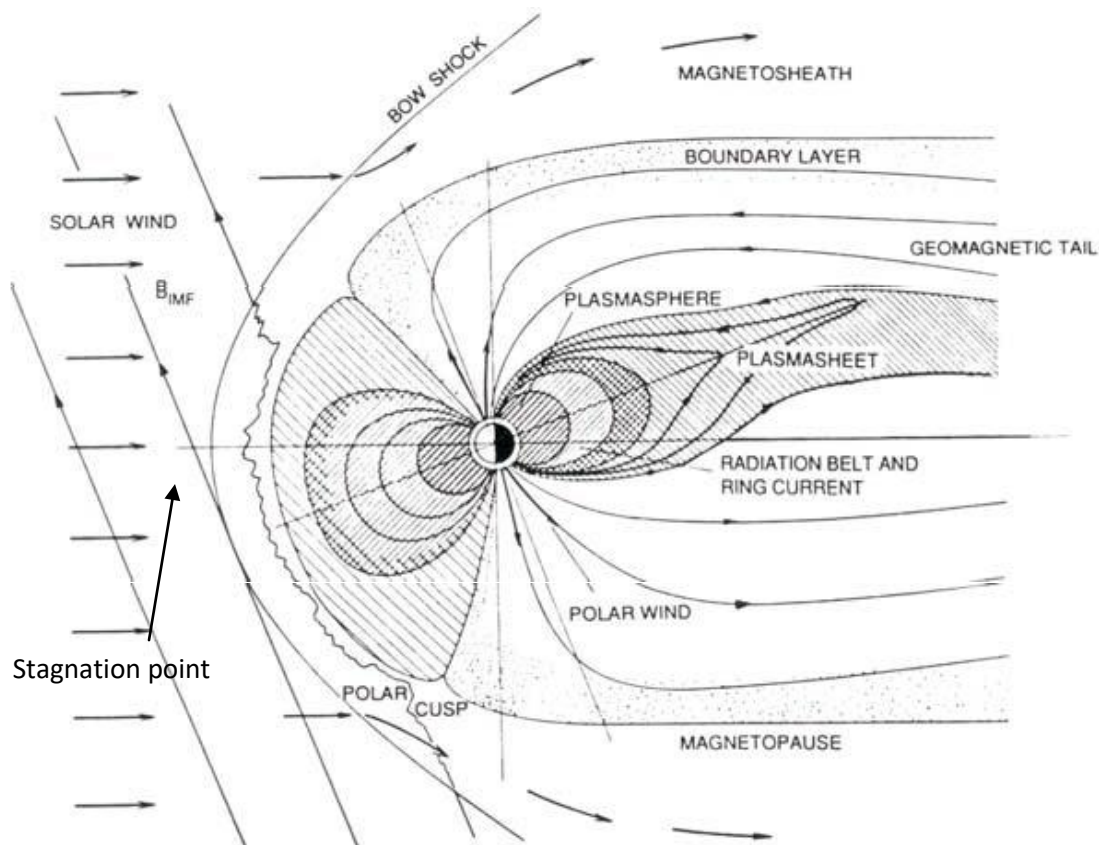


Εικόνα 2.4 Μαγνητική επανασύνδεση στον πλασμοφλοιό, όπου φορτισμένα σωματίδια επιταγχύνονται προς τα δεξιά και τα αριστερά, με αποτέλεσμα να φτάνουν στους γεωμαγνητικούς πόλους της Γης ακολουθώντας τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές (κόκκινα βέλη)

Από την εποχή του πρώτου μοντέλου της γήινης μαγνητόσφαιρας (Chapman-Ferraro, 1931) έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες και πολλά πρότυπα τα οποία κάθε φορά προσαρμόζονταν στα πειραματικά δεδομένα.

Το σημερινό αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα πρότυπο της γήινης μαγνητόσφαιρας, που αποδίδει τα γενικά χαρακτηριστικά της τοπολογίας της, είναι **το μοντέλο του Lui** (1987). Η σχηματική του απεικόνιση φαίνεται στην εικόνα 2.8. Εδώ, από την εξίσωση πιέσεων του ηλιακού ανέμου με το γεωμαγνητικό πεδίο, υπολογίστηκε ότι η μαγνητόπαυση απέχει από το κέντρο της Γης $\approx 10 R_E$ κατά μήκος του άξονα Γης-Ήλιου (Daglis, 2007).

Επίσης, μόλις ο ηλιακός άνεμος περάσει το κρουστικό κύμα του γεωμαγνητικού πεδίου, η ταχύτητά του μειώνεται και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία και η πυκνότητά του. Η περιοχή που γίνονται αυτές οι διεργασίες ονομάζεται **μαγνητοθήκη** (magnetosheath). Το εύρος της μαγνητοθήκης είναι 2-4 R_E πάνω στην διεύθυνση Ήλιου-Γης και μεγαλώνει όσο απομακρυνόμαστε απ' αυτή τη διεύθυνση (Μαυρομιχαλάκη, 2009). Το όριο της μαγνητοθήκης προς την πλευρά της Γης είναι η **μαγνητόπαυση** (magnetopause) (εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου του Lui της γήινης μαγνητόσφαιρας (Μαυρομιχαλάκη, 2009)

Στη σκοτεινή πλευρά της Γης, η συνεχής ροή του ηλιακού ανέμου στη μαγνητοθήκη έχει σαν αποτέλεσμα τη “σάρωση” των πολικών δυναμικών γραμμών προς τα πίσω και το σχηματισμό της μαγνητοουράς (magnetotail) που εκτείνεται μέχρι περίπου 1000 R_E . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8, στη φωτεινή πλευρά και στα μεγάλα πλάτη, παρατηρείται ένας απότομος διαχωρισμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που βρίσκονται στη φωτεινή μαγνητόσφαιρα, απ’ τις δυναμικές γραμμές μεγάλου πλάτους που προεκτείνονται στη μαγνητοουρά. Αυτό δημιουργεί μια σχισμή στη φωτεινή πλευρά της μαγνητόπαυσης που ονομάζεται **πολική σχισμή** (polar cusp).

Μπροστά από τη μαγνητόπαυση και κοντά στην γραμμή Γης-Ήλιου δημιουργείται μια περιοχή αδρανούς πλάσματος που λέγεται **σημείο στασιμότητας** (stagnation point). Εδώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου έχει ελαττωθεί σημαντικά και η πυκνότητα του πλάσματος είναι πολύ μικρή. Αυτό γίνεται γιατί το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού ανέμου παρεκκλίνει της ακτινικής του πορείας μόλις συναντήσει την μαγνητόπαυση και ρέει γύρω απ’ αυτήν.

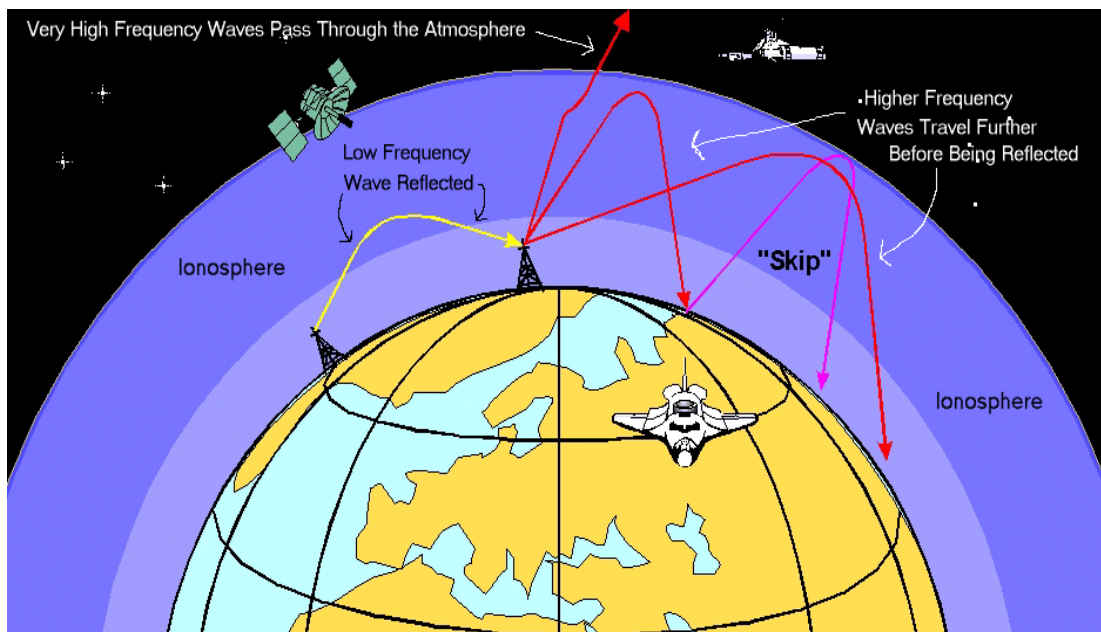
Η μαγνητόπαυση τώρα, δρα σαν μια ασπίδα για τη Γη που επιτρέπει σ’ ένα μικρό ποσοστό σωματιδίων (<1%) στο πλάσμα της μαγνητοθήκης να την διαπερνά, πιθανότατα απ’ την πολική

σχισμή. Το πλάσμα αυτό δημιουργεί ένα λεπτό φλοιό που "εφάπτεται" κατά μήκος της μαγνητόπαυσης και είναι γνωστό σαν **οριακό στρώμα μαγνητόπαυσης** (magnetopause boundary layer). Σ' αυτό το στρώμα γίνεται μεταφορά ορμής και ενέργειας από τον ηλιακό άνεμο στη μαγνητόσφαιρα μέσω της αλληλεπίδρασης ιξώδους (Axford and Hines, 1961 ; Miura, 1984 ; Manuel, 1993).

Το μεγαλύτερο τμήμα της μαγνητοουράς αποτελείται από δυο περιοχές χαμηλής σωματιδιακής πυκνότητας, γνωστές σαν **μαγνητικοί λοβοί** (magnetic lobes), ένα στο βόρειο μισό της μαγνητοουράς και έναν στο νότιο. Οι δυναμικές γραμμές που περνούν απ' τους μαγνητικούς λοβούς είναι ανοιχτές. Στο βόρειο λοβό οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται προς τον Ήλιο, ενώ στο νότιο λοβό έχουν αντίθετη φορά. Η σωματιδιακή σύσταση των περιοχών αυτών είναι κυρίως ιόντα της πολικής σχισμής, ιόντα της πολικής περιοχής που εισέρχονται σε χαμηλά στρώματα της μαγνητόσφαιρας και ηλεκτρόνια του ηλιακού ανέμου που εισέρχονται απ' τις ανοιχτές δυναμικές γραμμές. Ανάμεσα στους δυο λοβούς της μαγνητοουράς βρίσκεται το **οριακό στρώμα της ζώνης πλάσματος** (Plasma Sheet Boundary Layer). Εδώ παρατηρούνται πολλές απ' τις δραστηριότητες του πλάσματος, οι οποίες μειώνονται καθώς πλησιάζουμε στο κέντρο της μαγνητοουράς όπου βρίσκεται η **κεντρική ζώνη πλάσματος** (Central Plasma Sheet).

Η μαγνητοουρά, σύμφωνα με πολύ πρόσφατες παρατηρήσεις από τον δορυφόρο GEOTAIL που εκτοξεύτηκε στα τέλη του 1992, ανιχνεύεται πολύ καλά μέχρι και σε αποστάσεις $\approx 250 R_E$, όπου μπορούν να προσδιορισθούν όλες οι περιοχές του πλάσματος καθώς και κάποιες σύνθετες δομές, που παρατηρούνται στην εσωτερική μαγνητοουρά. Η αποστολή του GEOTAIL επιβεβαίωσε την ύπαρξη πλασμοειδών (plasmoids), που αρχικά είχαν ανιχνευτεί με τις παρατηρήσεις από την αποστολή ISEE 3. Πρόκειται για μαγνητικές δομές μήκους 50-100 R_E , κλειστές στο κέντρο τους, των οποίων οι εξωτερικές δυναμικές γραμμές συνδέονται με την ιονόσφαιρα της Γης και κινούνται προς τη μαγνητοουρά με ταχύτητα της τάξης των εκατοντάδων km/s και σχετίζονται άμεσα με την απελευθέρωση ενέργειας στην περιοχή της μαγνητοουράς (Belehaki et al., 1997 ; Μαυρομιχαλάκη, 2009).

Η γήινη μαγνητόσφαιρα περιέχει ακόμα μια ενεργή περιοχή, την **ιονόσφαιρα** (εικόνα 2.6). Η ιονόσφαιρα είναι η ανώτερη περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας όπου παρατηρείται έντονος ιονισμός της ύλης (έχουμε δηλαδή φορτισμένα σωματίδια και ιόντα), λόγω της επίδρασης της υπεριώσους ακτινοβολίας που προέρχεται από τον Ήλιο, πάνω στα άτομα του υδρογόνου, του οξυγόνου και του αζώτου. Η ιονόσφαιρα καθιστά εφικτές τις ραδιοφωνικές εκπομπές παγκόσμιας λήψης, που βασίζονται στην εκπομπή ραδιοφωνικών σημάτων τα οποία αποστέλονται από την Γη, ανακλώνται στην ιονόσφαιρα (έχοντας συχνότητες από 3 έως 30 MHz) και επιστρέφουν στην επιφάνειά της, όπου γίνεται η λήψη των σημάτων. Επομένως είναι ένα ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, αρκετά σημαντικό για τον άνθρωπο. Οποιοσδήποτε διαταραχές γίνονται στην ιονόσφαιρα μπορούν να έχουν σημαντικές συνέπειες στην ανθρώπινη ζωή και τεχνολογία. Τέλος, στην ιονόσφαιρα λαμβάνουν χώρα και τα εντυπωσιακά σελάη, τα οποία θα αναλύσουμε παρακάτω.



Εικόνα 2.6 Καλλιτεχνική επεικόνιση της ιονόσφαιρας και της χρησιμότητάς της στις τηλεπικοινωνίες (<http://astro-eudoxos.org/ionosphere/>)

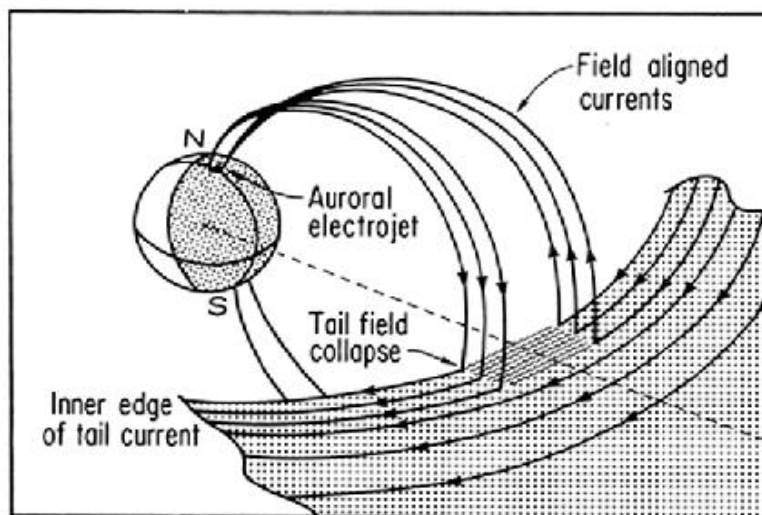
2.3 Ρεύματα στην γήινη μαγνητόσφαιρα

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το ηλιακό πλάσμα που επιταχύνεται από την μαγνητική επανασύνδεση στον γεωμαγνητικό ισημερινό, κατευθύνεται προς τους πόλους και στην συνέχεια προς την μαγνητοουρά όπου φτάνει μέχρι το σημείο μαγνητικής επανασύνδεσης της μαγνητοουράς και επιταχύνεται ξανά, προς την μαγνητόσφαιρα αλλά και προς τον διαπλανητικό χώρο αντιδιαμετρικά προς την Γη, κατά μήκος της μαγνητοουράς. Επομένως το πλάσμα ξαναεπιταχύνεται προς την φωτεινή πλευρά της Γης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Δηλαδή έχουμε κλειστούς σωλήνες ροής πλάσματος (ρεύματα) στην γήινη μαγνητόσφαιρα που δημιουργούνται και με την διαδικασία της μαγνητικής επανασύνδεσης αλλά και με την παγίδευση φορτισμένων σωματιδίων στην μαγνητόσφαιρα, προερχόμενα από τον διαπλανητικό χώρο, την κοσμική ακτινοβολία αλλά και την ίδια την γήινη ατμόσφαιρα (π.χ. ιονόσφαιρα). Αυτό είναι και το κρίσιμο σημείο της θεωρίας της ανοιχτής μαγνητόσφαιρας (Μαυρομιχαλάκη, 2009).

Η μαγνητοσφαιρική ροή αντικατοπτρίζεται στην ιονόσφαιρα, όπου δείχνει την ιονόσφαιρα όπως φαίνεται από έναν παρατηρητή που κοιτάζει κάτω, προς τον βόρειο πόλο της Γης. Στην

ιονόσφαιρα δημιουργούνται δύο στρόβιλοι, όπου η ροή έχει κατεύθυνση αντίθετα από τον Ήλιο στα μεγάλα πλάτη που οι δυναμικές γραμμές είναι ανοιχτές (περιοχή πολικού καλύμματος), ενώ στα χαμηλά πλάτη που οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές, η ροή έχει κατεύθυνση προς τον Ήλιο. Η ιονοσφαιρική ροή έχει ταχύτητες της τάξης μερικών εκατοντάδων μέτρων το δευτερόλεπτο. Για να ολοκληρωθεί ο κύκλος της ροής στην ιονόσφαιρα χρειάζονται 12 περίπου ώρες, και από αυτό το στοιχείο συμπεραίνουμε ότι η μαγνητοουρά έχει μήκος περίπου 1000 γήινες ακτίνες. Ο κύκλος αυτός είναι γνωστός σαν **κύκλος ροής του Dungey** (Dungey, 1961).

Το πιο σημαντικό στοιχείο στην μαγνητοσφαιρική - ιονοσφαιρική ροή (ή αλλιώς μαγνητοσφαιρικά ρεύματα) είναι ότι το μέτρο της εξαρτάται από τις μεταβολές της διεύθυνσης και του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Ο ρυθμός μαγνητικής επανασύνδεσης, και επομένως και η μαγνητική ροή που εισέρχεται στη μαγνητόσφαιρα, είναι πολύ αυξημένα όταν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς νότο, δηλαδή αντίθετη από τη φορά του γεωμαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του ισημερινού, οπότε και ευνοείται το φαινόμενο της επανασύνδεσης στο μπροστινό μέρος την μαγνητόσφαιρας (μαγνητόπαυση).

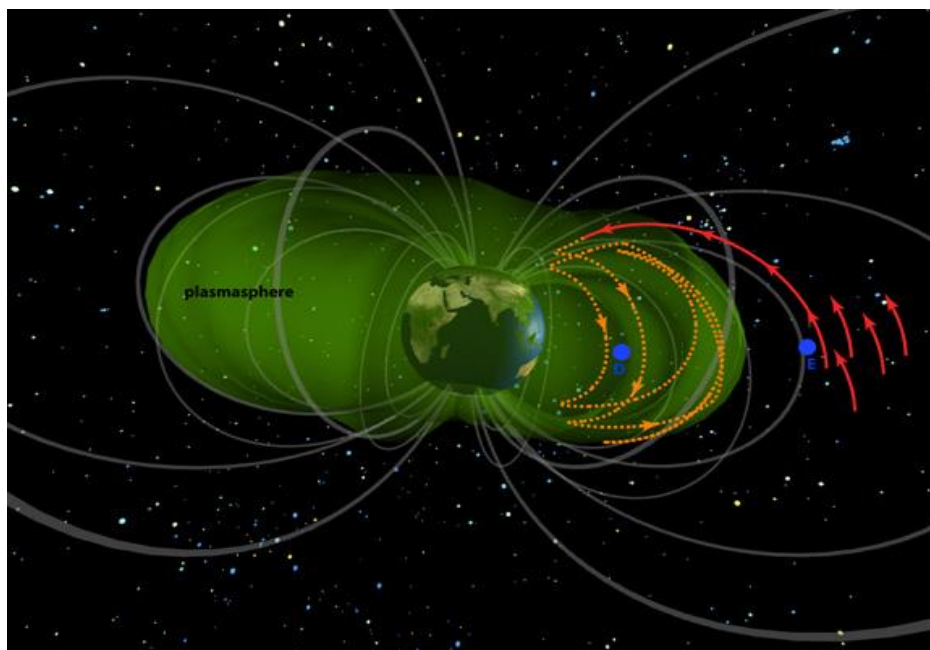


Εικόνα 2.7 Μαγνητοσφαιρικά ρεύματα από τους πόλους προς την μαγνητοουρά
(<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/707/2/903>)

Όταν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς βορρά, τότε δεν μπορεί να συμβεί μαγνητική επανασύνδεση στον ισημερινό και ο κύκλος ροής του Dungey διακόπτεται αυτόματα. Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι η μαγνητική ροή που εισέρχεται στη μαγνητόσφαιρα εξαιτίας της μαγνητικής επανασύνδεσης στη φωτεινή μαγνητόπαυση, δεν υπερβαίνει ποτέ το 20% της μαγνητικής ροής που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο στη φωτεινή μαγνητόσφαιρα. Το μεγαλύτερο μέρος όμως αυτής της ροής εκτρέπεται γύρω από τη μαγνητόσφαιρα όπως έδειξαν οι Chapman και Ferraro. Όμως έστω και αυτό το μικρό ποσοστό της μαγνητικής ροής του ηλιακού ανέμου που εισέρχεται από τη μαγνητόπαυση με τη

διαδικασία της μαγνητικής επανασύνδεσης παίζει καθοριστικό ρόλο στη δυναμική της Γήινης Μαγνητόσφαιρας και στην δημιουργία γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Όμως ο κύκλος του Dungey που παρατηρείται στην ιονόσφαιρα, εξαιτίας της εισροής ηλιακού ανέμου στην μαγνητόσφαιρα, δεν αποτελεί το μοναδικό ρεύμα στην γήινη μαγνητόσφαιρα. Ένα από τα πολλά τέτοια ρεύματα ροής είναι το ιονοσφαιρικό πλάσμα που ακολουθεί πάντα την περιστροφή της Γης. Όταν σ' αυτή την ροή προσθέσουμε και την ροή από τον κύκλο του Dungey, τότε διαπιστώνουμε ότι η ροή πλάσματος που δημιουργείται από τον κύκλο του Dungey επικρατεί στο εξωτερικό τμήμα της μαγνητόσφαιρας, ενώ η ροή εξαιτίας της περιστροφής του ιονοσφαιρικού πλάσματος περιορίζεται στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα, εκεί όπου οι δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι κλειστές. Η περιοχή αυτή, στο επίπεδο του ισημερινού, εκτείνεται μέχρι τις 4-6 R_E από τη Γη και ονομάζεται **πλασμόσφαιρα** (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8 Απεικόνιση της πλασμόσφαιρας που βρίσκεται εντός των κλειστών μαγνητικών δυναμικών γραμμών του γήινου μαγνητικού πεδίου (<http://www.mythsarehistory.com/planets--plasmaspheres.html>)

Η πλασμόσφαιρα περιέχει ψυχρό πλάσμα μεγάλης πυκνότητας, αποτελούμενο από υδρογόνο και ήλιο που προέρχεται από την ιονόσφαιρα (Μαυρομιχαλάκη, 2009). Έξω από αυτή την πλασμόσφαιρα, η πυκνότητα του ψυχρού πλάσματος μειώνεται δραστικά, εξαιτίας της θέρμανσης και της διαφυγής ιονοσφαιρικού πλάσματος σε κάθε κύκλο ροής Dungey. Στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα το πλάσμα είναι κατά κύριο λόγο θερμό και αραιό. Το μέγεθος της πλασμόσφαιρας δεν είναι σταθερό. Σε περιόδους που το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει

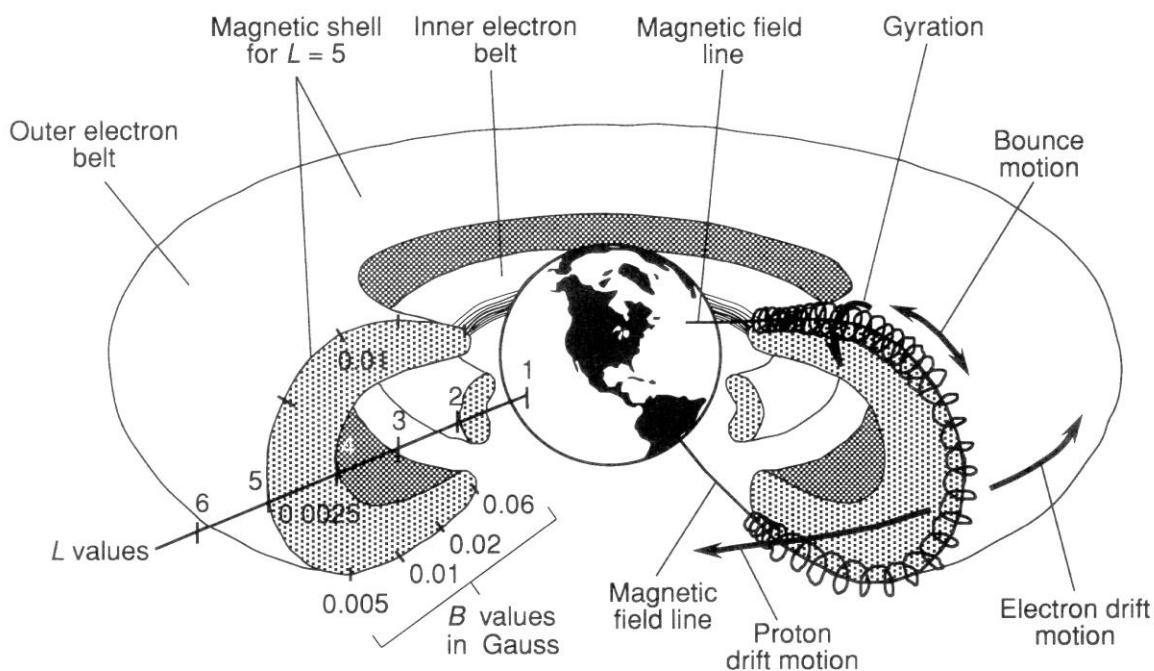
προσανατολισμό προς βορρά, η ροή εξ' αιτίας του κύκλου του Dungey είναι πολύ μικρή και τότε η περιοχή που επικρατεί η ροή εξ' αιτίας της περιστροφής διαστέλλεται. Όταν η ροή που δημιουργεί ο κύκλος του Dungey αυξηθεί (σε περιόδους που το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο έχει προσανατολισμό προς νότο) τότε η πλασμόσφαιρα συστέλλεται.

Γενικά η κίνηση φορτισμένων σωματιδίων (ρευμάτων) μέσα στη γήινη μαγνητόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των ζωνών Van-Allen και της σελαϊκής ζώνης.

Οι **ζώνες Van-Allen** είναι ζώνες φορτισμένων σωματιδίων εγκλωβισμένες μέσα στην γήινη μαγνητόσφαιρα. Δεν είναι πλάσμα, αλλά υψηλής ενέργειας σωματίδια (Πρέκκα, 2011). Στο επίπεδο του ισημερινού οι ζώνες αυτές κυκλώνουν την Γη σε μέση απόσταση 1,5-6 R_E . Οι ζώνες είναι δύο, η εσωτερική και η εξωτερική (εικόνα 2.9). Η εσωτερική είναι κλεισμένη μέσα στην πλασμόσφαιρα, ενώ η εξωτερική βρίσκεται έξω απ' αυτήν.

Η εσωτερική ζώνη απαρτίζεται κυρίως από πρωτόνια αλλά και μερικά ηλεκτρόνια πολύ υψηλών ενεργειών και η δημιουργία και σύστασή της εξηγείται από την διαδικασία που είναι γνωστή σαν Cosmic Ray Albedo Neutron Decay (CRAND), όπου υψηλής ενέργειας νετρόνια που απαρτίζουν τις κοσμικές ακτίνες αντιδρούν με την ατμόσφαιρα της Γης και διασπώνται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Κάποια απ' αυτά στην συνέχεια παγιδεύονται μέσα στην εσωτερική ζώνη.

Η εξωτερική ζώνη απαρτίζεται κυρίως από ηλεκτρόνια, αλλά και πρωτόνια σε μικρότερο ποσοστό (Daglis, 2007; Μαυρομιχαλάκη, 2009). Η ενέργειά τους είναι χαμηλότερη απ' αυτή των σωματιδίων της εσωτερικής ζώνης, καθώς η ενέργειά τους μεταβάλλεται με την απόσταση από την Γη. Η δημιουργία της δεν έχει εξηγηθεί ακόμα πλήρως, αλλά ούτε και η φύση της πλειονότητας των σωματιδίων μέσης και χαμηλής ενέργειας. Υπάρχουν ενδείξεις ότι προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο και από ιονοσφαιρικά σωματίδια που παγιδεύονται και επιταχύνονται κατά την διαδικασία του σέλαος. Οι ζώνες αυτές έχουν την τάση να διατηρούν σταθερή την πυκνότητά τους, η οποία αυξομειώνεται πολλές φορές κατά την εμφάνιση γεωμαγνητικών δραστηριοτήτων και στην συνέχεια επανέρχεται στην αρχική της τιμή.



Εικόνα 2.9 Τρισδιάστατη απεικόνιση των δύο ζωνών Van Allen που κυκλώνουν την Γη. Η εσωτερική είναι κλεισμένη μέσα στην πλασμόσφαιρα, ενώ η εξωτερική βρίσκεται έξω απ'αυτήν (Mitchell, 1994)

Οι **σελαϊκές ζώνες** είναι ένα άλλο είδος ζωνών ενεργειακών φορτισμένων σωματιδίων, που έχουν την μορφή οβάλ δαχτυλιδιών (auroral ovals) (εικόνα 2.11) και κεντράρονται πάνω από τους μαγνητικούς πόλους, η κάθε ζώνη σε κάθε πόλο. Η μελέτη των ζωνών αυτών έδειξε ότι δεν κεντράρονται ακριβώς πάνω από τους γεωμαγνητικούς πόλους, αλλά είναι κατα 3° μετατοπισμένες προς το σκοτεινό ημισφαίριο. Η διάμετρός τους είναι ≈ 4000 km, το ύψος τους από την επιφάνεια είναι μεταξύ 100 και 1000 km, ενώ όταν βρίσκεται σε εξέλιξη το φαινόμενο του σέλαος σχηματίζονται κάποιες φωτεινές “κουρτίνες” στον ουρανό (εικόνα 2.10) πάχους ≈ 1 km. Το όριο προς τους πόλους του ωσειδούς σέλαος ταυτίζεται με το όριο του πολικού καλύμματος (polar cap), ενώ το όριο προς τον ισημερινό εξαρτάται από την πυκνότητα της μαγνητικής ροής που εισήλθε στην μαγνητόσφαιρα και την θέση του εσωτερικού ορίου της ζώνης πλάσματος. Για μέση γεωμαγνητοσφαιρική δραστηριότητα το πλάτος του σέλαος είναι $\approx 6^\circ$.

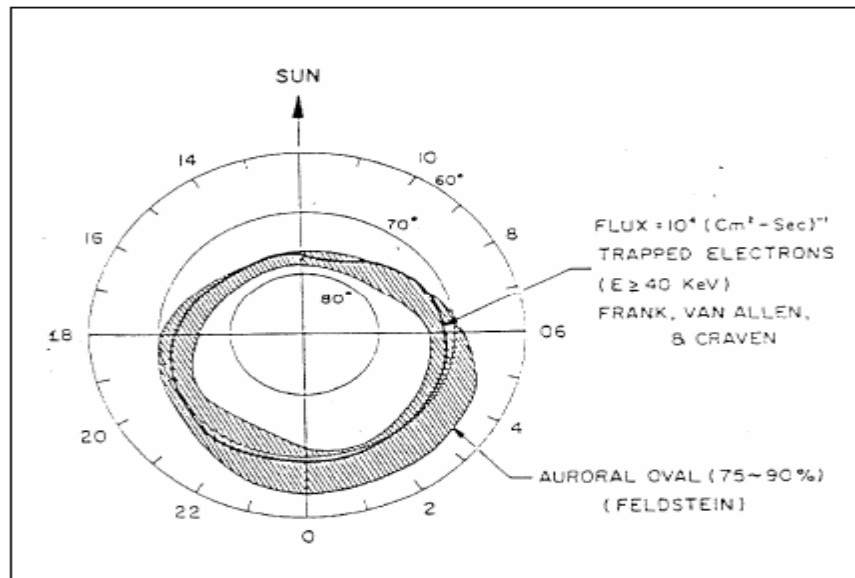


Εικόνα 2.10 Ερασιτεχνική φωτογραφία του φαινομένου του σέλαος. Διακρίνονται καθαρά οι φωτεινές “κουρτίνες” που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Red_and_green_aurora.jpg)

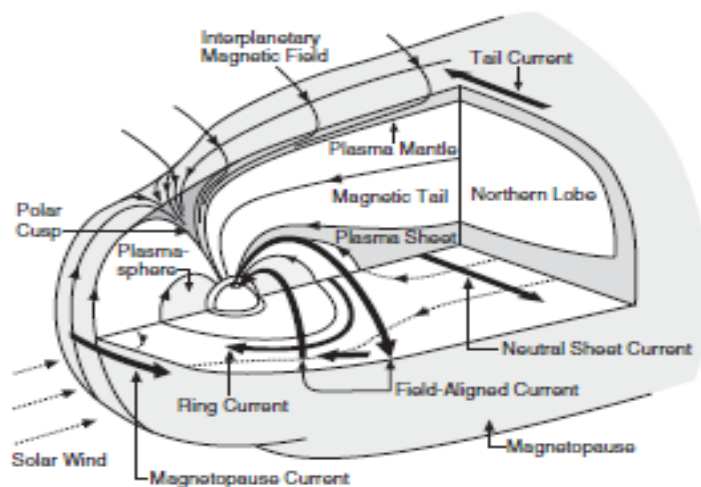
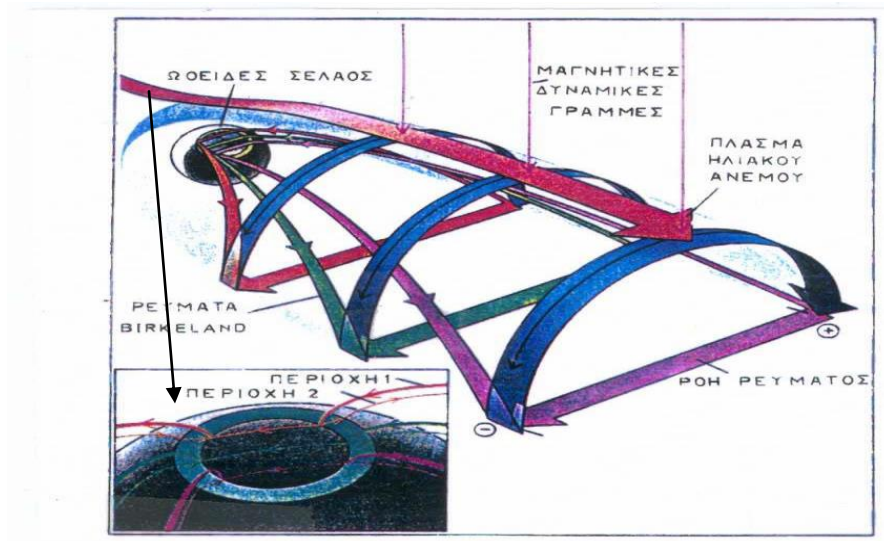
Τα σωματίδια στις ζώνες αυτές είναι ιονοσφαιρικής και ηλιακής προελεύσεως. Το φαινόμενο του σέλαος δημιουργείται κατά την διάρκεια γεωμαγνητικών καταιγίδων, όταν ένα μεγάλο μέρος των σωματιδίων της ζώνης πλάσματος διοχετεύεται στα ψηλά πλάτη της ιονόσφαιρας, με αποτέλεσμα να τροφοδοτούνται οι σελαϊκές ζώνες. Κατά την διάρκεια του φαινομένου του σέλαος, τα ηλεκτρόνια των σελαϊκών ζωνών συγκρούονται και αλληλεπιδρούν (ιονίζουν) με τα άτομα της ανώτερης ατμόσφαιρας. Η αλληλεπίδραση αυτή οφείλεται στην εκπεμπόμενη από τα άτομα αυτά ακτινοβολία λόγω ιονισμού τους, και το χρώμα της εξαρτάται από την ενέργεια αλληλεπίδρασης με τα εκάστοτε άτομα. Για παράδειγμα, αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με το οξυγόνο δίνει κυρίως πράσινο χρώμα και λιγότερο βαθύ κόκκινο χρώμα ορατής ακτινοβολίας, ενώ το άζωτο δίνει μόνο κόκκινο χρώμα. Επίσης παράγεται μπλε και ιώδες χρώμα, που δύσκολα όμως φτάνουν στο μάτι του παρατηρητή.

Όταν αναφερόμαστε στο φαινόμενο του σέλαος, εννοούμε πάντα τους φωτεινούς σχηματισμούς στον ουρανό των γεωμαγνητικών πόλων. Η εμφάνισή τους σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη (π.χ. Ελλάδα, 20 Νοεμβρίου 2003) είναι αρκετά σπάνια και σχετίζεται με πολύ ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες, κατά τις οποίες οι σελαϊκές ζώνες είτε διογκώνονται

πολύ φτάνοντας σε χαμηλότερα πλάτη είτε μετατοπίζονται προς χαμηλότερα πλάτη. Η συνοπτική εικόνα των ρευμάτων που διαρρέουν την γήινη μαγνητόσφαιρα φαίνεται στην εικόνα 2.12.

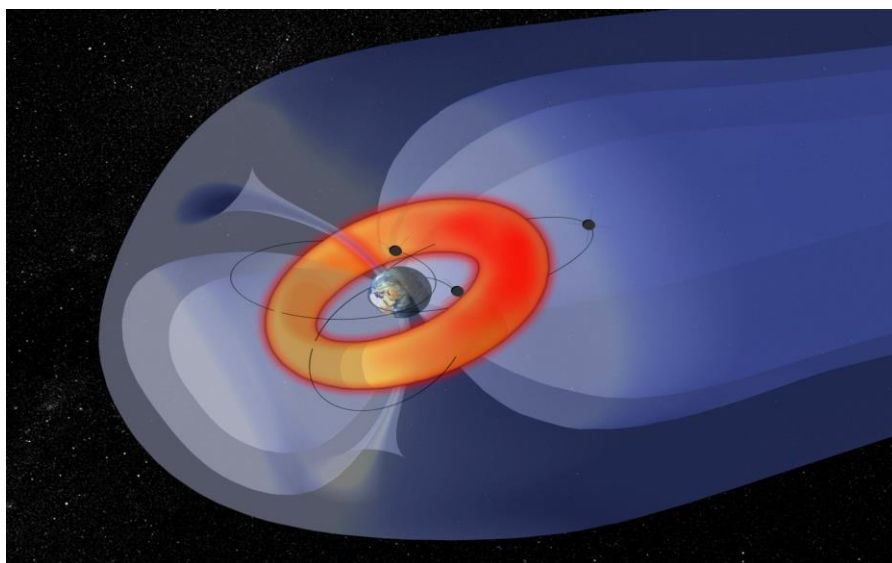


Εικόνα 2.11 Η βόρεια σελαϊκή ζώνη, κεντραρισμένη πάνω από τον βόρειο γεωμαγνητικό πόλο (Feldstein)



Εικόνα 2.12 Συνοπτικές αναπαραστάσεις του συστήματος ρευμάτων που διαρρέει τη γήινη μαγνητόσφαιρα (Μαυρομιχαλάκη, 2009 ; Boethmer and Daglis, 2007)

Υπάρχει και άλλο ένα ρεύμα, ισχυρό σε ένταση και μεγάλης σημασίας, στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας, το οποίο δημιουργείται από φορτισμένα σωματίδια τα οποία ολισθαίνουν γύρω από την Γη και την κυκλώνουν. Λόγω του σχήματός του, το ρεύμα αυτό ονομάζεται **δακτυλιοειδές ρεύμα** (εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13 Καλλιτεχνική αναπαράσταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος (<https://wami.usu.edu/wami-project>)

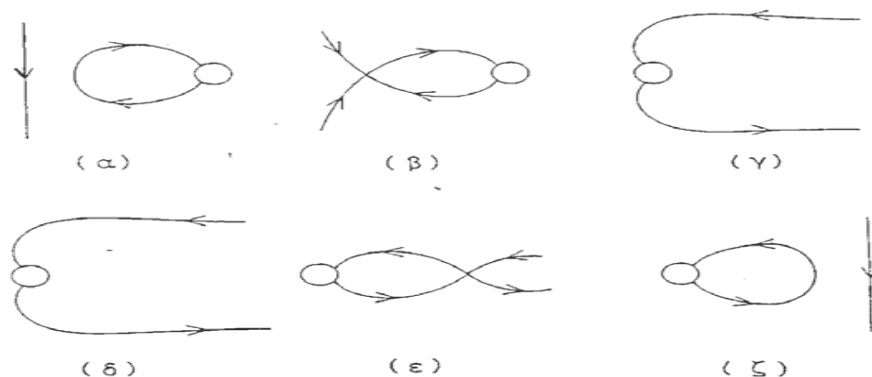
Το ρεύμα αυτό αποτελείται κυρίως από ιόντα (H^+ , O^+ , He^+ , He^{++}) ενέργειας από $\sim 10\text{keV}$ μέχρι και μερικών εκατοντάδων keV . Η φορά του δημιουργεί μαγνητικό πεδίο αντίθετης πολικότητας απ' αυτό της γήινης μαγνητόσφαιρας. Αυτή του η ιδιότητα το κάνει πολύ σημαντικό στην μελέτη του, καθώς η μεταβολή της σύστασής του προκαλεί και μεταβολές στο γεωμαγνητικό πεδίο, επομένως το δακτυλιοειδές ρεύμα μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο σε γεωμαγνητικές διαταραχές (όπως π.χ. στις γεωμαγνητικές καταιγίδες). Το ρεύμα αυτό βρίσκεται στην περιοχή $2-9 R_E$ με την μέγιστη πυκνότητά του να βρίσκεται στην περιοχή $3-5 R_E$, πάνω στις ζώνες Van Allen (όπου R_E είναι η ακτίνα της Γης). Θεωρείται υπεύθυνο για την παγκόσμια μείωση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης κατά την διάρκεια των γεωμαγνητικών καταιγίδων, η οποία μετράται με την βοήθεια του γεωμαγνητικού δείκτη Dst.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΖΕΥΞΗ ΗΛΙΟΥ-ΓΗΣ - ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΚΑΙΡΟΣ

3.1 Αλληλεπίδραση ηλιακού ανέμου-γεωμαγνητικού πεδίου- Διαστημικός καιρός

Στο μοντέλο της "ανοιχτής" μαγνητόσφαιρας που εισήγαγε ο Dungey (1961), προβλέπεται ότι κάθε φορά που ο ηλιακός άνεμος "φέρνει" μαγνητικό πεδίο που έχει μια συνιστώσα με κατεύθυνση από βορρά προς νότο (νότιο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο), αντίθετη δηλαδή από αυτή του γήινου διπολικού μαγνητικού πεδίου, τότε αυτό το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με το γεωμαγνητικό πεδίο μέσω της διαδικασίας της μαγνητικής επανασύνδεσης στο επίπεδο του ισημερινού, η οποία φαίνεται στην εικόνα 3.1. Μια δυναμική γραμμή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου μεταφέρεται απ'τον ηλιακό άνεμο προς τη Γη (α). Η αλληλεπίδρασή της με την δυναμική γραμμή του γήινου μαγνητικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαμόρφωσης τύπου X-point (β) και τη δημιουργία ενός ζεύγους δυναμικών γραμμών (γ). Όταν το διαπλανητικό πεδίο είναι προσανατολισμένο προς νότο, η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στη φωτεινή πλευρά της γήινης μαγνητόσφαιρας. Καθώς κινείται ο ηλιακός άνεμος, οι επανασυνδεόμενες μαγνητικές γραμμές παρασύρονται προς τη σκοτεινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας όπου γίνεται η αντίστροφη διαδικασία (δ, ε, στ) (Akasofu, 1977).

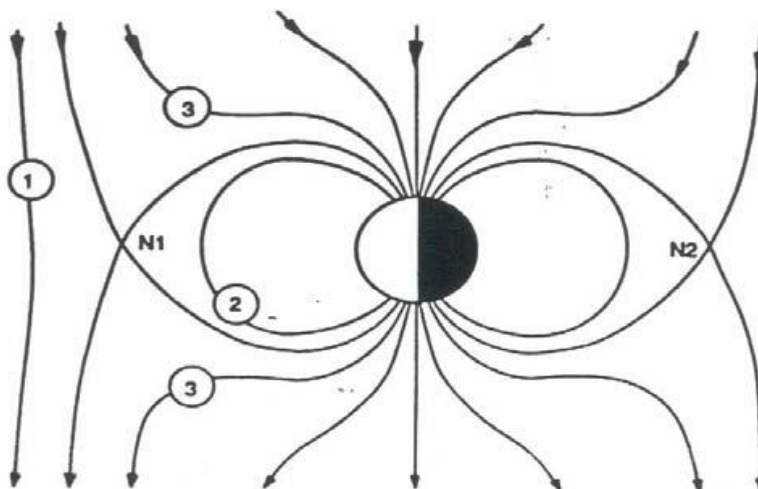


Εικόνα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας επανασύνδεσης των δυναμικών γραμμών του διαπλανητικού και του γεωμαγνητικού πεδίου στη φωτεινή (α,β,γ) και στη σκοτεινή (δ,ε,στ) πλευρά της γήινης μαγνητόσφαιρας

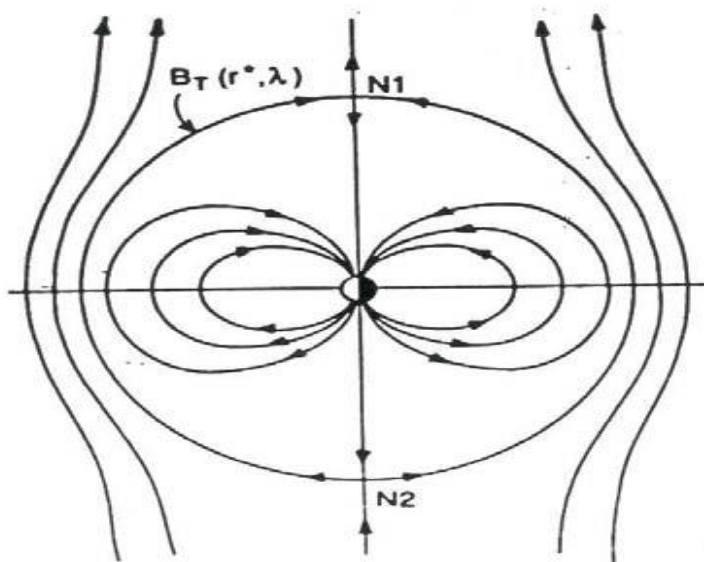
Μέσα από τη διαδικασία επανασύνδεσης των γεωμαγνητικών γραμμών με τις δυναμικές γραμμές του διαπλανητικού πεδίου, η μαγνητόσφαιρα αποτελεί ένα ανοιχτό σύστημα. Αυτό

επιτρέπει στον ηλιακό άνεμο να εισέλθει στην μαγνητόσφαιρα, μεταφέροντας μαζί του την απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία πολλών μαγνητοσφαιρικών φαινομένων.

Η τοπολογία του γήινου μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του γεωμαγνητικού με το διαπλανητικό πεδίο, όταν το διαπλανητικό είναι προσανατολισμένο προς τον βορρά (εικόνα 3.2) ή προς τον νότο (εικόνα 3.3), φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 3.2 Τοπολογία του γεωμαγνητικού πεδίου όταν το διαπλανητικό πεδίο είναι προσανατολισμένο προς τον νότο (Parks, 1991)



Εικόνα 3.3 Τοπολογία του γεωμαγνητικού πεδίου όταν το διαπλανητικό πεδίο είναι προσανατολισμένο προς τον βορρά (Parks, 1991)

Στις εικόνες, από τα σημεία N_1 και N_2 στον γεωμαγνητικό ισημερινό περνάει μια ουδέτερη γραμμή, κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα η επανασύνδεση των μαγνητικών γραμμών, ενώ ταυτόχρονα χωρίζει την περιοχή των ανοικτών δυναμικών γραμμών από τις κλειστές

δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου. Είναι ουσιαστικά ένα δακτυλίδι που περιβάλλει την Γη μέσα από το οποίο οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές, ενώ έξω από αυτό είναι ανοικτές. Προφανώς λόγω συμμετρίας, είναι μια ουδέτερη μαγνητική γραμμή.

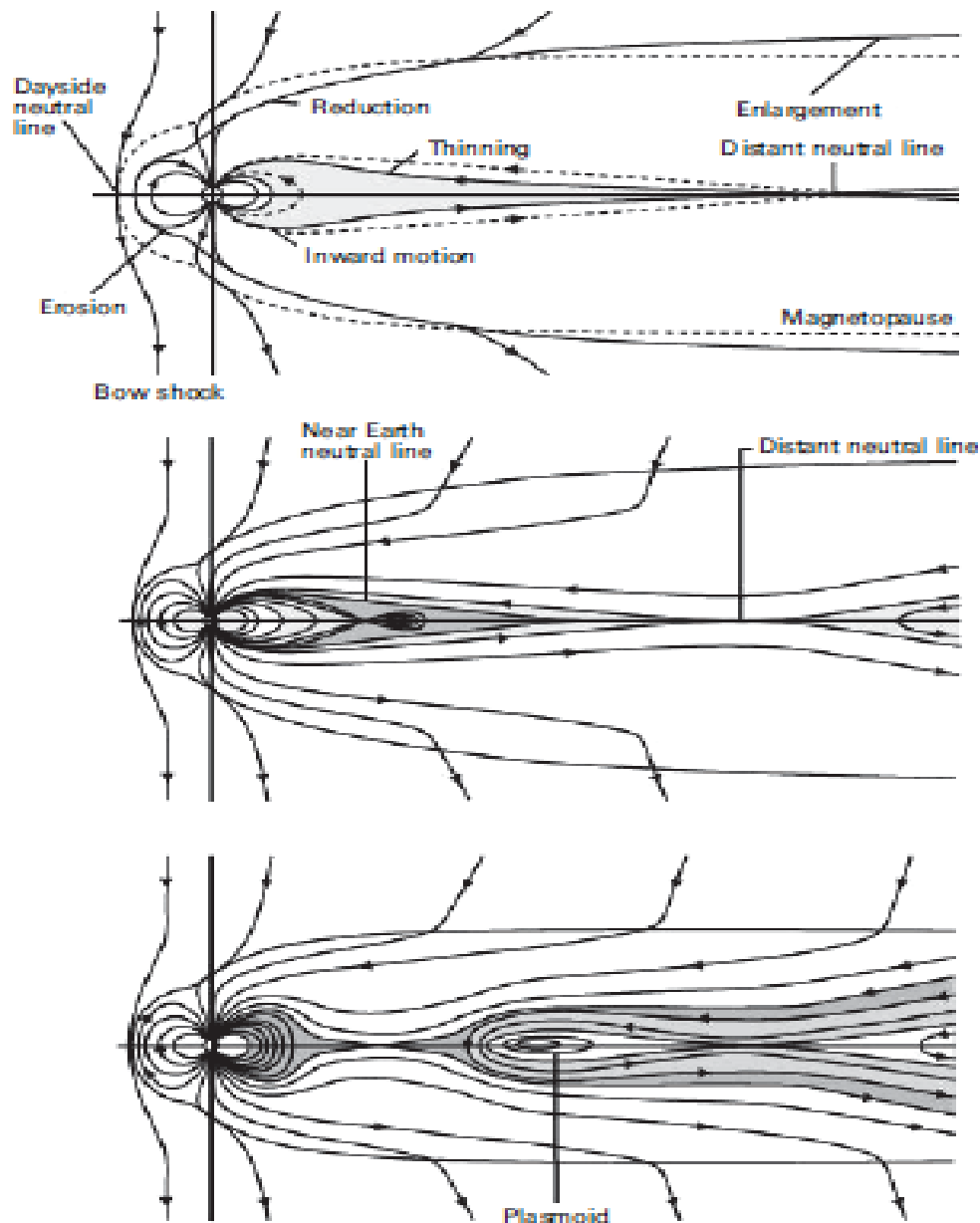
Στις μέρες μας έχουμε διαπιστώσει την σημασία της γνώσης της αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου με το γήινο μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι που δημιουργεί αυτό που λέμε διαστημικό καιρό (Simpson, 2000). Ο **διαστημικός καιρός** είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου με το γήινο μαγνητικό πεδίο. Όπως και στον ατμοσφαιρικό καιρό έχουμε παραμέτρους που τον επηρεάζουν (ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία ανέμου κτλ), έτσι και στον διαστημικό καιρό έχουμε μεταβλητές παραμέτρους που τον χαρακτηρίζουν (πίεση και ταχύτητα του ηλιακού ανέμου). Ουσιαστικά ο διαστημικός καιρός είναι η έννοια της μεταβολής των συνθηκών που επικρατούν κοντά στην γήινη μαγνητόσφαιρα. Ο διαπλανητικός χώρος είναι γεμάτος από ενεργειακά σωματίδια και από μαγνητικά πεδία τα οποία καθορίζουν την τροχιά των σωματιδίων αυτών. Επομένως, μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία, τον ηλιακό άνεμο, την πυκνότητα των σωματιδίων, του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κοντά στον γήινο μαγνητικό πεδίο κτλ, μας συνθέτουν τον διαστημικό καιρό (Randy and Russell, 2007).

3.2 Γεωμαγνητικές καταιγίδες-υποκαταιγίδες

Όταν ο διαταραγμένος ηλιακός άνεμος, εξαιτίας της έκτακτης ηλιακής δραστηριότητας (εκλάμψεις και CMEs), φτάνει στα όρια της γήινης μαγνητόσφαιρας, εισέρχεται σ' αυτήν κάτω από ορισμένες συνθήκες, μεταφέρει ενέργεια σ' αυτήν και προκαλεί έντονες διαταραχές στο γήινο μαγνητικό πεδίο και όχι μόνο, με αποτέλεσμα την δημιουργία **μαγνητικών και ιονοσφαιρικών καταιγίδων**.

Η χαρακτηριστική αντίδραση της γήινης μαγνητόσφαιρας στην εισροή ενέργειας στο εσωτερικό της από τον ηλιακό άνεμο είναι η εκδήλωση **γεωμαγνητικής υποκαταιγίδας** κατά την οποία έχουμε συσσώρευση ενέργειας και σωματιδίων στην μαγνητοσφαίρα και με την διαδικασία της μαγνητικής επανασύνδεσης ελευθερώνονται (εικόνα 2.4) επιτρέποντας σωματίδια να εισέλθουν στην γήινη ατμόσφαιρα μέσω των ανοικτών μαγνητικών γραμμών στις πολικές περιοχές και έτσι έχουμε την δημιουργία του σέλαος. Λόγω των επανασυνδέσεων που συμβαίνουν και στην ημερήσια (λόγω νότιο διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου) και στην νυχτερινή (λόγω συσσώρευσης ενέργειας και σωματιδίων) πλευρά της μαγνητόσφαιρας, είναι δύσκολος ο προσδιορισμός των αιτιών δημιουργίας της υποκαταιγίδας (Daglis, 2007).

Οι υποκαταιγίδες χωρίζονται σε 3 χρονικές φάσεις : την φάση ανάπτυξης, την κύρια φάση και την φάση επαναφοράς. Για να εξετάσουμε την φάση ανάπτυξης, πρέπει να εξετάσουμε τις περιόδους εμφάνισης νότιου διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Την στιγμή που έχουμε εμφάνιση νότιου διαπλανητικού πεδίου δημιουργείται η διαδικασία της επανασύνδεσης στο μπροστινό μέρος της ημερήσιας γήινης μαγνητόσφαιρας (εικόνα 3.4), “φθείρεται” η μαγνητόπαυση σε ένταση και μετακινείται προς τα μέσα. Τότε έχουμε μεταφορά των μαγνητικών δυναμικών γραμμών της μπροστινής μαγνητόσφαιρας στην μαγνητοουρά και άρα και μεταφορά μαγνητικής ροής εκεί, κατά μήκος της μαγνητόσφαιρας (πάνω από τα πολικά χωνιά).



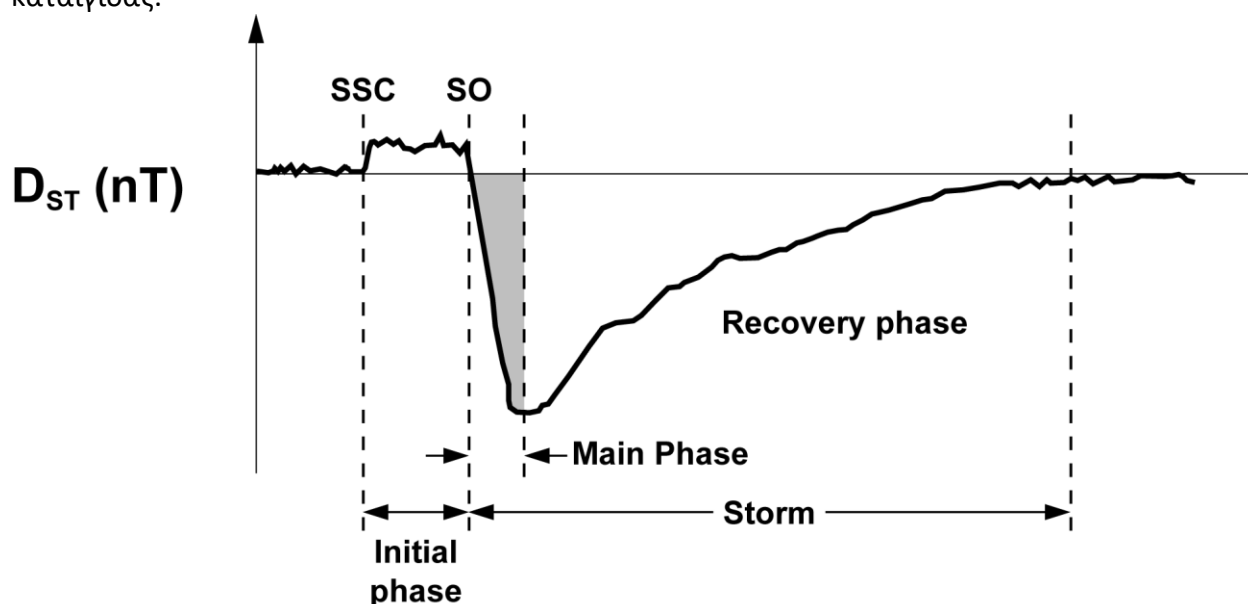
Εικόνα 3.4 Αναπαράσταση της εξέλιξης του μαγνητικού πεδίου και του πλάσματος στην ημερήσια και νυχτερινή πλευρά της γήινης μαγνητόσφαιρας. Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται η φάση ανάπτυξης της υποκαταιγίδας, με την επανασύνδεση να συμβαίνει στην ημερήσια πλευρά και την μεταφορά μαγνητικών δυναμικών γραμμών στην νυχτερινή πλευρά υπό την πίεση του ηλιακού ανέμου συμπιέζοντας ταυτόχρονα τις δυναμικές γραμμές της μαγνητοουράς. Στην συνέχεια έχουμε την δημιουργία του X-point και την δημιουργία ενός ουδέτερου φίλου πλάσματος προς την Γη. Τέλος, έχουμε την διαδικασία επανασύνδεσης κατά την οποία έχουμε απελευθέρωση της συσσωρευμένης μαγνητικής ενέργειας και την εκτίναξη του πλασμοειδούς αντίθετα από την Γη καθώς και την επιτάχυνση σωματιδίων προς την Γη, τα οποία κατευθύνονται προς τα πολικά κενά, δημιουργώντας το φαινόμενο του σέλαος. (Boethmer and Daglis, 2007)

Κατά την κύρια φάση έχουμε την συμπίεση του ουδέτερου φύλλου πλάσματος στην μαγνητοουρά, για 2 λόγους. Πρώτον, επειδή έχουμε την συμπίεση του φύλλου πλάσματος λόγω της αύξησης της μαγνητικής πίεσης στην μαγνητοουρά από την μεταφορά των μαγνητικών δυναμικών γραμμών από την ημερήσια στην νυχτερινή πλευρά και δεύτερον, επειδή το φύλλο πλάσματος βρίσκεται εντός κλειστών δυναμικών γραμμών οι οποίες πιέζονται προς την ημερήσια πλευρά για να ισοσταθμίσουν την μείωση μαγνητικής πίεσης που συνέβη στην ημερήσια πλευρά λόγω της μαγνητικής επανασύνδεσης. Υπό την συνεχή συσσώρευση μαγνητικής ενέργειας στην μαγνητοουρά έχουμε μαγνητική επανασύνδεση και η συσσωρευμένη μαγνητική ενέργεια (ροή) επανέρχεται στην ημερήσια πλευρά. Αυτή είναι η φάση επαναφοράς της υποκαταιγίδας.

Σε περιπτώσεις όπου ο ηλιακός άνεμος ασκεί συνεχόμενη πίεση στην μαγνητόσφαιρα για αρκετές ώρες, η αντίδραση της μαγνητόσφαιρας μπορεί να είναι διαφορετική απ'ότι στις υποκαταιγίδες. Σε τέτοιες περιπτώσεις έχουμε την εκδήλωση μαγνητικών καταιγίδων. Οι **γεωμαγνητικές καταιγίδες** είναι γεγονότα μεταβολής της δομής και της έντασης της γήινης μαγνητόσφαιρας λόγω διαφόρων παραμέτρων. Μια παράμετρος γεωμαγνητικής καταιγίδας είναι και η αυξημένη πίεση της μαγνητόπαυσης προς το εσωτερικό της Γης, είτε από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είτε από φορτισμένα σωματίδια που επιταγχύνονται από τις ηλιακές εκλάμψεις είτε και από τις Στεμματικές Εκτοξεύσεις Μάζας (CME) που φτάνουν στην μαγνητόπαυση. Σ'αυτή την περίπτωση ο ταχύς ηλιακός άνεμος διαταράσσει την μαγνητόσφαιρα της Γης συμπιέζοντάς την για πολλές ώρες και μπορεί να δημιουργηθεί στο σημείο της διαταραχής ένα "παράθυρο" για να περάσουν στο εσωτερικό της μαγνητόσφαιρας φορτισμένα σωματίδια από τον διαπλανητικό χώρο, προκαλώντας διαταραχές σε ηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων και αεροπλάνων, δηλαδή σοβαρά προβλήματα στις τηλεπικοινωνίες και τις πλοηγήσεις μας. Πολύ σπάνια όμως φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της Γης, καθώς απορροφούνται από την ατμόσφαιρά της, εκπέμποντας ισχυρές δόσεις ακτινοβολίας σε μεγάλα ύψη. Ένα τέτοιο "παράθυρο" μπορεί να δημιουργηθεί από μια επανασύνδεση μαγνητικών δυναμικών γραμμών στον μαγνητόπαυση. Γεωμαγνητικές καταιγίδες συμβαίνουν όταν υπάρχει νότιο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο (εικόνα 3.5). Εάν δεν υπάρχει νότια προσανατολισμένο διαπλανητικό πεδίο, τότε δεν δύναται να δημιουργηθεί μαγνητική καταιγίδα και απλά συμπιέζεται η μαγνητόπαυση από τον ηλιακό άνεμο και ενίοτε έχουμε την εισροή φορτισμένων σωματιδίων στην μαγνητόσφαιρα (Dessler and Parker, 1959).

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες έχουν και αυτές 3 φάσεις εξέλιξης, όπως ακριβώς και οι υποκαταιγίδες. Στην φάση ανάπτυξης έχουμε την αύξηση της δυναμικής πίεσης που ασκεί ο ηλιακός άνεμος στην μαγνητόπαυση συμπιέζοντάς την. Η αρχική φάση της καταιγίδας προέρχεται από το ρεύμα που δημιουργείται στην μαγνητόπαυση (εικόνα 2.12, κάτω εικόνα), λόγω απότομης συμπίεσής της από τον ηλιακό άνεμο. Η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου (λόγω του ρεύματος αυτού) στην επιφάνεια της Γης κατευθύνεται προς τον βορρά

(κανόνας δεξιού χεριού), στην ίδια δηλαδή φορά με το γήινο μαγνητικό πεδίο, ενισχύοντας έτσι την ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Στην συνέχεια έχουμε την εμφάνιση νότιου διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, κάτι που ευνοεί τον μηχανισμό της μαγνητικής επανασύνδεσης στην ημερήσια πλευρά του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι επανασυνδεδεμένες μαγνητικές γραμμές στην ημερήσια πλευρά πηγαίνουν δια μεταφοράς και συσσωρεύονται στην μαγνητοουρά. Παράλληλα, ηλιακά σωματίδια εισρέουν στην μαγνητόσφαιρα και κατευθύνονται προς την μαγνητοουρά. Το δακτυλιοειδές ρεύμα ενισχύεται σε ένταση λόγω αύξησης του αριθμού των ενεργητικών ιόντων του από τα εισερχόμενα ηλιακά σωματίδια καθώς και από την ανώτερη ιονόσφαιρα, το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ανάποδης πολικότητας από το γήινο και έτσι προκαλεί μείωση της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου (της οριζόντιας συνιστώσας του) στο επίπεδο του Ισημερινού. Την μείωση αυτή την μετράμε με την βοήθεια του δείκτη Dst, ο οποίος θα αναλυθεί στην συνέχεια, και εφόσον η μείωση αυτή είναι αρκετά μεγάλη ($Dst \leq -50$ nanoTesla), έχουμε την εκδήλωση γεωμαγνητικής καταιγίδας.



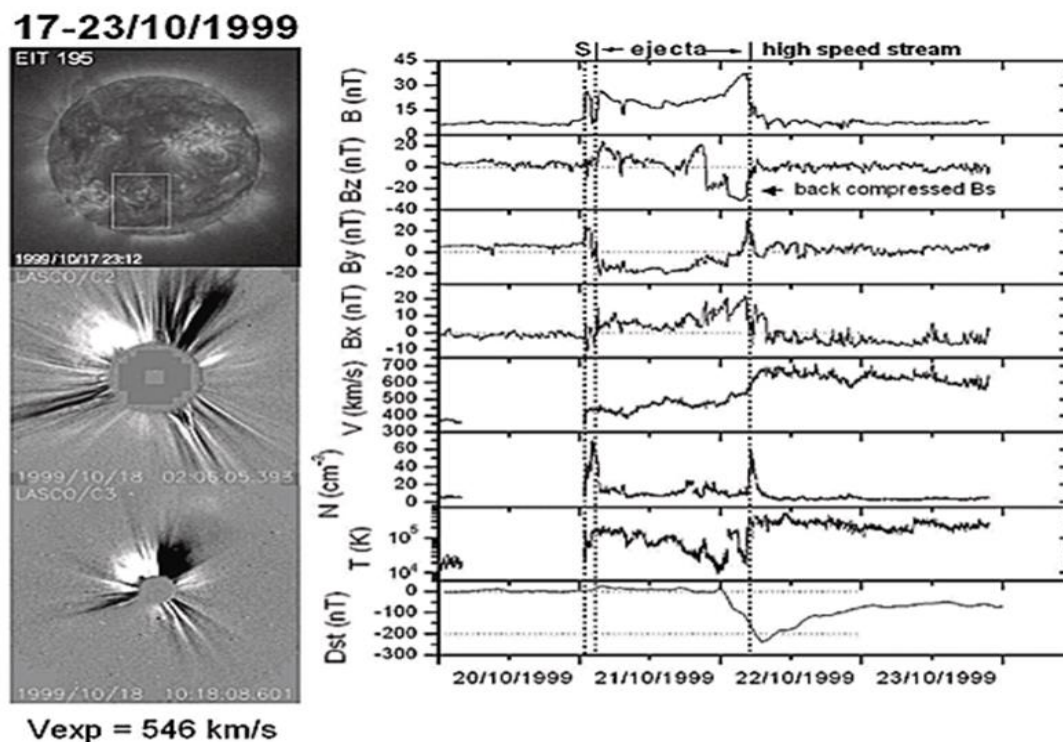
Εικόνα 3.5 Εκδήλωση γεωμαγνητικής καταιγίδας. Ο δείκτης Dst φαίνεται να αυξάνεται στην φάση ανάπτυξης της καταιγίδας, λόγω αύξησης της δυναμικής πίεσης του ηλιακού ανέμου πάνω στην μαγνητόσφαιρα. Στην συνέχεια έχουμε την κύρια φάση της καταιγίδας, όπου ο Dst μειώνεται, λόγω εμφάνισης νότιου διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Τέλος, στην φάση επαναφοράς έχουμε την σταδιακή επαναφορά της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου (Boethmer and Daglis, 2007)

Στην φάση επαναφοράς έχουμε σταδιακή επαναφορά της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου. Η αργή επαναφορά της έντασης οφείλεται στην χρονοβόρα απώλεια των ιόντων του δακτυλιοειδούς ρεύματος (Kozyra and Nagy, 1991). Η απώλεια αυτή συμβαίνει με πολλές φυσικές διαδικασίες (σύγκρουση Coulomb των ιόντων με ηλεκτρόνια των ζωνών Van Allen, διασπορά των ιόντων λόγω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην μαγνητόσφαιρα κτλ.). Η κυριότερη διαδικασία εξ'αυτών είναι η ουδετεροποίηση, όπου ένα ενεργητικό ιόν διέρχεται

κοντά από ένα ουδέτερο άτομο, “προσλαμβάνει” το τελευταίο ηλεκτρόνιο του ουδέτερου ατόμου και έτσι ουδετεροποιείται και ξεφεύγει από την γήινη μαγνητόσφαιρα, αφήνοντας πίσω του το χαμηλοενεργειακό ιόν από το οποίο πήρε το ηλεκτρόνιο. Οι διαδικασίες αυτές διαρκούν αρκετές ημέρες, μέχρι να επανέλθει το δακτυλιοειδές ρεύμα στην αρχική κατάσταση.

Οι τυπικές γεωμαγνητικές καταιγίδες έχουν διάρκεια 1-5 ημέρες. Οι κύριες φάσεις τους διαρκούν περίπου 1 ημέρα (όπου γίνεται η απότομη ελάττωση της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου) ενώ οι φάσεις επαναφοράς (όπου γίνεται η σταδιακή επαναφορά του γεωμαγνητικού πεδίου στην αρχική του φάση ισορροπίας) διαρκούν αρκετές ημέρες.

Στην εικόνα 3.6 παρατίθεται μια τυπική γεωμαγνητική καταιγίδα:



Εικόνα 3.6 Μια γεωμαγνητική καταιγίδα του 1999, όπως καταγράφηκε από επίγειους και δορυφορικούς μετρητές. Στην αριστερή στήλη από πάνω προς τα κάτω: Ηλιακή έκλαμψη που καταγράφηκε στις 17 Οκτωβρίου 1999; Εικόνες από τους LASCO C2 και C3 στις 18 Οκτωβρίου 1999 στις 02:06 UT και 10:18 UT που φαίνεται μια partial halo CME. Στην δεξιά στήλη από πάνω προς τα κάτω: Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο με τις τρεις συνιστώσες τους Bz, By και Bx, ταχύτητα ηλιακού ανέμου (πρωτονίων), αριθμητική πυκνότητα και θερμοκρασία ηλιακού ανέμου και ο δείκτης Dst για την περίοδο 20 με 23 Οκτώβρη 1999.

Βλέπουμε ότι κατά την έναρξή της αυξήθηκε η τιμή της έντασης του συνολικού γεωμαγνητικού πεδίου (πρώτο διάγραμμα, $B(nT)$), ενώ μεταβλήθηκαν αναλόγως οι χωρικές συνιστώσες του B_x , B_y και B_z . Παράλληλα παρατηρούμε ότι αυξήθηκε πολύ απότομα η συγκέντρωση των σωματιδίων (N), ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (V) ξεκίνησε να αυξάνεται με χαμηλότερο ρυθμό, πράγμα που σημαίνει ότι δημιουργήθηκε κάποιο κρουστικό κύμα από κάποια ηλιακή δραστηριότητα, διαπέρασε την Γη προκαλώντας γεωμαγνητική καταιγίδα στις 22 Οκτωβρίου, και στην συνέχεια άρχισε να καταφθάνει ένα γρήγορο ρεύμα ηλιακού ανέμου. Το όλο γεγονός της γεωμαγνητικής καταιγίδας δημιουργήθηκε από μια έκλαμψη, την οποία ακολούθησε μια CME η οποία και θεωρήθηκε η πηγή της καταιγίδας. Η έκλαμψη ήταν υπεύθυνη για την απότομη αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων N , ενώ μετά από περίπου δύο ημέρες έφτασε στην Γη και η CME (η οποία καταγράφηκε από το LASCO). Αυτό φαίνεται και από την 2^η αύξηση της συγκέντρωσης N την στιγμή της άφιξής της στην γήινη μαγνητόσφαιρα (ejecta-CME, δεύτερη κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή στα δεξιά). Η κύρια φάση δηλώνεται από την απότομη ελάττωση του δείκτη Dst , ενώ η αρχική απότομη αύξησή του δηλώνει την έναρξη της μαγνητικής καταιγίδας. Στην φάση επαναφοράς ο δείκτης Dst ξεκινάει με μια απότομη, στην αρχή, επαναφορά, ενώ στην συνέχεια γίνεται πιο ομαλή και διαρκεί περίπου 2-3 μέρες, ανάλογα με την διαταραχή.

Οι καταιγίδες αυτές μελετήθηκαν από τον Bartels, ο οποίος για να τις κατατάξει σε ομάδες, όρισε κάποιους δείκτες που περιγράφουν το μέγεθος των διαταραχών αυτών. Οι δείκτες αυτοί ονομάζονται γεωμαγνητικοί δείκτες και αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

Τέλος, η ταξινόμηση των καταιγίδων γίνεται, με βάση την ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst , ως εξής (C.A.Loewe and G.W.Prolss, 1997) :

- $-100 \leq Dst \leq -50$ nT : Moderate storm
- $-200 \leq Dst \leq -100$ nT : Strong storm
- $-350 \leq Dst \leq -200$ nT : Severe storm
- $Dst \leq -350$ nT : Great storm

ενώ χρησιμοποιώντας την ταξινόμηση με τον δείκτη K_p έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες γεωμαγνητικών καταιγίδων (NOAA) :

- $K_p=5$: Minor storm
- $K_p=6$: Moderate storm
- $K_p=7$: Strong storm
- $K_p=8$: Severe storm
- $K_p=9$: Extreme storm

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε και τις δύο ταξινομήσεις, αφού θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα και των δύο γεωμαγνητικών δεικτών.

3.3 Γεωμαγνητικοί δείκτες

Οι γεωμαγνητικοί δείκτες είναι δείκτες που προσδιορίζουν την τιμή μιας φυσικής παραμέτρου στην μαγνητόσφαιρα της Γης (όπως ο δείκτης Dst) αλλά και γενικά του διαπλανητικού χώρου.

Γενικά ένας δείκτης είναι μια μονότονη συνάρτηση μιας συγκεκριμένης φυσικής παραμέτρου του φαινομένου που προκάλεσε την διαταραχή και μπορεί να προσδιοριστεί απλά (Μαυρομιχαλάκη, 2009). Με την πάροδο του χρόνου προσδιορίζονται ποικίλες φυσικές παράμετροι της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα να ορίζονται συνεχώς νέοι δείκτες για κάθε παράμετρο.

3.3.1 Δείκτες K, K_p, A_k και A_p

Ο K-δείκτης είναι δείκτης των μεταβολών της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σ'έναν επίγειο σταθμό καταγραφής (με μαγνητόμετρο) και μετράει ανά τρεις ώρες τη μέγιστη μεταβολή της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου που προέρχεται από άλλα φαινόμενα, εκτός από την ημερήσια μεταβολή του (Manvielle M. And Berthelie A., 1991). Έχει ημιλογαριθμική κλίμακα, με την οποία μετατρέπεται η διαταραχή (σε nT) σε μια τιμή της κλίμακας 1 έως 9. Ο κάθε επίγειος σταθμός έχει προφανώς διαφορετικές τιμές διαταραχών για την ίδια χρονική στιγμή, εξαρτώμενες από το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού. Επομένως ο κάθε σταθμός έχει δική του κλίμακα για την μετατροπή των διαταραχών της οριζόντιας συνιστώσας του γήινου μαγνητικού πεδίου στην κλίμακα του δείκτη K.

Τα όρια του K-δείκτη που χρησιμοποιούνται για τον σταθμό είναι :

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
min	0	5	10	20	40	70	120	200	330	500(nT)
max	4	0	19	39	69	119	199	329	499	

Εικόνα 3.7 Πίνακας συσχέτισης K δείκτη με την ένταση της μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου στο πλάτος του κάθε επίγειου σταθμού μέτρησης των γεωμαγνητικών διαταραχών

Δηλαδή η μέγιστη τιμή του K-δείκτη είναι 9 και υποδηλώνει διαταραχή του γεωμαγνητικού πεδίου, πάνω από τον σταθμό, της τάξης των 500 nT, δηλαδή τρομερά ισχυρή γεωμαγνητική καταιγίδα. Για την τιμή 5, για παράδειγμα, η διαταραχή είναι μεταξύ 70 και 119 nT. Από την επιστημονική κοινότητα, ως όριο ήρεμης γεωμαγνητικής κατάστασης έχει οριστεί ο αριθμός 4 για τον δείκτη K. Από 5 και πάνω δηλαδή έχουμε την εμφάνιση γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Ο διαπλανητικός δείκτης K_p ορίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των τιμών του δείκτη K από 13 επίγειους πρότυπους σταθμούς σε μεγάλα πλάτη (κυρίως στο βόρειο ημισφαίριο), αφού πρώτα κανονικοποιηθούν οι τιμές κάθε σταθμού στους K_s δείκτες. Αυτό γίνεται μέσα από πίνακες που δίνουν ισοδύναμες κατανομές των K_s τιμών κάθε σταθμού σε κάθε 3-ωρο διάστημα κάθε εποχής.

Επειδή είναι αρκετά χρήσιμο να έχουμε ημερήσιους και όχι μόνο 3-ωρους δείκτες, για να διευκολύνουμε μακροχρόνιες μελέτες, αλλά και για να μην έχουμε λογαριθμικούς δείκτες όπως ο K, αλλά γραμμικούς χάριν ευκολίας, ορίστηκε ο δείκτης A_k . Ο δείκτης αυτός ορίζεται πολλαπλασιάζοντας την μέση τιμή του αντίστοιχου δείκτη K (π.χ. την τιμή 14,5 nT για τον δείκτη $K=2$) με έναν παράγοντα που προκύπτει από τη διαίρεση του πάνω ορίου της περιοχής που αντιστοιχεί σε $K=9$ (δηλαδή λίγο παραπάνω από 500 nT) με τον αριθμό 250. Επομένως ο αριθμός αυτός είναι σχεδόν 2, άρα ο A_k δείκτης θα είναι το διπλάσιο του μέσου πλάτους της διαταραχής, δηλαδή θα είναι $A_k = 29$ για $K=2$ επειδή η μέση τιμή της διαταραχής στο διάστημα αυτό είναι 14,5 nT.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο προκύπτει και ο πλανητικός δείκτης A_p από τον K_p δείκτη. Επομένως, με τους υπολογισμούς αυτούς, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αντιστοιχίας του K_p με τον A_p δείκτη :

$K_p = 0o$	0+	1-	1o	1+	2-	2o	2+	3-	3o	3+	4-	4o	4+
$A_p = 0$	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
$K_p = 5-$	5o	5+	6-	6o	6+	7-	7o	7+	8-	8o	8+	9-	9o
$A_p = 39$	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Εικόνα 3.8 Πίνακας συσχέτισης K_p και A_p δείκτη (http://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp_ap.html)

Βλέπουμε ότι ο δείκτης K_p παίρνει και ενδιάμεσες τιμές εκτός από τις ακέραιες 0, 1, 2... δηλαδή 1-, 2+, 4o κτλ... . Αυτό συμβαίνει για να μπορούμε να προσδιορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την γεωμαγνητική διαταραχή. Από 4+ και πάνω έχουμε ισχυρή γεωμαγνητική διαταραχή, όπως μπορούμε να δούμε και στην ακόλουθη εικόνα 3.9, όπου φαίνεται η ταξινόμηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων από τον οργανισμό NOAA, την οποία ταξινόμηση ακολουθήσαμε στην εργασία μας.

Geomagnetic Storms				
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.	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

Εικόνα 3.9 Ταξινόμηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με βάση τον δείκτη K_p από τον NOAA

Για την μέτρηση του δείκτη K_p υπάρχουν αυτή τη στιγμή 13 σταθμοί στον κόσμο, και είναι οι εξής :

- | | |
|------------------------|----------------|
| 1) MEA Meanook | |
| 2) SIT Sitka | |
| 3) LER Lerwick | |
| 4) ESK Eskdalemuir | |
| 5) LOV Lönköping | |
| 6) BFE Brorfelde | RSV Rude Skov |
| 7) WNG Wingst | |
| 8) WIT Witteveen | NGK Niemegk |
| 9) HAD Hartland | ABN Abinger |
| 10) OTT Ottawa | AGN Agincourt |
| 11) FRD Fredericksburg | CLH Cheltenham |
| 12) EYR Eyrewell | AML Amberley |

Τα στοιχεία αυτά πάρθηκαν από την βάση δεδομένων του NOAA :

(ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/kp_obs.rev)

Τα πρώτα 3 γράμματα στον κάθε σταθμό αναφέρουν την συντομογραφία του. Οι σταθμοί Brorfelde and Lonf, καθώς και οι Eyrewell and Canberra συνεργάζονται ταυτόχρονα ανά δύο μεταξύ τους και δίνουν την μέση τιμή του K_p , επομένως στον τελικό υπολογισμό της παγκόσμιας τιμής του K_p , ο διαιρέτης είναι 11. Επίσης, το παρατηρητήριο του Witteveen έχει κλείσει από τις 31 Μαρτίου του 1988. Αντ'αυτού, από την 1^η Απριλίου του 1988 χρησιμοποιείται ο σταθμός Niemegk της Γερμανίας (NOAA, A list of K_s/K_p Observatories).

3.3.2 Πολικός Δείκτης PC

Πρόσφατα έχει προταθεί ο δείκτης του πολικού κελύφους PC. Ορίζεται ως το μέτρο της έντασης του μανδύα ρεύματος που ρέει από τον ήλιο κατά μήκος του πολικού κελύφους κλείνοντας τους δύο ηλεκτροχειμάρρους του σέλαος. Έτσι δίνει ένα μέτρο της διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος του ηλιακού ανέμου στη μαγνητόσφαιρα. Υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο του ΔF :

$$\Delta F = \Delta H \sin \beta + \Delta D \cos \beta$$

$$(\beta = \lambda + \delta + UT + \varphi)$$

όπου :

- ΔH και ΔD είναι η διασπορά της H και D συνιστώσας από τα ήσυχα επίπεδα,
- $\beta = \lambda + \delta + UT + \varphi$
- δ η μέση απόκλιση του σταθμού,
- λ το γεωγραφικό πλάτος
- φ η γωνία του ανύσματος του ρεύματος με το τοπικό μεσημέρι.

Ο PC δείκτης ορίζεται ως $PC = \Delta F / \alpha$, όπου α μια σταθερά. Τα πλεονεκτήματα αυτού του δείκτη είναι αρκετά. Παρέχει την ίδια πληροφορία για τον ηλιακό άνεμο, όπως ο AL δείκτης με τον οποίο συσχετίζεται πολύ καλά και ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω. Υπολογίζεται με δεδομένα από ένα μόνο σταθμό και μετρά την άμεση απόκριση της μαγνητόσφαιρας (driven process). Το μειονέκτημα είναι ότι επηρεάζεται από την αγωγιμότητα και εξαρτάται από τις μεταβολές της B_y συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου. Συζητείται να οριστεί ως παγκόσμιος σταθερά.

3.3.3 Δείκτες AE

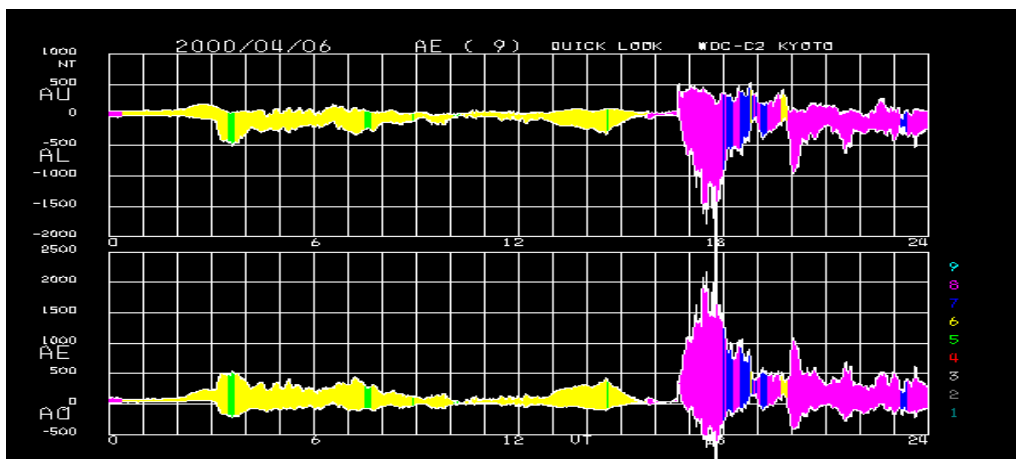
Ο δείκτης AE ορίστηκε σαν το μέτρο της έντασης των ηλεκτροχειμάρων (έντονων ρευμάτων- Auroral Electrojets) της σελαϊκής ζώνης, με βάση τα μαγνητογράμματα της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου από μια ομάδα επίγειων μαγνητικών σταθμών που βρίσκονται ομοιόμορφα κατανομημένοι στη σελαϊκή ζώνη (Davis and Sugiura, 1966). Η οριζόντια συνιστώσα θεωρείται η πλέον κατάλληλη από τα στοιχεία του μαγνητικού πεδίου για την παρακολούθηση των χρονικών μεταβολών. Αυτό εξηγείται αν σκεφθούμε πως η οριζόντια συνιστώσα αναλύεται σε δύο άλλες, την Χ και την Υ.

Η Υ συνιστώσα είναι εκείνη που έχει άμεση σχέση με το εξεταζόμενο φαινόμενο, αφού είναι θετική όταν έχει φορά προς την ανατολή και αρνητική όταν έχει φορά προς τη δύση. Στους σταθμούς της σελαϊκής ζώνης οι αποκλίσεις της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου (ΔΒ) από το πεδίο αναφοράς, σχετίζονται άμεσα με το μέτρο του ηλεκτροχείμαρου προς ανατολές όταν $\Delta B > 0$ ή με το μέτρο του ηλεκτροχείμαρου προς δυσμάς όταν $\Delta B < 0$. Αν η κατανομή των σταθμών στη ζώνη σέλαος είχε άπειρη πυκνότητα, τα υπερτιθέμενα μαγνητογράμματα της οριζόντιας συνιστώσας θα όριζαν ένα άνω και ένα κάτω όριο. Το άνω όριο αντιστοιχεί στον δείκτη AU και το κάτω όριο στον δείκτη AL. Ο δείκτης AE έχει ορισθεί σαν η απόσταση μεταξύ του άνω και του κάτω περιγράμματος των υπερτιθέμενων μαγνητογραμμάτων:

$$AE = AU + AL$$

Οι δείκτες AU και AL εκφράζουν το μαγνητικό πεδίο που επάγεται στην επιφάνεια της Γης από τον ηλεκτροχείμαρο που ρέει προς ανατολές και δυσμάς αντίστοιχα. Είναι όμως δυνατό η επίδραση του κυκλικού ρεύματος, παρόλο που στα πλάτη που βρίσκονται τα παρατηρητήρια είναι κατά δύο φορές μικρότερη σε σχέση με άλλα πλάτη, να αλλοιώσει τις μετρήσεις των δεικτών AU και AL. Το αλγεβρικό άθροισμά τους όμως, που δίνει τον δείκτη AE, είναι απαλλαγμένο απ'αυτές τις αλλοιώσεις και αυτός είναι ο λόγος που ορίστηκε ο δείκτης AE. Εφόσον οι υποκαταιγίδες συνοδεύονται από μια μεγάλη αύξηση της έντασης του ηλεκτροχείμαρου προς δυσμάς, που ρέει από τη σκοτεινή πλευρά του ωσειδούς του σέλαος, ο δείκτης AL αποτελεί ένα πολύ καλό μέσο προσδιορισμού της ένταξης και της ανάπτυξης των υποκαταιγίδων. Ο δείκτης AU, αντιστοιχεί στον ηλεκτροχείμαρο προς ανατολές που ρέει από την φωτεινή πλευρά του ωσειδούς του σέλαος και συζεύγνυται με το ρεύμα της μαγνητόπαυσης. Ο δείκτης αυτός είναι ένα πολύ καλό μέτρο της άμεσης απόκρισης της μαγνητόσφαιρας στις μεταβολές του διαπλανητικού χώρου. Ο δείκτης AE εκφράζει την ολική δραστηριότητα των ηλεκτροχειμάρων του σέλαος κι έτσι μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την ολική ενέργεια που καταναλώνεται στην ιονόσφαιρα σέλαος (Μαυρομιχαλάκη, 2009).

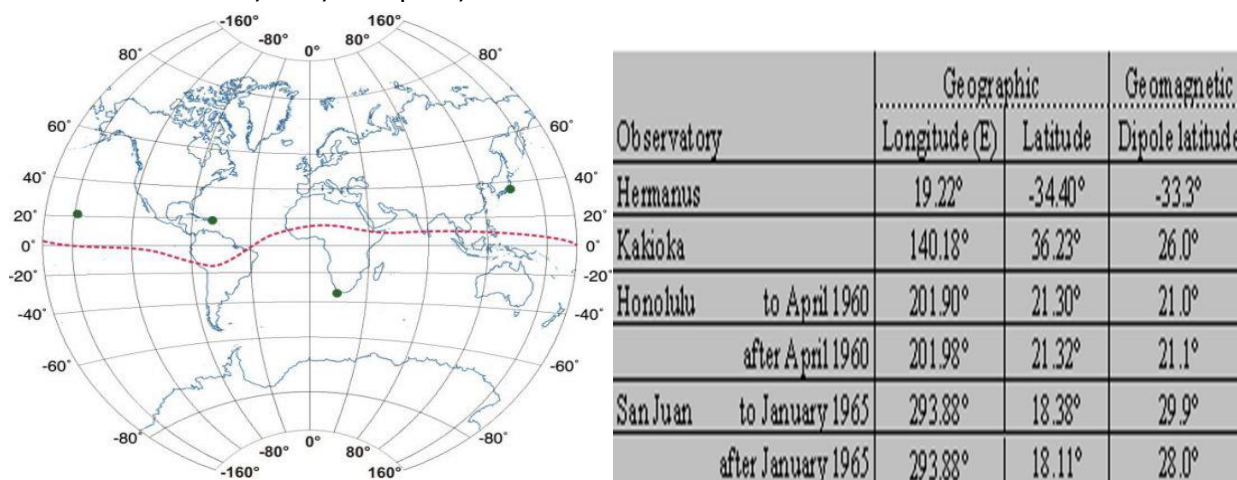
Ο τέταρτος δείκτης AO (Antarctic Oscillation, NOAA Center) φαίνεται να “εμπεριέχει” τις ασυμμετρίες μεταξύ των δύο ηλεκτροχειμάρων του σέλαος (βόρειου και νότιου) και την επίδραση του κυκλικού ρεύματος και έτσι δίνει ένα μέτρο συνολικού ρεύματος που ρέει στη σελαϊκή ζώνη.



Εικόνα 3.10 Μαγνητόγραμμα που δείχνει τις μεταβολές των δεικτών AU, AL, AE και AO κατά την διάρκεια μιας γεωμαγνητικής διαταραχής στην σελαϊκή ζώνη (<http://xanth.msfc.nasa.gov/ACIS/CME/20000406-ae.gif>)

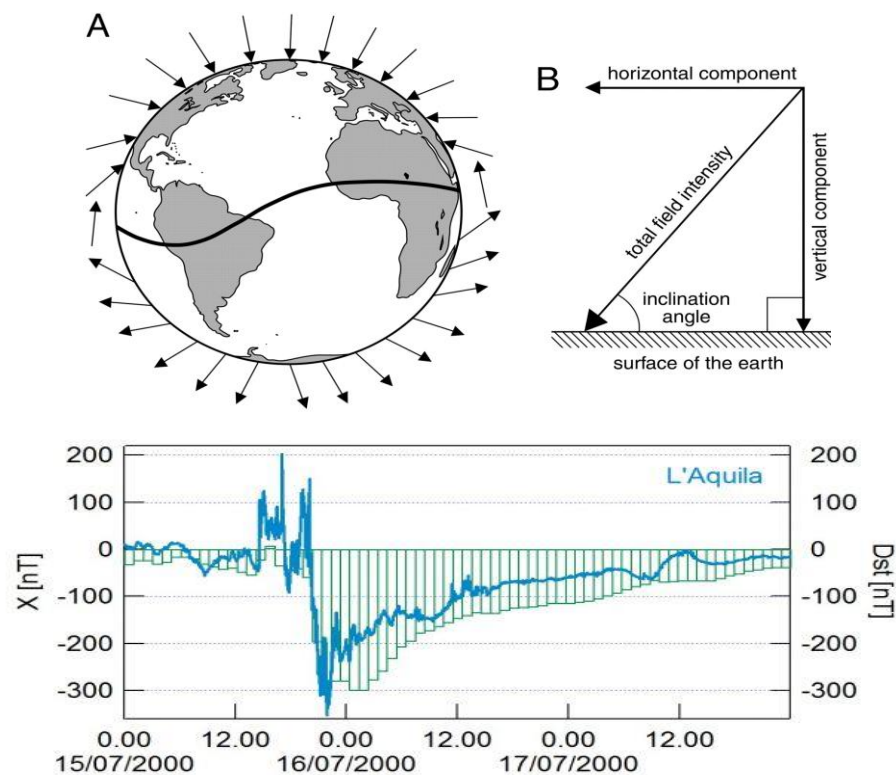
3.3.4 Δείκτης Dst

Ο Dst δείκτης δίνει πληροφορία για τις γεωμαγνητικές διαταραχές (disturbance of the storm) και εξάγεται από τα μαγνητογράμματα τεσσάρων επίγειων σταθμών στον ισημερινό (εικόνα 3.11) οι οποίοι μετράνε τις μεταβολές της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου, όπως και οι σταθμοί του δείκτη K. Για τον υπολογισμό του σημειώνεται ο αριθμός των σταθμών που μέτρησαν την έναρξη της καταιγίδας και οι τιμές των διαταραχών του γεωμαγνητικού πεδίου από κάθε σταθμό. Οπότε παίρνουμε μέσες τιμές για την ένταση του πεδίου από αυτούς τους σταθμούς.



Εικόνα 3.11 Οι θέσεις και οι συντεταγμένες των 4 σταθμών μέτρησης του δείκτη Dst (Honolulu, San Juan, Hermanus, Kakioka από αριστερά προς τα δεξιά) σχεδόν κατά μήκος του γεωμαγνητικού ισημερινού (διακεκομμένη γραμμή)

Ο Dst είναι το αποτέλεσμα μας, και γενικά είναι αρνητικός κατά την κύρια φάση μιας μαγνητικής καταιγίδας. Αυτό συμβαίνει διότι ο Dst μετράει ουσιαστικά την ένταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος το οποίο ενισχύεται κατά την διάρκεια μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο στο επίπεδο του γεωμαγνητικού ισημερινού, αντίθετης πολικότητας από αυτό της Γης, επομένως το μέσο αποτέλεσμα της χρονικής μεταβολής της καταιγίδας είναι ελάττωση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου (εικόνα 3.12). Μεγάλες αρνητικές τιμές του σημαίνουν ισχυρή καταιγίδα.



Εικόνα 3.12 Άνω εικόνα: Η οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου. Είναι μέγιστη στο επίπεδο του Ισημερινού και ελάχιστη στους γεωμαγνητικούς πόλους.

Κάτω εικόνα: Ο δείκτης Dst κατά την διάρκεια μιας μαγνητικής καταιγίδας (οι πράσινες στήλες) που υπολογίζεται σαν ο μέσος όρος της χρονικής μεταβολής της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου (μπλε γραμμή) από τους 4 επίγειους σταθμούς.

3.4 Κέντρα ανίχνευσης Κοσμικής Ακτινοβολίας και γεωμαγνητικής δραστηριότητας

3.4.1 Ανιχνευτές γεωμαγνητικής δραστηριότητας

Υπάρχει ένα παγκόσμιο δίκτυο μετρητών που μετρούν την ένταση και επομένως τις μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου. Οι μετρητές αυτοί αποτελούνται από μαγνητόμετρα τα οποία μετρούν την ένταση των τριών χωρικών συνιστωσών του γεωμαγνητικού πεδίου και καταγράφουν έτσι οποιαδήποτε γεωμαγνητική δραστηριότητα στην επιφάνεια της Γης. Οι χωρικές συνιστώσες του γεωμαγνητικού πεδίου μπορούν να επηρεαστούν από μια διαπλανητική διαταραχή, όπως ένα κρουστικό κύμα ή μια στεμματική εκτίναξη μάζας. Οι διαταραχές του γεωμαγνητικού πεδίου προκαλούνται στην ουσία από τα σωματίδια που προέρχονται από τις διαπλανητικές αυτές διαταραχές που φτάνουν στην Γη. Τα σωματίδια αυτά οδηγούνται στην μαγνητοσφαιρά (λόγω της δομής της γήινης μαγνητόσφαιρας) και εκεί συσσωρεύονται στο φύλλο πλάσματος της μαγνητοσφαιράς. Από εκεί, μετά από μια απότομη μαγνητική διαταραχή τύπου X (μαγνητική επανασύνδεση των δυναμικών γραμμών της περιοχής) επιστρέφουν πίσω προς την γήινη μαγνητόσφαιρα, ενώ ταυτόχρονα η γεωμαγνητική συνιστώσα B_z γίνεται αρνητική. Όλες αυτές οι διαταραχές μαζί δημιουργούν της γεωμαγνητικές καταιγίδες στην γήινη μαγνητόσφαιρα.

Για παράδειγμα, οι μετρητές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας που χρησιμοποιούν τους δείκτες K μετρούν κάθε τρεις ώρες τις μεταβολές της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου και δίνουν τις ανάλογες τιμές στους γεωμαγνητικούς δείκτες (K, K_p , A_p κτλ).

3.4.2 Δορυφορικά συστήματα καταγραφής

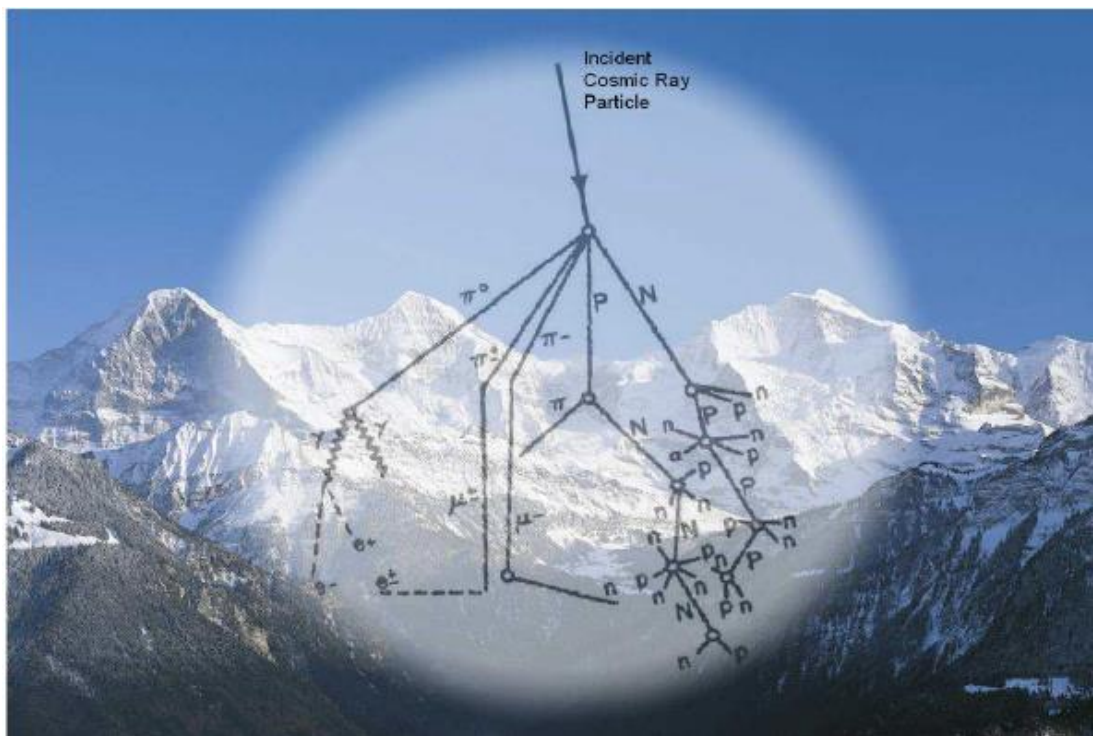
Μια άλλη μέθοδος μέτρησης των συνιστωσών του Διαστημικού Καιρού είναι με την χρήση δεδομένων από δορυφόρους. Πολλοί δορυφόροι φέρουν στο εσωτερικό τους μετρητές που μετρούν πολλές συνιστώσες του διαπλανητικού χώρου ή/και του ηλιακού ανέμου.

Οι δορυφόροι που χρησιμεύουν στην καταμέτρηση διαφόρων συνιστωσών του διαπλανητικού χώρου και του ηλιακού ανέμου είναι οι GOES, οι STEREO A & B, ο PROBA2, SOHO κτλ. Οι περισσότεροι από αυτούς χρησιμεύουν και στην πρόγνωση Διαστημικού καιρού που γίνεται καθημερινά στο Πανεπιστήμιο της Αθήνας.

Οι δορυφόροι GOES καταμετρούν την ροή της ηλιακής ακτινοβολίας στις μαλακές και σκληρές ακτίνες Χ. Ο δορυφόρος PROBA2, παρόλο το μικρό του μέγεθος, έχει πάνω του 5 προγράμματα. Λαμβάνει εικόνες του Ήλιου σε ραδιοσυχνότητες κυρίως, αλλά και μετράει διάφορες παραμέτρους του ηλιακού πλάσματος (ανέμου). Οι δύο δορυφόροι STEREO A & B βρίσκονται σε τέτοια τροχιά γύρω από τον Ήλιο (Εικόνα 3.26) ώστε μαζί με τα ηλιακά παρατηρητήρια στην Γη να έχουμε στερεοσκοπική εικόνα του Ήλιου κάθε στιγμή και να καταγράφουμε κάθε δραστηριότητα που συμβαίνει στην επιφάνεια και την ατμόσφαιρά του.

3.4.3 Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων

Για την παρακολούθηση του διαστημικού καιρού έχει κατασκευαστεί ένα παγκόσμιο δίκτυο 60 περίπου μετρητών νετρονίων εδώ και 60 χρόνια (εικόνα 3.14). Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από τα σωματίδια που έρχονται στην Γη από τον διαπλανητικό χώρο. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι είτε ηλιακής, είτε γαλαξιακής, είτε εξωγαλαξιακής προέλευσης. Όταν εισέρχονται στην γήινη ατμόσφαιρα (αφού πρώτα περάσουν το γεωμαγνητικό πεδίο) αλληλεπιδρούν με τα μόριά της και παράγεται η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία (νετρόνια, πρωτόνια, ηλεκτρόνια, μόνια κτλ, και δημιουργούνται οι λεγόμενοι καταιγισμοί, εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13 Καταιγισμός κοσμικής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα (air shower)

[illegible]

secondary cosmic ray counts

Sept. 2005

September 2005 Forbush Decrease

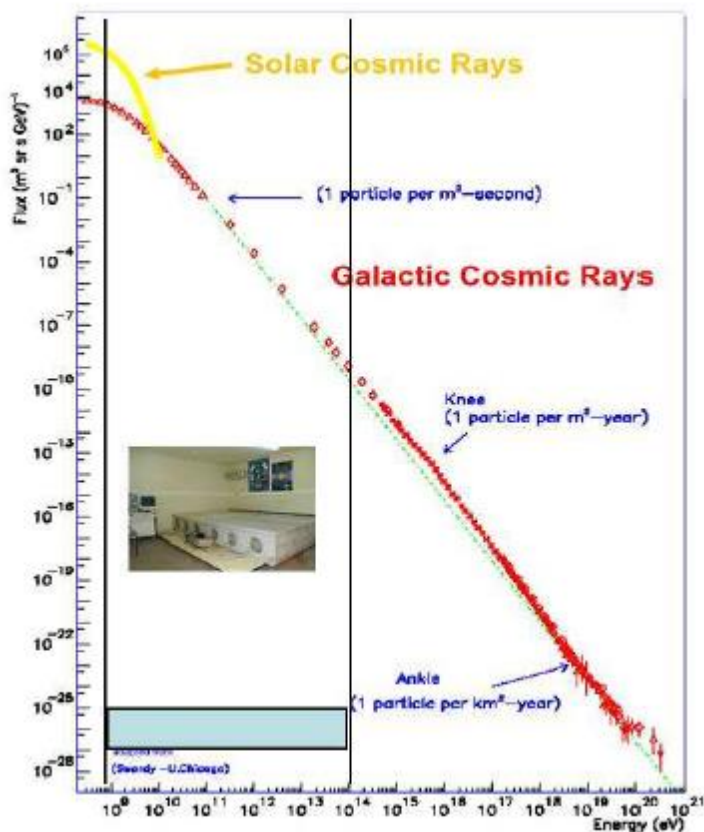
~ 64 ~

Η καταγραφή της κοσμικής ακτινοβολίας από τους επίγειους μετρητές νετρονίων μας έχει δώσει την μορφή του ενεργειακού φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας (εικόνα 3.16). Επειδή στο σχήμα δίνεται ο λογάριθμος της ροής των σωματιδίων ως συνάρτηση του λογαρίθμου της ενέργειας των σωματιδίων αυτών, το φάσμα είναι στην ουσία νόμος δύναμης :

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

όπου k και γ είναι σταθερές.

Ο εκθέτης γ ονομάζεται ενεργειακός εκθέτης και παίρνει τιμή ~ 2.5 .

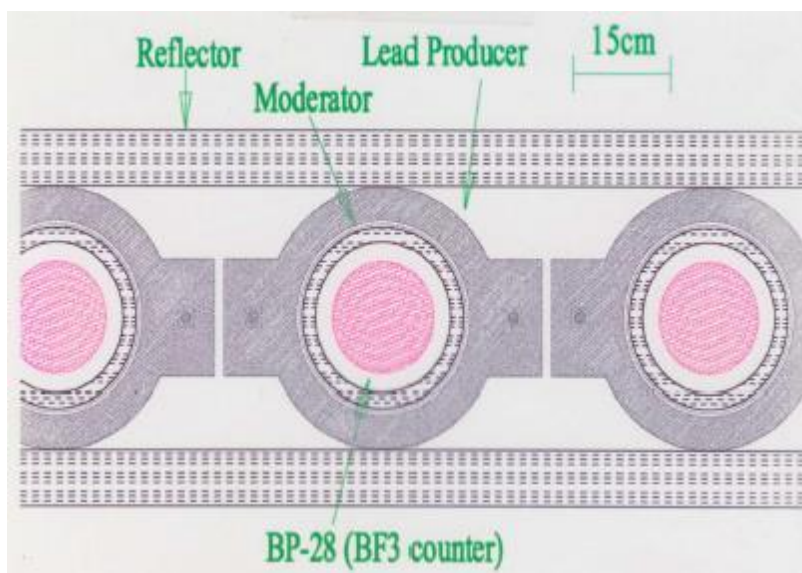


Εικόνα 3.16 Το ενεργειακό φάσμα της Κοσμικής Ακτινοβολίας. Με κίτρινο χρώμα (χαμηλή ενέργεια) παρουσιάζεται η ηλιακή κοσμική ακτινοβολία, ενώ με κόκκινο χρώμα η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία που είναι μεγαλύτερης ενέργειας από την ηλιακή. Στο κάτω δεξιό μέρος του φάσματος φαίνονται το “γόνατο” (knee) και ο “αστράγαλος” (ankle) του φάσματος, πέρα από τον οποίο έχουμε κοσμική ακτινοβολία εξωγαλαξιακής προέλευσης.

Οι μετρητές νετρονίων είναι ευαίσθητοι στις κοσμικές ακτίνες που διεισδύουν στην ατμόσφαιρα της Γης με ενεργειακό κατώφλι από 0.5 έως 20 GeV, σε πολικούς και ισημερινούς

σταθμούς αντίστοιχα. Αυτό το εύρος ενέργειας δεν μπορεί να μετρηθεί με ανιχνευτές στο διάστημα με τον ίδιο απλό, οικονομικό και στατιστικά ακριβή τρόπο όπως μπορεί από τους επίγειους σταθμούς. (Μαυρομιχαλάκη και Γεροντίδου, Σεπτέμβριος 2011).

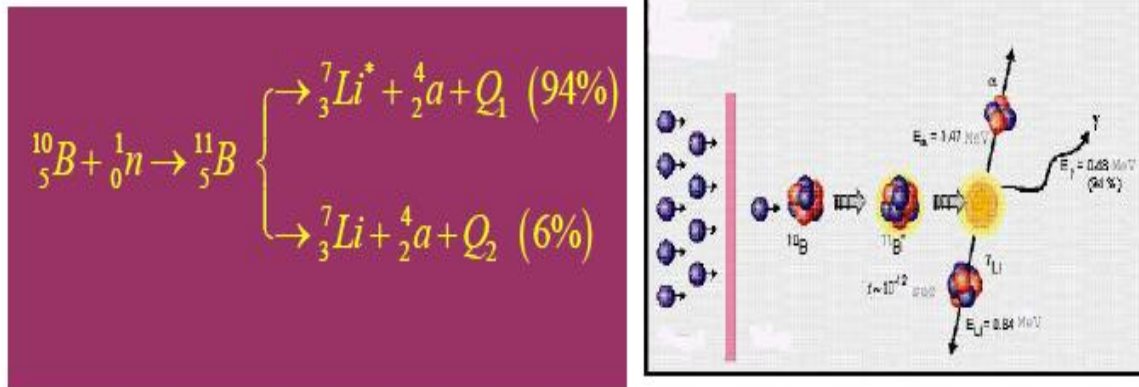
Η δομή ενός τυπικού Μετρητή Νετρονίων τύπου Super xNM64 (x ο αριθμός των ανιχνευτών), σαν και αυτόν που διαθέτει ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.17 και αποτελείται από τα εξής 4 μέρη:



Εικόνα 3.17 Η δομή ενός μετρητή νετρονίων

α) Αναλογικός απαριθμητής (BF₃ counter)

Συγκεκριμένα ο σταθμός της Αθήνας τύπου Super 6NM64 διαθέτει 6 αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Neutron Counter που περιέχουν ¹⁰BF₃ εμπλουτισμένο με ¹⁰B κατά 96%, σε πίεση 0.25 atm. Η ανίχνευση των νετρονίων στηρίζεται στις παρακάτω αντιδράσεις :



Εικόνα 3.18 Οι πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός μετρητή νετρονίων

Όπως φαίνεται από τις αντιδράσεις παράγεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό (94%) Li σε διεγερμένη κατάσταση, το οποίο κατόπιν αποδιεγείρεται εκλύοντας στο περιβάλλον ενέργεια 0.48 MeV. Το παραγόμενο φορτίο (σωμάτιο-α) ανιχνεύεται από τον ενισχυτή και τον διευκρινιστή και καταγράφεται ως μία μέτρηση.

β) Επιβραδυντής

Το σύστημα των ανιχνευτών περιβάλλεται από ένα λεπτό στρώμα πολυαιθυλενίου που ονομάζεται επιβραδυντής (moderator) γιατί ελαττώνει την ταχύτητα των νετρονίων μετά από ένα μικρό αριθμό συγκρούσεων και δεν τα απορροφά σε μεγάλο ποσοστό μετριάζοντας τις ενέργειες τους προς τις θερμικές (thermalisation) έτσι ώστε να διευκολύνεται η ανίχνευσή τους από τον απαριθμητή.

γ) Παραγωγός σωματιών

Προκειμένου να καταγράφονται από τον ανιχνευτή μεγάλες εντάσεις, το σύστημα του ανιχνευτή-επιβραδυντή περιβάλλεται από δακτυλίους μολύβδου καθαρότητας 99.9% (Εικόνα 3.18) που δρά σαν παραγωγός σωματιδίων (producer). Όταν υποατομικά σωματίδια, όπως πρωτόνια και νετρόνια, συγκρούονται ή αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα ενός ατόμου μολύβδου, τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του **βομβαρδισμού** (spallation). Ο πυρήνας του ατόμου εκπέμπει διάφορα δευτερογενή σωματίδια ανάμεσα στα οποία και πολλά νετρόνια.



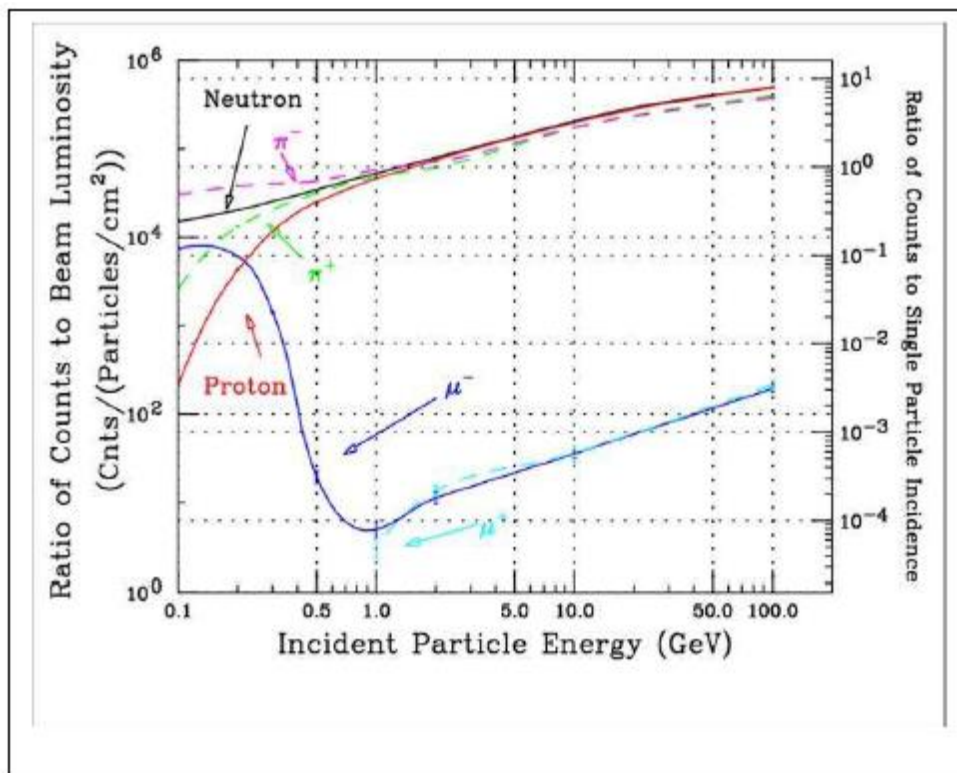
Εικόνα 3.19 Δακτύλιοι μολύβδου από την εγκατάσταση του σταθμού της Αθήνας

Ο μόλυβδος επιλέχθηκε διότι έχει μεγάλο μαζικό αριθμό με αποτέλεσμα οι πυρήνες-στόχοι να είναι μεγάλοι, προκαλώντας έτσι την παραγωγή πολλών νουκλεονίων εξάτμισης. Ο ρυθμός παραγωγής των σωματίων είναι $\sim A^{0,7}$, όπου A ο μαζικός αριθμός του μολύβδου, για νουκλεόνια αρχικής ενέργειας 100-700 MeV και ο οποίος ελαττώνεται για μεγαλύτερες ενέργειες. Ο μόλυβδος έχει επίσης σχετικά μικρή ενεργή διατομή θερμικής απορρόφησης (~ 0.17 barn).

δ) Ανακλαστήρας σωματίων

Το όλο σύστημα περιβάλλεται από ένα παχύ στρώμα πολυαιθυλενίου που ονομάζεται ανακλαστήρας (reflector), ο οποίος ανακλά τα ανεπιθύμητα νετρόνια χαμηλής ενέργειας του περιβάλλοντος. Σκοπός του ανακλαστήρα είναι επίσης να μετριάξει τις ενέργειες των νετρονίων που ανακλά. Έτσι κατασκευάζεται από ένα υλικό που περιέχει υδρογόνο, π.χ. παραφίνη ή πολυαιθυλένιο.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20, η απόκριση των Μετρητών Νετρονίων σε πρωτογενή αδρόνια ενέργειας >1 GeV είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ό,τι σε μίονια της ίδιας ενέργειας.



Εικόνα 3.20 Απόκριση του Μετρητή Νετρονίων στα διάφορα είδη σωματιδίων (Clem and Dorman, 2000)

3.4.4 Ο Μετρητής Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών

Ο σταθμός της Αθήνας ξεκίνησε την λειτουργία του το 1970 με ένα μετρητικό σύστημα 3NM64, που ήταν τοποθετημένο στην οροφή του παλιού κτιρίου Φυσικής στο κέντρο της Αθήνας.

Με την στήριξη του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων και με την συνεργασία του Ινστιτούτου Γήινου Μαγνητισμού, Ιονόσφαιρας και Ραδιοκυμάτων της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (IZMIRAN, Drs V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko), εγκαταστάθηκε στο νέο κτίριο Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών ένας σύγχρονος μετρητής νετρονίων 6-NM64, ο οποίος λειτουργεί από το Νοέμβριο του 2000 υπό την διεύθυνση της καθηγήτριας κ. Ελένης Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη (Mavromichalaki et al., 2001).



Εικόνα 3.21 Εικόνα από τον νέο σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών

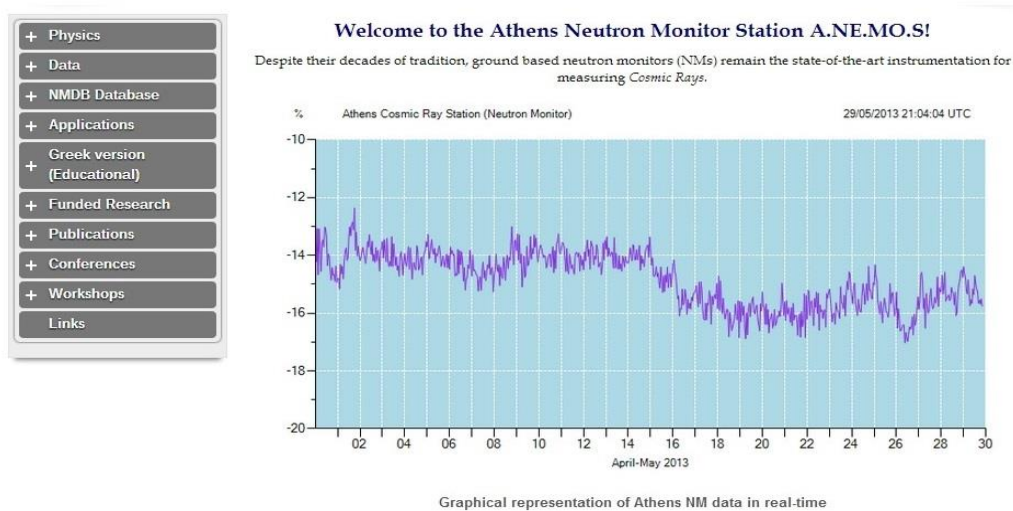
Ο Μετρητής Νετρονίων του σταθμού της Αθήνας αποτελείται από 6 απαριθμητές Super NM64 ενώ τα χαρακτηριστικά της θέσης του παρατίθενται στην ιστοσελίδα του σταθμού και είναι τα παρακάτω:

- Ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας : 260 m
- Γεωγραφικό Πλάτος-Μήκος : $37^{\circ}58' \text{ N} - 23^{\circ}47' \text{ E}$
- Μέση ατμοσφαιρική πίεση : 980 mbar
- Γεωμαγνητική δυσκαμψία : 8.53 GV

Ο σταθμός αυτός είναι τοποθετημένος σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου, καθώς ζυγίζει αρκετούς τόνους. Είναι σε συνεχή 24-ωρη λειτουργία και είναι ο μοναδικός σταθμός στα Βαλκάνια και στην Νοτιοανατολική Μεσόγειο. Έχει την δυνατότητα καταγραφής και μετάδοσης δεδομένων κοσμικής ακτινοβολίας υψηλής ανάλυσης (1-hour, 1-min & 1-sec) σε πραγματικό χρόνο (<http://cosray.phys.uoa.gr>). Από το 2006 στο σταθμό δημιουργήθηκε Κέντρο Παρακολούθησης Διαστημικού Περιβάλλοντος (Athens Neutron Monitor Data Processing - ANMODAP Center), σε συνεργασία με όλους τους τότε σταθμούς καταμέτρησης νετρονίων "πραγματικού χρόνου" κατανεμημένους σε Παγκόσμια κλίμακα, ενώ το κέντρο συμπληρώνεται με δορυφορικά δεδομένα από τις αποστολές Advanced Composition Explorer (ACE) και Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) (Mavromichalaki et al., 2005; 2009). Από το 2008 συμμετέχει ενεργά στην δημιουργία της Ευρωπαϊκής Βάσης Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων (<http://www.nmdb.eu>) (Mavromichalaki et al., 2011).



Εικόνα 3.22 Εικόνες από τον Μετρητή Νετρονίων στο Πανεπιστήμιο Αθηνών



Εικόνα 3.23 Εικόνα από τον ιστότοπο του Μετρητή Νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών

Από τους 60 επίγειους σταθμούς νετρονίων στην Γη, περίπου 20 σταθμοί έχουν την δυνατότητα καταμέτρησης της κοσμικής ακτινοβολίας και παροχής δεδομένων σε “πραγματικό χρόνο”. Οι σταθμοί αυτοί τροφοδοτούν τον κεντρικό διακομιστή (server) της

Ευρωπαϊκής Βάσης Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων (NMDB) που βρίσκεται στο Κίελο της Γερμανίας, ενώ έχουν δημιουργηθεί τρεις ακόμα βάσεις “καθρέφτες” (mirror servers) στην Αθήνα, στην Ουλού και στην Μόσχα με σκοπό την διασφάλιση της ευελιξίας και της απρόσκοπτης λειτουργίας της NMDB.

Κάθε σταθμός χαρακτηρίζεται από κάποιες συνιστώσες, όπως είναι το γεωμαγνητικό πλάτος του, το οποίο χαρακτηρίζει και την μαγνητική δυσκαμψία στην περιοχή του σταθμού (είναι η “δυσκολία” που συναντούν τα φορτισμένα σωματίδια προκειμένου να περάσουν το γεωμαγνητικό πεδίο και να εισέλθουν στην γήινη ατμόσφαιρα), αλλά και την ατμοσφαιρική πίεση στο ύψος του σταθμού.

Μπορεί να φαίνεται περίεργο στην αρχή, αλλά οι επίγειοι μετρητές έχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των δορυφορικών μετρητικών συστημάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι :

1. Διαθέτουν μεγάλη ανιχνευτική επιφάνεια (μερικά m^2)
2. Είναι τοποθετημένοι στο έδαφος. Αυτό τους καθιστά πολύ εύχρηστους στην κατασκευή και την συντήρησή τους, αλλά και πιο οικονομικούς στην κατασκευή και την λειτουργία τους
3. Έχουν μεγάλη σταθερότητα στις μετρήσεις τους
4. Καλύπτουν το υψηλότερο τμήμα του πρωτογενούς ενεργειακού φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας (από 500 MeV μέχρι 20 GeV)
5. Έχουν υψηλούς ρυθμούς καταγραφής σωματιδίων
6. Το σύνολο των μετρητών νετρονίων αποτελεί ένα παγκόσμιο εκτεταμένο δίκτυο.

3.5 Κέντρο Πρόβλεψης Διαστημικού Καιρού του Πανεπιστημίου της Αθήνας

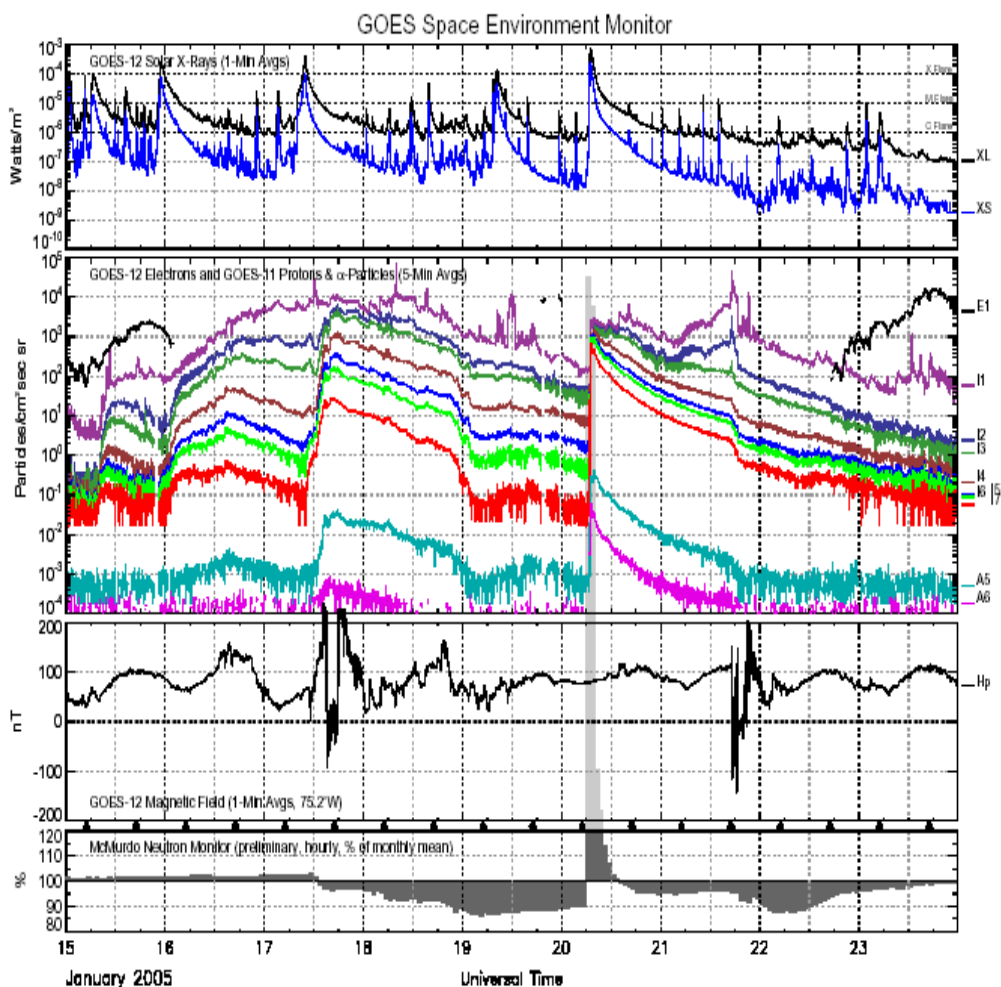
Ο σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας έχει αναπτύξει διάφορες εφαρμογές στα πλαίσια πρόβλεψης του Διαστημικού Καιρού, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω :

Α) Προειδοποιητικό σήμα επικίνδυνων ενεργητικών σωματιδίων

α) Από τις μετρήσεις της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την ροή των πρωτονίων υψηλής ενέργειας που καταγράφεται από δορυφόρους και επίγειους μετρητές. Όταν τα ηλιακά πρωτόνια ξεπεράσουν σε ενέργεια τα 10MeV και σε ροή τα 10 pfu ($1 \text{ pfu} = 1 \text{ particle/cm}^2/\text{s/sr}$) τότε ονομάζονται **πρωτονικά γεγονότα** (Gerontidou et al., 2009). Είναι συνήθη φαινόμενα του Ήλιου και δεν επηρεάζουν πολύ την υγεία ή την τεχνολογία μας. Όταν όμως ξεπεράσουν σε ενέργεια τα 500 MeV τότε γίνονται αρκετά επικίνδυνα και για την υγεία μας αλλά κυρίως για την τεχνολογία (δορυφόρους, επικοινωνίες κτλ). Τα γεγονότα αυτά ονομάζονται επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE) και είναι προφανώς αναγκαίο να εντοπίζονται και έτσι να υπάρχει προειδοποίηση όσο το δυνατόν πιο νωρίς για την άφιξή τους ούτως ώστε να είμαστε έτοιμοι να λάβουμε τα απαραίτητα μέτρα (π.χ. να κλείσουμε τα όργανα ενός δορυφόρου για να μην καταστραφούν). Τα πρωτόνια υψηλότερης ενέργειας (δηλαδή τα GLEs) επειδή έχουν μικρότερη διάχυση από τα πρωτόνια μικρότερης ενέργειας (αυτό προκύπτει από τις εξισώσεις κίνησής τους) μπορούν να έχουν καλύτερη συνοχή από τα μικρότερης ενέργειας, επομένως να καταφθάνουν στην Γη γρηγορότερα απ'ότι τα μικρότερης ενέργειας (Rinehart, 1967). Και επειδή είναι μεγαλύτερης ενέργειας, δεν μπορούν να καταγραφούν από τους δορυφόρους (πλην ελαχίστων καινούργιων) γιατί για να καταγραφούν χρειάζονται μετρητές μεγάλης διατομής. Αυτοί οι μετρητές μπορούν να υπάρξουν (για την ώρα) πολύ εύκολα στην επιφάνεια της Γης, όπως αναλύσαμε στην παράγραφο 3.2.2.

β) Επομένως πρώτα φθάνουν στη Γη τα πρωτόνια υψηλότερης ενέργειας, που καταγράφονται από τους επίγειους μετρητές, και μετά τα χαμηλότερης ενέργειας, τα οποία καταγράφονται από τους δορυφόρους. Επομένως υπάρχει μια χρονική διαφορά άφιξης των ενεργειακών σωματιδίων τα οποία μπορούν να καταγράψουν οι επίγειοι και οι εξωπλανητικοί μετρητές, την οποία οι επίγειοι μετρητές μπορούν να “εκμεταλευτούν” ώστε να γίνουν πιο έγκαιρες προβλέψεις των γεγονότων GLEs. Αυτή η χρονική διαφορά (μερικών λεπτών) φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα 3.24. Η ξαφνική αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

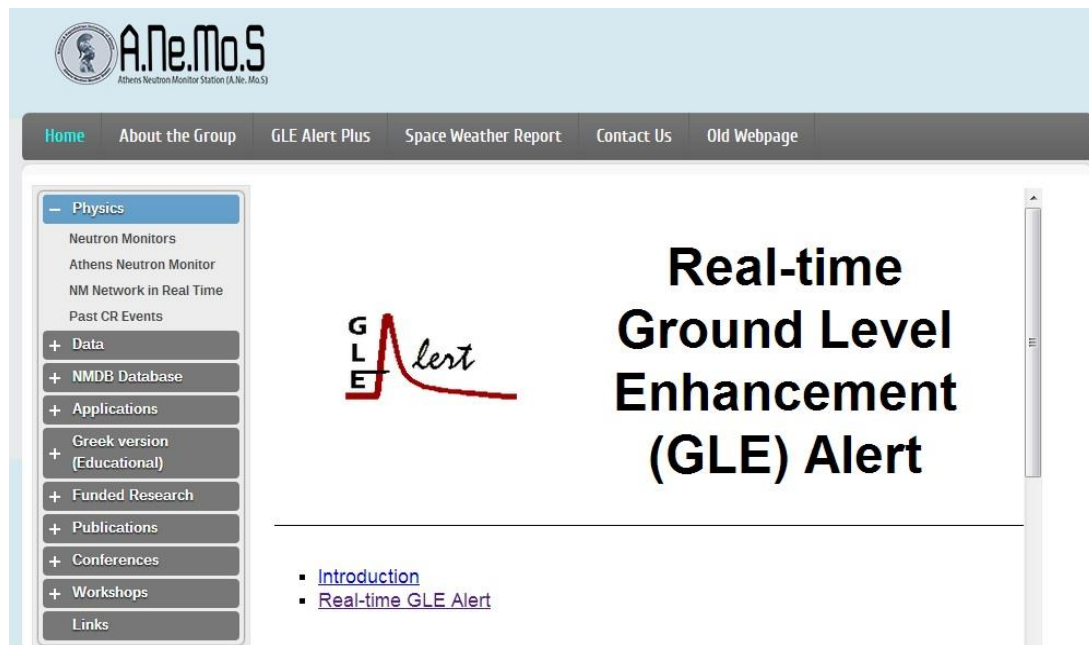
προκαλείται από τα GLEs και είναι μια ένδειξη για την άφιξή τους, εφόσον αυξάνουν πολύ την νουκλεονική συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφουν οι επίγειοι μετρητές.



Εικόνα 3.24 Η ξαφνική αύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας (κάτω γκρι διάγραμμα από τον σταθμό McMurdo) φαίνεται να συμβαίνει λίγο νωρίτερα από την αύξηση της ροής των πρωτονίων μέτριας ενέργειας (πολύχρωμο διάγραμμα από τον GOES 12).

Στον σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος προειδοποίησης γεγονότων GLE σε πραγματικό χρόνο και παρέχεται και στην ιστοσελίδα του σταθμού (εικόνα 3.25). Ο αλγόριθμος αυτός είναι σε θέση να προειδοποιεί για εισερχόμενα GLE γεγονότα στην Γη. Η χρησιμότητά του είναι μεγάλη, και αυτό φαίνεται από το πρόσφατο επίτευγμα του αλγορίθμου, όταν στις 17 Μαΐου 2012 (GLE 71) το πρόγραμμα εντόπισε και προειδοποίησε σε πραγματικό χρόνο το γεγονός αυτό 39 λεπτά πριν το

καταμετρήσουν οι δορυφόροι GOES. Μετά την προειδοποίηση αυτή (GLE Alert, εικόνα 3.26) το κέντρο NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ξεκίνησε διαδικασία συνεργασίας με τον σταθμό της Αθήνας για τον έγκαιρο εντοπισμό τέτοιων γεγονότων (Papaioannou et al., 2013).



Εικόνα 3.25 Αλγόριθμος συναγερμού GLE γεγονότων

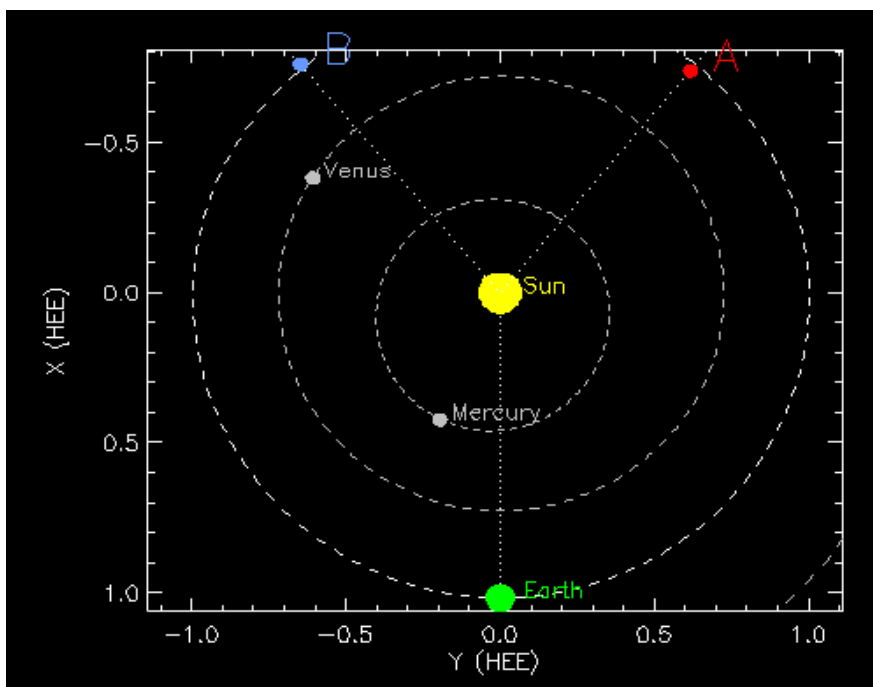
Β) Κέντρο παρακολούθησης και πρόβλεψης Διαστημικού Καιρού

Ένα από τα κέντρα πρόβλεψης του διαστημικού καιρού λειτουργεί από τις αρχές του 2012 και στο σταθμό Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας.

Σε καθημερινή βάση παρακολουθείται, από προγράμματα επεξεργασίας εικόνας και δεδομένων (διαγραμμάτων), η ηλιακή δραστηριότητα, καθώς και οι διαπλανητικές συνθήκες.

Χρησιμοποιούνται δεδομένα από τους δορυφόρους GOES, SPO, STEREO και PROBA2, τα οποία και επεξεργάζονται καταλλήλως και δίδεται μια καθημερινή αναφορά (report) της συμπεριφοράς του δείκτη A_p αλλά και της γενικής κατάστασης στην μαγνητόσφαιρα της Γης για τις επόμενες 3 ημέρες (<http://cosray.phys.uoa.gr/spaceweatherreport>).

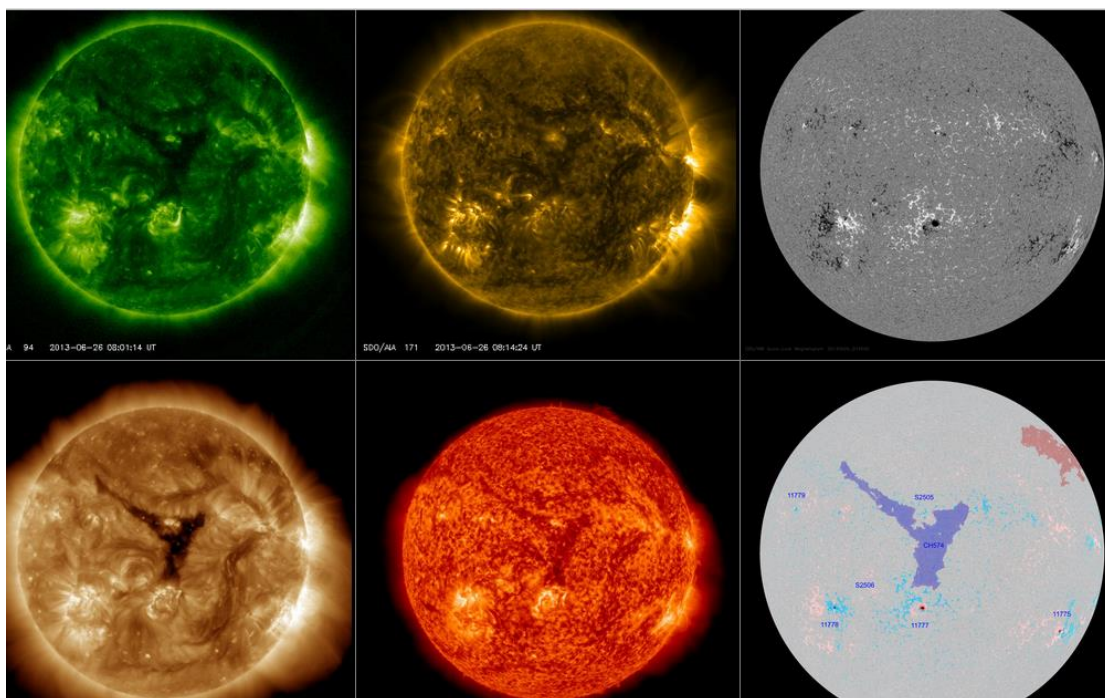
Για να γίνει η πρόβλεψη του Διαστημικού Καιρού των επόμενων 3 ημερών, η επιστημονική ομάδα του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας επεξεργάζεται και μελετάει τις παρεχόμενες πληροφορίες από τις προαναφερθέντες πηγές. Πιο συγκεκριμένα, παρακολουθούνται διάφορες παράμετροι του διαπλανητικού χώρου αλλά και της γήινης μαγνητόσφαιρας, οι οποίες μετρώνται από τους δορυφόρους αλλά και τους επίγειους μετρητές. Προφανώς σημαντικό ρόλο παίζει η θέση των δορυφόρων στον διαπλανητικό χώρο. Παρακάτω φαίνεται για παράδειγμα η θέση των δορυφόρων STEREO A και B (εικόνα 3.27).

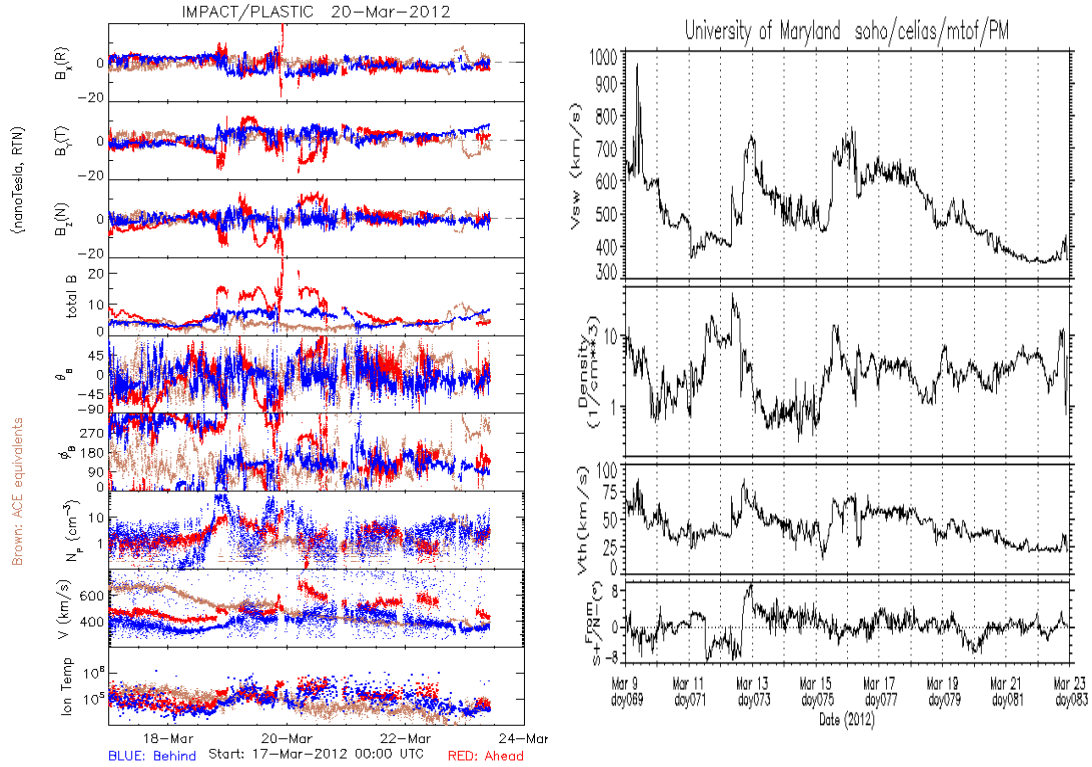


Εικόνα 3.27 Οι θέσεις των δορυφόρων STEREO A&B στον διαπλανητικό χώρο. Είναι τέτοιες οι θέσεις ώστε να έχουμε στερεοσκοπική εικόνα του Ήλιου μαζί με τα ηλιακά παρατηρητήρια που βρίσκονται στην τροχιά της Γης

Ακολουθούνται τα εξής βήματα για την διεξαγωγή μιας αναφοράς πρόγνωσης (forecasting report) του διαστημικού καιρού:

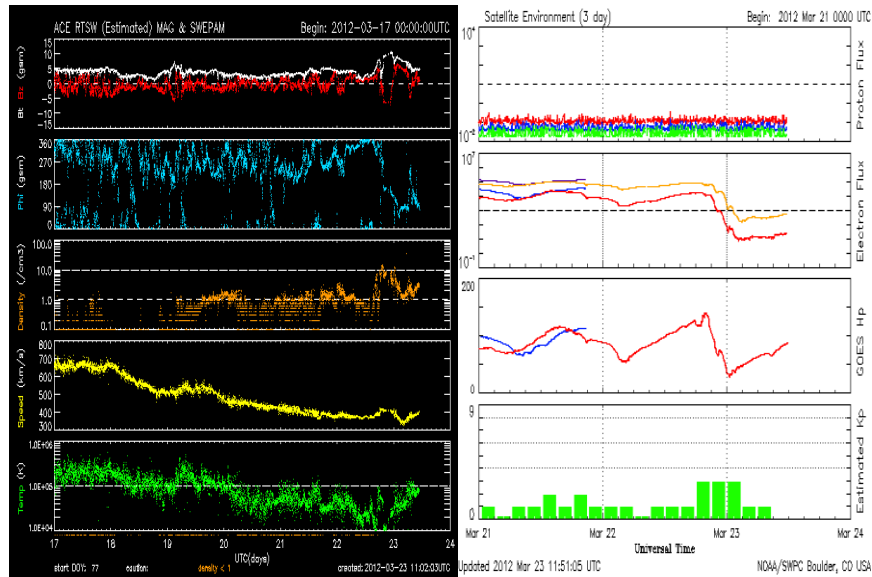
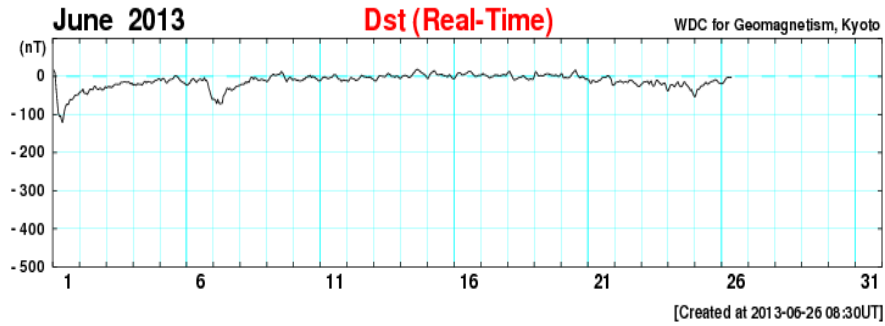
1. Από την ιστοσελίδα του IZMIRAN (<http://sw-forecast.izmiran.ru/sw1.html>) παρακολουθείται η κατάσταση που επικρατεί στον διαπλανητικό χώρο και τον Ήλιο. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν σχεδόν όλες τις παραμέτρους του ΗΑ και της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας του Ήλιου. Για παράδειγμα, μελετάται η επιφάνεια του Ήλιου σε διάφορα μήκη κύματος (εικόνα 3.28) έτσι ώστε να πληροφορηθούμε για τυχόν ενεργές περιοχές, όπως είναι οι στεμματικές οπές (σκούρες περιοχές) ή οι εκλάμψεις και οι CMEs (φωτεινές περιοχές).



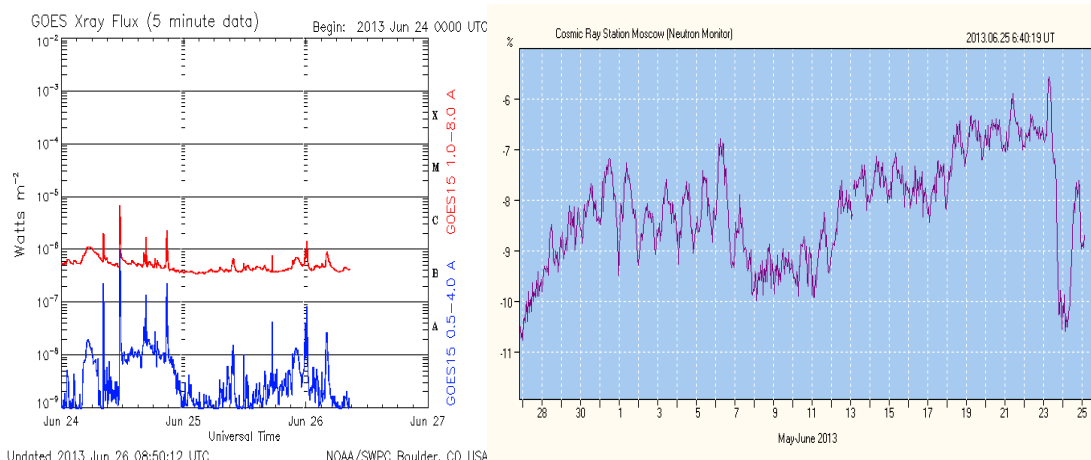


Εικόνα 3.29 Η ένταση των χωρικών συνιστωσών του γεωμαγνητικού πεδίου (αριστερά) μαζί με την ταχύτητα και την πυκνότητα του ΗΑ όπως μετρώνται από τους δορυφόρους SOHO και START

Επίσης λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν και οι εκτιμώμενοι γεωμαγνητικοί δείκτες K_p και Dst για να φανεί η δραστηριότητα του γεωμαγνητικού πεδίου και το αν είμαστε ή όχι στο μέσον κάποιας γεωμαγνητικής καταιγίδας (εικόνα 3.30), καθώς και η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας στην Γη αλλά και η ηλιακή ροή στις ακτίνες X από τους GOES για να ελέγξουμε αν έγινε κάποιο γεγονός GLE ή κάποια έκλαμψη αντίστοιχα (εικόνα 3.31).

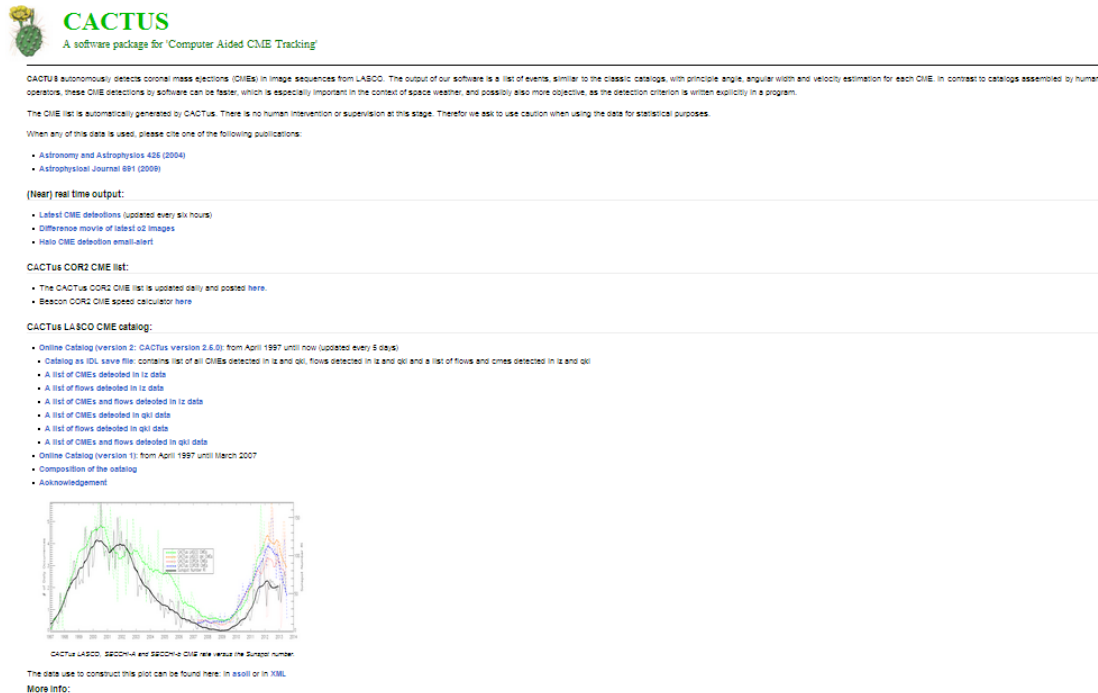


Εικόνα 3.30 Ο δείκτης Dst (πάνω), ο δείκτης K_p (κάτω δεξιά) και οι ροές των φορτισμένων σωματιδίων στον διαπλανητικό χώρο



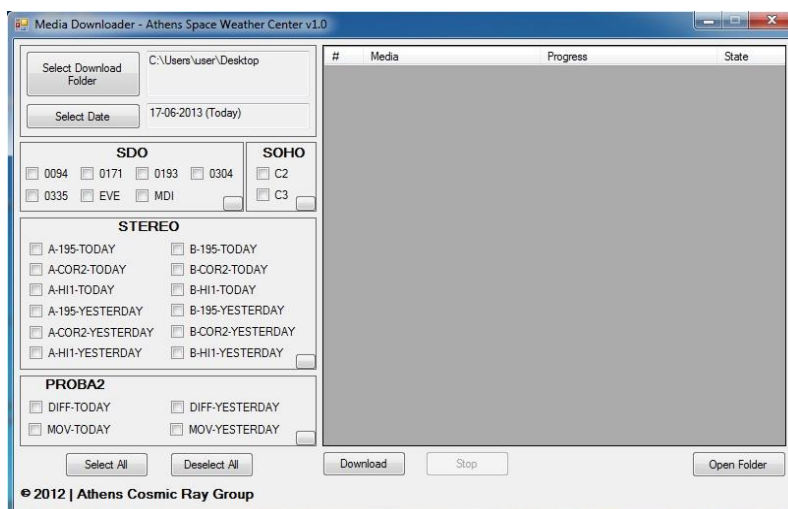
Εικόνα 3.31 Η ηλιακή ροή στις ακτίνες X από τους δορυφόρους $GOES$ (αριστερά) και η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης (δεξιά). Φαίνεται καθαρά μια μείωση *Forbush* στην δεξιά μεριά του διαγράμματος, πράγμα που μας πληροφορεί ότι είμαστε στο μέσον μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας

Τέλος, κάνουμε και έλεγχο για τυχόν CMEs που μπορούν να επηρεάσουν το γεωμαγνητικό πεδίο από την ιστοσελίδα του Βασιλικού Παρατηρητηρίου του Βελγίου. Το Παρατηρητήριο έχει αναπτύξει ένα πρόγραμμα που ονομάζεται CACTUS (<http://www.sidc.oma.be/cactus/>) και από εκεί μπορούμε να πληροφορηθούμε για τις CMEs (Εικόνα 3.32)



Εικόνα 3.32 Ο αλγόριθμος CACTUS του Βασιλικού Παρατηρητηρίου του Βελγίου

2. Για το 2^ο βήμα χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από την Ομάδα και ονομάζεται “MediaDownloader” (εικόνα 3.33). Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει την δυνατότητα να “κατεβάσουμε” αρχεία εικόνας και κίνησης (βίντεο) του Ήλιου και έτσι μπορούμε να δούμε την δραστηριότητα του Ήλιου, όπως εκλάμψεις και CMEs. Τα αρχεία αυτά τα λαμβάνει το πρόγραμμα από τις ίδιες τις ιστοσελίδες των βάσεων δεδομένων των προαναφερθέντων δορυφόρων. Μπορούμε να δούμε επίσης και στεμματικές οπές και γενικά ενεργές περιοχές, να δούμε σε ποιά περιοχή του Ήλιου βρίσκονται και να υπολογίσουμε έτσι κατά πόσο και πότε θα επηρεάσουν το γεωμαγνητικό πεδίο (άρα και τον δείκτη A_p).



Εικόνα 3.33 Μια εικόνα του προγράμματος Media Down loader που έχει αναπτύξει η ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας.

Επομένως γίνονται οι απαραίτητες εκτιμήσεις για το πώς, πόσο και πότε θα επηρεάσει το γεωμαγνητικό πεδίο η ηλιακή δραστηριότητα, άρα και τον δείκτη A_p .

3. Όλες οι παράμετροι που έχουν μελετηθεί, καθώς και ο αριθμός ενεργών περιοχών στον Ήλιο, ο ημερήσιος αριθμός κηλίδων κτλ, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από το IZMIRAN και στην ουσία προσδιορίζει μια πρόβλεψη για τις επόμενες 3 ημέρες. Δημιουργείται δηλαδή ένα διάγραμμα με τον δείκτη A_p (ή οτιδήποτε άλλο του ζητήσουμε) και μας δείχνει την τιμή και την τάση του A_p για τις επόμενες 3 ημέρες.
4. Τέλος, σαν 4^ο βήμα με βάση όλες τις παραπάνω πληροφορίες παράγεται μέσω ενός προγράμματος που έχει αναπτυχθεί στον σταθμό, το "Space Weather Report" (εικόνα 3.34), ένα αναλυτικό report με πρόβλεψη για την τιμή του A_p για τις επόμενες 3 ημέρες, αλλά και για την δραστηριότητα που επικρατεί στον διαπλανητικό χώρο. Στο πρόγραμμα αυτό αναγράφονται όλες οι τελικές πληροφορίες, εκτιμήσεις και αποτελέσματα και στην συνέχεια αναρτώνται στην ιστοσελίδα του σταθμού της Αθήνας.

Space Weather Report - Athens Cosmic Ray Station

Solar Activity

Activity: Stable
 Solar Flux: sfu
 x-ray flux: class

Solar Wind Geomagnetic Activity

ACE:
 STEREO A:
 STEREO B:
 General:

Solar Energetic Particles Events

☒ None
 Protons: Quiet
 Electrons: Quiet

Coronal Holes

☒ None or

Geophysical Activity Forecast

☒ Quiet or
 31/05/2013: Ap
 01/06/2013:
 02/06/2013:

Generate Report Open Report

Product: Daily Forecast of Geomagnetic Activity
 Issued: 2013 May 28 08:32UTC
 Prepared by the Athens Space Weather Forecasting Center

1. Solar activity
 Solar activity was almost stable during the past 24 hours.
 Solar Flux (10.7) measured on 27.05.2013 at 2300UTC was 108 sfu.
 The background x-ray flux is at the class B2 level.
 Several CMEs are registered with the most important a PC yesterday on 03:24 UTC as LASCO/SOHO registered. No obviously Earth directed CMEs were observed in LASCO and STEREO imagery.

2. Solar Wind Geomagnetic Activity
 ACE: Vsw rises up to 800km/s
 STEREO A: Vsw is quiet
 STEREO B: Vsw is quiet

3. Solar Energetic Particle Events
 Protons are quiet while electrons are disturbed slightly.

4. Coronal Holes
 The extended trans equatorial CH571 is facing the Earth from tomorrow and its effects are expected on 1-2 June.

5. Geophysical Activity Forecast
 Today the geomagnetic field is expected to be quiet to unsettled due weak CME effects. For tomorrow are likely more quiet conditions.

Date	Ap
2013.05.28	15
2013.05.29	10
2013.05.30	9

Athens Space Weather Forecasting Center
 Physics Department, National & Kapodistrian University of Athens

Edit Report Save Report www upload Send Report

© 2012 | Athens Cosmic Ray Group

Εικόνα 3.34 Εικόνα του προγράμματος *Space Weather Report*, με βάση το οποίο βγαίνει το τελικό *forecasting report*

3.6 Διαδικασία πρόγνωσης του Διαστημικού Καιρού από άλλα κέντρα

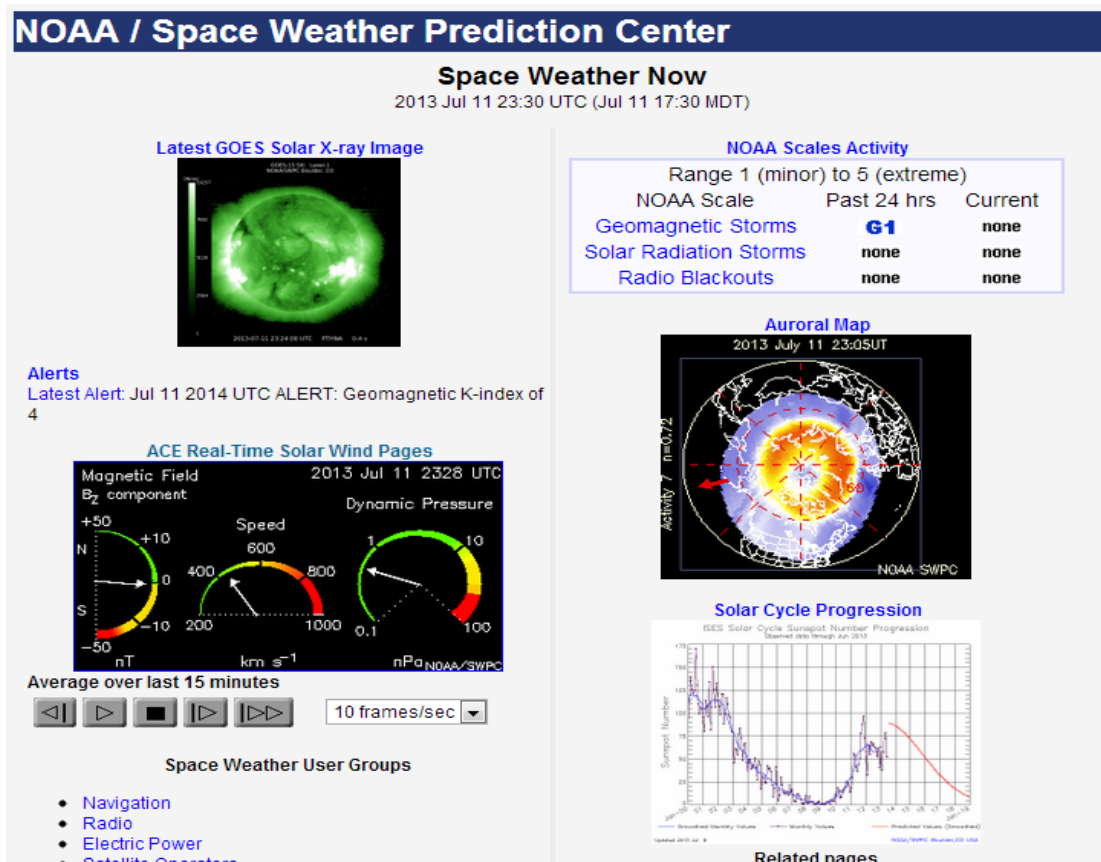
Παγκοσμίως έχουν αναπτυχθεί διάφορα κέντρα μελέτης και πρόβλεψης του Διαστημικού Καιρού, και ο κάθε σταθμός συνήθως στηρίζεται στους μετρητές που έχει ώστε να εξάγει τα ανάλογα συμπεράσματα για τον διαστημικό καιρό.

Ένα από τα κυριότερα τέτοια κέντρα είναι και το NOAA/ Space Weather Prediction Center (www.swpc.noaa.gov/SWN/). Είναι το επίσημο κέντρο των ΗΠΑ για την πρόβλεψη του διαστημικού καιρού αλλά και των προειδοποιήσεων για τα διαπλανητικά και ηλιακά φαινόμενα (όπως των CMEs) που μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη ζωή (τηλεπικοινωνίες, υγεία κτλ) αλλά και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στην διαστημική έρευνα. Λειτουργεί από κοινού με το NOAA και την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ και είναι και εθνικό αλλά και παγκόσμιο κέντρο πρόγνωσης και προειδοποίησης των ηλιακών και των

γεωμαγνητικών διαταραχών. Λειτουργεί σε συνεργασία με πολλά παγκόσμια κέντρα που παρέχουν πολλές πληροφορίες και παρατηρήσεις. Μάλιστα, έχει ξεκινήσει συνεργασία και με τον σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας, όπως αναφέρθηκε πριν, όσο αφορά τα γεγονότα GLEs, όπως αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο.

Στο κέντρο αυτό, όπως μπορούμε να δούμε και στην παρακάτω εικόνα 3.35, χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι που μετρούν και παρουσιάζουν διάφορες παραμέτρους που είναι χρήσιμες στην πρόγνωση του Διαστημικού καιρού, όπως οι εικόνες στις ακτίνες Χ από τους GOES, οι μετρήσεις της έντασης της γήινης μαγνητόσφαιρας για να διαπιστώσουμε αν έχουμε κάποια γεωμαγνητική καταιγίδα, η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου τις τελευταίες ώρες, η εξέλιξη του ηλιακού κύκλου, τυχόν ραδιοεξάρσεις από την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα του Ήλιου κτλ.

Στην ιστοσελίδα του SWPC υπάρχει διαθέσιμος και ένας αλγόριθμος που δείχνει την πρόβλεψη του δείκτη K_p . Συγκεκριμένα δείχνει την πιθανότητα να λάβει μια συγκεκριμένη τιμή ο δείκτης K_p , δηλαδή γίνεται η πρόβλεψή του για τις επόμενες 3 ημέρες.



Εικόνα 3.35 Η ιστοσελίδα του NOAA/ Space Weather Prediction Center. Φαίνονται οι διάφοροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το κέντρο αυτό για να γίνει η πρόβλεψη του διαστημικού καιρού

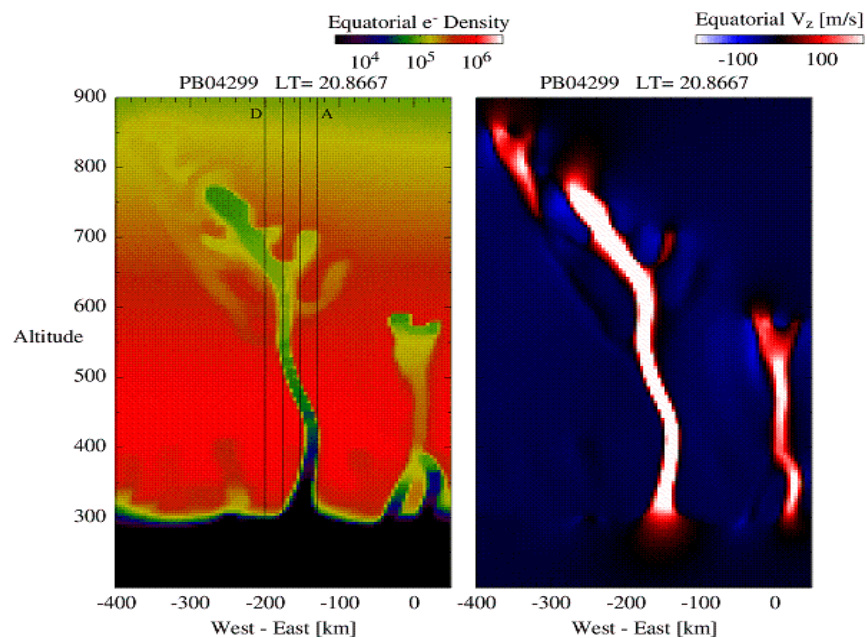
Ένα άλλο κέντρο πρόγνωσης του διαστημικού καιρού, το οποίο ακολουθεί μια ενδιαφέρουσα διαδικασία πρόγνωσης, είναι το Institute for Scientific Research του Boston College.

Η διαδικασία πρόγνωσης του διαστημικού καιρού είναι παρόμοια με την διαδικασία πρόγνωσης του ατμοσφαιρικού καιρού: Αρχικά γίνεται προσπάθεια αναγνώρισης και μελέτης των συνθηκών που επικρατούν στον διαπλανητικό χώρο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται, χρησιμοποιώντας παρατηρητήρια (γήινα και διαπλανητικά) αλλά και μετρήσεις από παρεμφερή κέντρα (όπως οι σταθμοί μέτρησης των δεικτών K_s/K_p). Στην συνέχεια χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις κίνησης του πλάσματος του ηλιακού ανέμου για να γίνει πρόβλεψη της κίνησης και της συμπεριφοράς του. Πληροφορίες γι' αυτή διαδικασία πρόγνωσης του διαστημικού καιρού μπορούμε να πάρουμε από την ιστοσελίδα του Boston College: (<http://www.bc.edu/content/bc/research/isr/spaceweatherforecasting.html>) οι οποίες είναι διαθέσιμες από το ίδιο το κολλέγιο χρησιμοποιώντας τους σταθμούς του στην Νότια Αμερική.

Η συγκεκριμένη διαδικασία πρόγνωσης στηρίζεται στην εμφάνιση ανωμαλιών του ιονοσφαιρικού πλάσματος, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την μετάδοση των ραδιοσημάτων στην γήινη ατμόσφαιρα και επομένως την λειτουργία των τηλεπικοινωνιών και πλοήγησης (GPS). Οι επιρροές αυτές προκύπτουν όταν τα φυσικά H/M κύματα της ιονόσφαιρας αποκτήσουν μεγαλύτερο πλάτος από το φυσιολογικό τους (άρα μεγαλύτερη ενέργεια), και επομένως η ιονόσφαιρα εμφανίσει διαταραχές στην δομή της, κυρίως λόγω της μη γραμμικής εξέλιξης των ασταθειών του ιονοσφαιρικού πλάσματος.

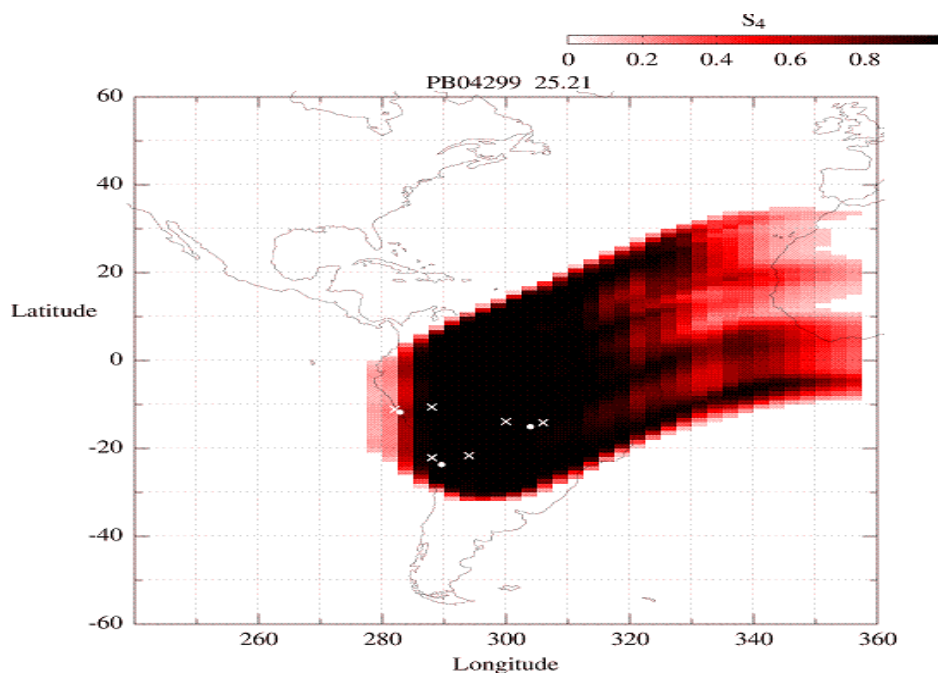
Για να προβλεφθεί η εξέλιξη αυτής της διαταραχής, εξετάζονται οι συνθήκες μέσα στην γήινη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και την θερμόσφαιρα για να φανεί η ευαισθησία τους σ' αυτές τις διαταραχές. Η ευαισθησίες αυτές στην συνέχεια παρακολουθούνται προβλέποντας την εξέλιξη της πυκνότητας του πλάσματος όταν οι διαταραχές αυτές στο πλάσμα λαμβάνουν χώρα.

Όταν εμφανίζονται δομές χαμηλής πυκνότητας ταχέου πλάσματος, όπως αυτές στην εικόνα 3.36, είναι συνήθως γεμάτες από ανωμαλίες οι οποίες οδηγούν σε σπινθηρισμούς ραδιοακτινοβολίας.



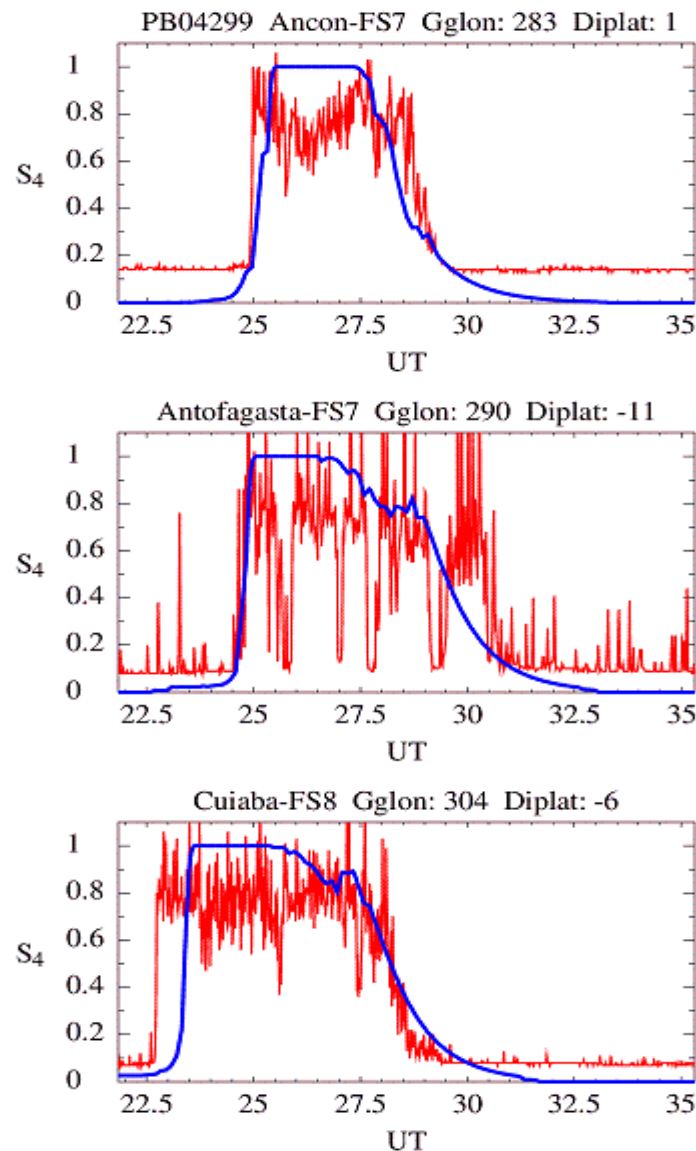
Εικόνα 3.36 Δομή ταχέως πλάσματος με μικρή πυκνότητα στην ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης

Από τις δομές αυτές μπορούν να γίνουν προβλέψεις αυτών των σπινθηρισμών, όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη που δείχνει την ένταση των σπινθηρισμών αυτών στην περιοχή της Νότιας Αμερικής.



Εικόνα 3.37 Χάρτης ραδιοεξάρσεων στην περιοχή της Νότιας Αμερικής

Το τελευταίο στάδιο της μεθόδου πρόγνωσης είναι ο έλεγχος των προγνώσεων με σύγκρισή τους με μεταγενέστερες παρατηρήσεις που γίνονται μέσα στο χρονικό διάστημα των προγνώσεων αυτών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα, όπου η κόκκινη γραμμή είναι η ένταση των σπινθηρισμών και η μπλέ γραμμή η θεωρητική πρόβλεψη του προγράμματος που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη. Το κάθε διάγραμμα αφορά έναν ξεχωριστό σταθμό πρόγνωσης στην Νότια Αμερική.



Εικόνα 3.38 Διαγράμματα συσχέτισης θεωρητικών (μπλε) προβλέψεων της συμπεριφοράς του ιονοσφαιρικού πλάσματος και των πραγματικών μετρήσεων (κόκκινη καμπύλη) της έντασης των σπινθηρισμών

Ένα τέτοιο μοντέλο πρόβλεψης του Διαστημικού καιρού έχει αναπτυχθεί από το επιστημονικό προσωπικό του ISR για να μελετηθούν τα φαινόμενα των πλασματικών ανωμαλιών στην ιονόσφαιρα (άρα και την περαιτέρω βοήθεια στην κατανόηση διαφόρων προβλημάτων της Αστροφυσικής Πλάσματος) αλλά και για την βελτίωση των τεχνικών πρόγνωσης του διαστημικού καιρού. Το πρόγραμμα αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε λειτουργία και τα αποτελέσματά του δημοσιεύονται στον ιστόχωρο της NASA (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/RoR_WWW/pbmod-rt/pbmod_realtime.php). Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται από άλλα προγράμματα πρόβλεψης του διαστημικού καιρού, από την εμπορική αεροπορία αλλά και για τους δορυφόρους της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ. Επίσης έχουν γίνει 9 δημοσιεύσεις από το 2005 μέχρι το 2011 για την μελέτη της ιονόσφαιρας χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα αυτό και βρίσκονται στην ιστοσελίδα του Boston College.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

4.1 Σκοπός της επεξεργασίας

Η μελέτη των γεωμαγνητικών διαταραχών κατέχει μια από τις σημαντικότερες θέσεις στις έρευνες της Διαστημικής Φυσικής, τόσο για την σημαντικότητά της όσο και για το ενδιαφέρον της. Σημαντικότητα διότι μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ζωή και την τεχνολογία και ενδιαφέρον διότι, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2, η πολυπλοκότητα της γήινης μαγνητόσφαιρας (δομή, ρεύματα, αλληλεπίδραση με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο κτλ) είναι μεγάλη και αυτό αποτελεί μια πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Για την μελέτη του διαστημικού καιρού αλλά και της γεωμαγνητικής δραστηριότητας θεωρήθηκε απαραίτητη η συλλογή δεδομένων τόσο για τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst (Zhang et al., 2007), όσο και για τον δείκτη K_p (Gosling et al., 1991 ; Richardson et al., 2002).

Στην παρούσα εργασία έγινε συλλογή δεδομένων του Dst και του K_p για το διάστημα 1996-2017, δηλαδή για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24. Τα μεν δεδομένα για τον δείκτη Dst λήφθηκαν από το Παγκόσμιο Κέντρο Δεδομένων Γεωμαγνητισμού στο Κυότο (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) ενώ τα δεδομένα για τον δείκτη K_p από τον Εθνικό Οργανισμό Ωκεανών και Ατμόσφαιρας-NOAA (<http://www.noaa.gov/>).

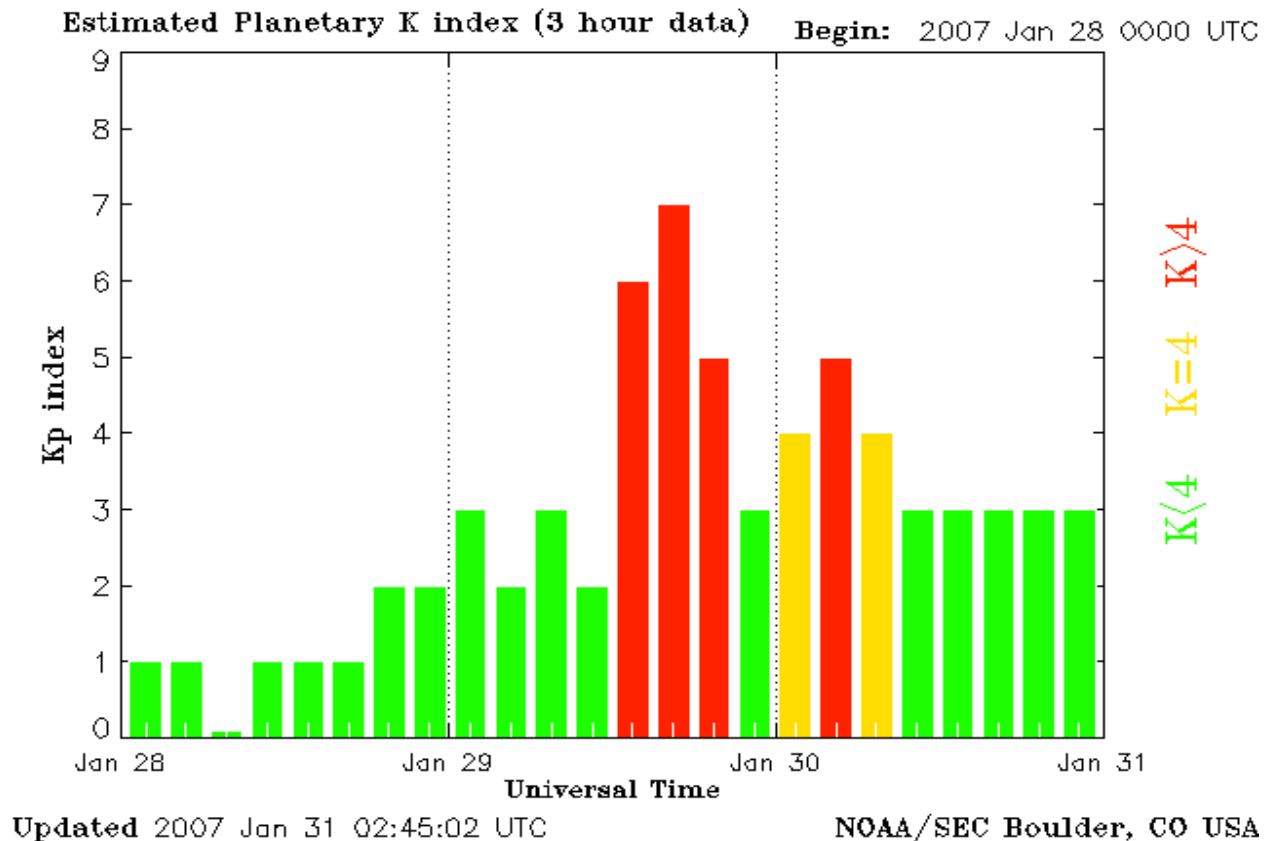
Για τον δείκτη Dst είχαμε ωριαίες τιμές ενώ για τον δείκτη K_p είχαμε 3-ωρες τιμές. Επομένως για κάθε δραστηριότητα που εντοπίζαμε, για $K_p \geq 5$ και $Dst \leq -50$ nT, καταγράφαμε την γεωμαγνητική καταιγίδα, την ημερομηνία και την έντασή της.

Η ταξινόμηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων, που καταμετρώνται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, έγινε με βάση την ταξινόμηση του NOAA χρησιμοποιώντας τον δείκτη K_p , όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.

Στην εν λόγω εργασία χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο προαναφερόμενοι δείκτες προκειμένου να γίνει η καταγραφή των γεωμαγνητικών καταιγίδων και στο τέλος να κάνουμε μια στατιστική σύγκριση μεταξύ αυτών.

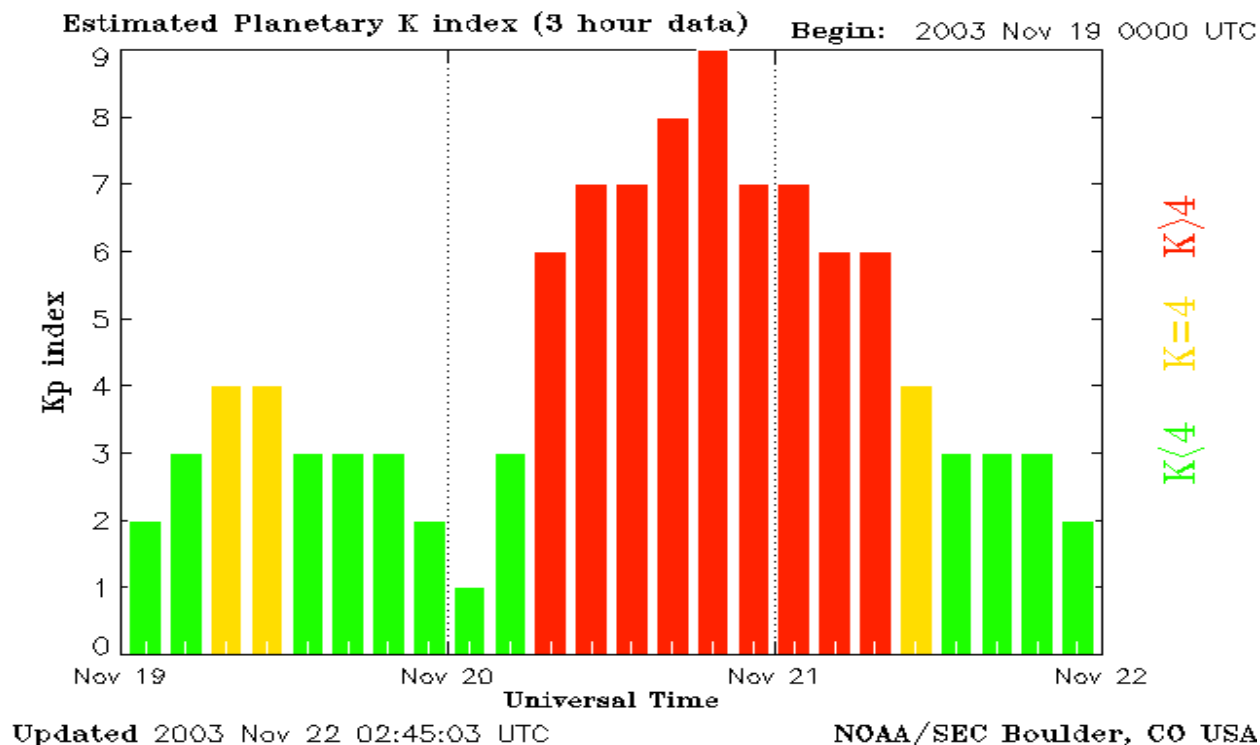
Με τα δύο παρακάτω παραδείγματα δείχνουμε την μέθοδο επιλογής μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας και με τους δύο δείκτες που χρησιμοποιήσαμε :

A)

[illegible]

Βλέπουμε εδώ ότι στις 29 Ιανουαρίου 2007 καταγράφηκε μια καταιγίδα η οποία χαρακτηρίστηκε ως G3 σύμφωνα με τον δείκτη K_p και μια καταιγίδα G1 στις 30 Ιανουαρίου, ενώ ο δείκτης Dst δεν κατέγραψε κάποια καταιγίδα με ένταση μικρότερη από -50nT. Εάν είχε καταγραφεί, θα γινόταν η ίδια διαδικασία καταγραφής για τον Dst όπως και με τον δείκτη K_p . Τα δεδομένα για τον δείκτη K_p λήφθηκαν από τον οργανισμό NOAA ενώ για τον Dst από τον WDC for Geomagnetism-Kyoto.

B)



DST0311*10 X220 000-023-016-013-021-018-020-020-013-011-013-017-016-018-019-025-025-020-016-029-036-032-029-030-037-022
DST0311*11 X220 000-048-040-028-030-042-046-043-039-037-047-050-038-055-062-059-054-052-051-051-052-049-048-054-046-047
DST0311*12 X220 000-047-038-039-035-035-032-033-034-039-029-029-030-030-028-026-028-036-029-033-035-031-030-027-027-033
DST0311*13 X220 000-029-029-025-018-023-031-031-026-033-036-025-014-018-031-032-036-044-052-046-059-059-055-047-055-036
DST0311*14 X220 000-051-038-037-035-044-052-055-042-035-039-038-028-035-039-032-027-025-025-030-041-037-035-028-028-037
DST0311*15 X220 000-026-018-019-019-025-026-017-037-034-046-039-037-050-048-046-043-049-043-043-044-040-040-042-034-036
DST0311*16 X220 000-031-031-029-025-032-033-032-037-048-049-034-029-031-029-038-032-028-035-040-036-033-036-037-032-034
DST0311*17 X220 000-027-033-031-035-042-044-048-043-041-039-034-025-025-026-036-042-041-040-032-025-029-029-036-036-035
DST0311*18 X220 000-027-022-021-029-031-030-030-027-028-026-020-023-027-028-031-027-026-029-022-022-020-016-015-017-025
DST0311*19 X220 000-015-018-018-018-022-027-026-026-025-021-017-016-017-021-018-017-014-016-011-006-006-003-002-004-016
DST0311*20 X220 000-004-006-005-007-015-026-032-034-017-038-068-058-049-102-162-171-229-329-396-413-422-422-405-343-156
DST0311*21 X220 000-309-256-230-194-191-185-156-162-162-141-130-122-118-117-110-104-105-104-092-086-083-076-069-063-140
DST0311*22 X220 000-060-071-079-074-068-070-074-069-065-059-050-044-042-040-043-054-063-064-072-085-086-083-087-086-066
DST0311*23 X220 000-079-069-065-073-074-074-066-070-071-066-059-051-046-049-041-038-035-033-035-038-046-047-041-036-054
DST0311*24 X220 000-032-033-030-029-029-030-030-029-027-029-028-028-026-027-027-026-023-023-027-032-032-028-029
DST0311*25 X220 000-027-027-027-025-028-035-033-028-026-031-026-023-022-021-020-023-024-025-023-017-014-012-014-019-024
DST0311*26 X220 000-019-021-023-023-022-021-023-024-020-019-017-012-012-020-020-016-022-022-019-017-013-012-015-015-019
DST0311*27 X220 000-014-013-016-017-014-014-013-012-010-009-005-004-005-011-012-010-010-009-007-007-010-007-004-001-010
DST0311*28 X220 000-001-006-007-010-009-007-007-009-009-007-003-003-007-010-011-008-006-008-010-006-004-004-002-002-007
DST0311*29 X220 000-001-006-013-011-009-007-007-009-012-011-011-009-007-008-007-004-005-004-005-003 000 001-001 002-006
DST0311*30 X220 000 001 000-004 001 012 016 019 022 023 019 015 016 014 007-003-003-009-023-030-034-039-038-033-027-003
DST0312*01 X220 000-026-028-025-027-029-025-024-021-021-019-015-010-012-016-015-013-013-012-014-014-013-012-008-013-018
DST0312*02 X220 000-015-011-009-012-014-017-012-004 000-004-003-002-003-001-002 000 002 000-002-002-002-003-003-001-005
DST0312*03 X220 000 001 000 001 002 001-002-004-003 000 001 002 005 004 003 003 004 003 002-002-001-001-002-002-001 001

Εδώ βλέπουμε ότι μια καταιγίδα τύπου G5 (κατά K_p) και τύπου Great (κατά Dst) καταγράφηκε τις τελευταίες ώρες της 20^{ης} Νοεμβρίου 2003. Ο δείκτης K_p πήρε την τιμή 9 και ο δείκτης Dst είχε ως χαμηλότερη τιμή -422 nT.

Ένας πλήρης πίνακας των γεωμαγνητικών καταιγίδων που καταγράφηκαν με βάση τον δείκτη K_p και τον δείκτη Dst, για το χρονικό διάστημα 1996-2017 βρίσκεται στο Παράρτημα. Στον πίνακα αυτό υπάρχουν καταχωρημένοι, εκτός από τον αριθμό των καταιγίδων και την ημερομηνία, υπάρχει και ο χαρακτηριστικός τύπος εκάστης εξ'αυτών.

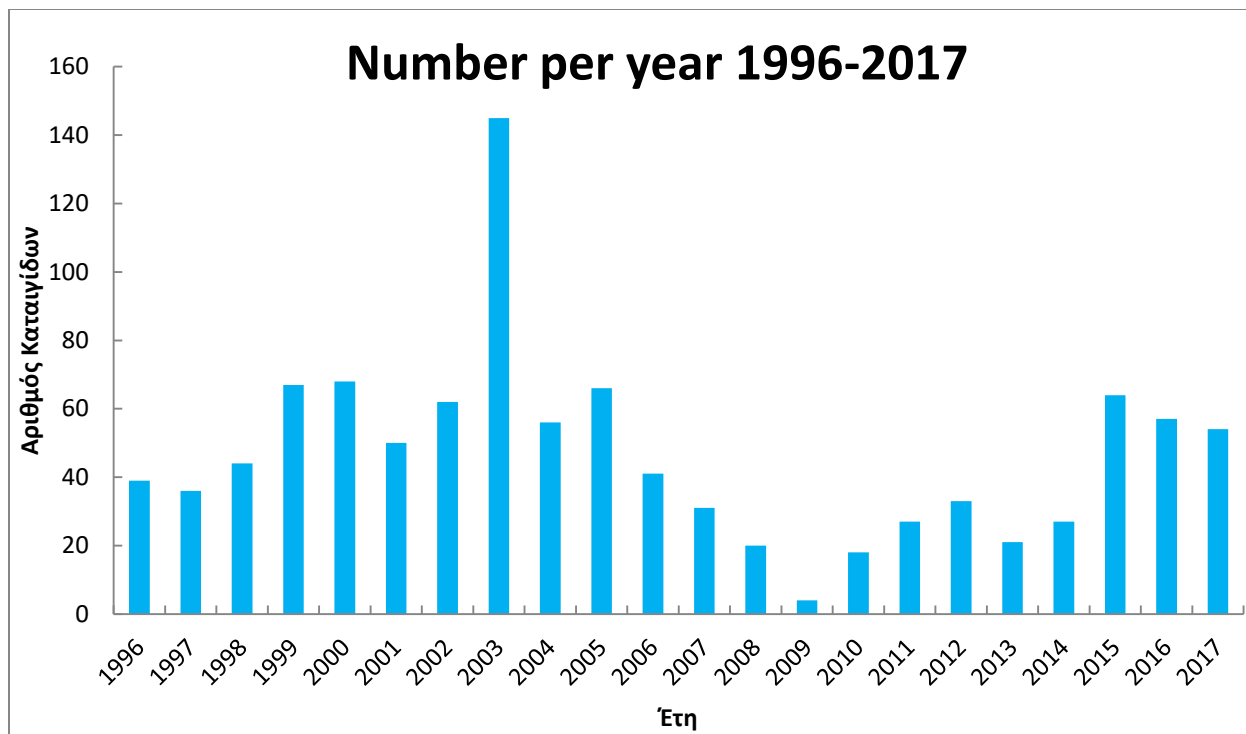
4.2 Στατιστική μελέτη της γεωμαγνητικής δραστηριότητας με την χρήση του δείκτη K_p

Χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα του δείκτη K_p για να μελετήσουμε και να διαπιστώσουμε την γεωμαγνητική δραστηριότητα της περιόδου 1996-2017. Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες που καταμετρήθηκαν αυτή την περίοδο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

<i>Number of geomagnetic storms</i>						
Year	G1	G2	G3	G4	G5	TOTAL PER YEAR
1996	29	7	3	-	-	39
1997	22	9	5	-	-	36
1998	21	15	3	3	2	44
1999	49	13	4	1	-	67
2000	41	16	8	2	1	68
2001	31	9	6	2	2	50
2002	35	18	9	-	-	62
2003	97	33	9	2	4	145
2004	46	4	1	2	3	56
2005	38	15	9	1	3	66
2006	30	9	1	1	-	41
2007	23	7	1	-	-	31
2008	16	3	1	-	-	20
2009	2	2	-	-	-	4
2010	12	5	1	-	-	18
2011	15	8	2	2	-	27
2012	19	12	2	-	-	33
2013	15	5	1	-	-	21
2014	21	5	1	-	-	27
2015	36	21	4	3	-	64
2016	39	15	3	-	-	57
2017	38	12	2	-	2	54
TOTAL	675	243	76	19	17	1030

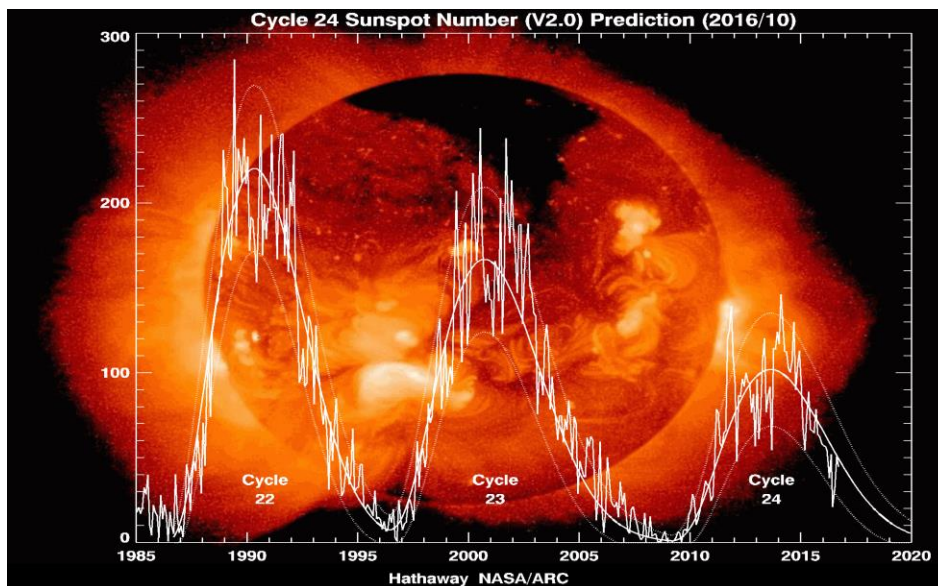
Εικόνα 4.1 Καταγραφή των γεωμαγνητικών καταιγίδων κατά δείκτη K_p

Η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



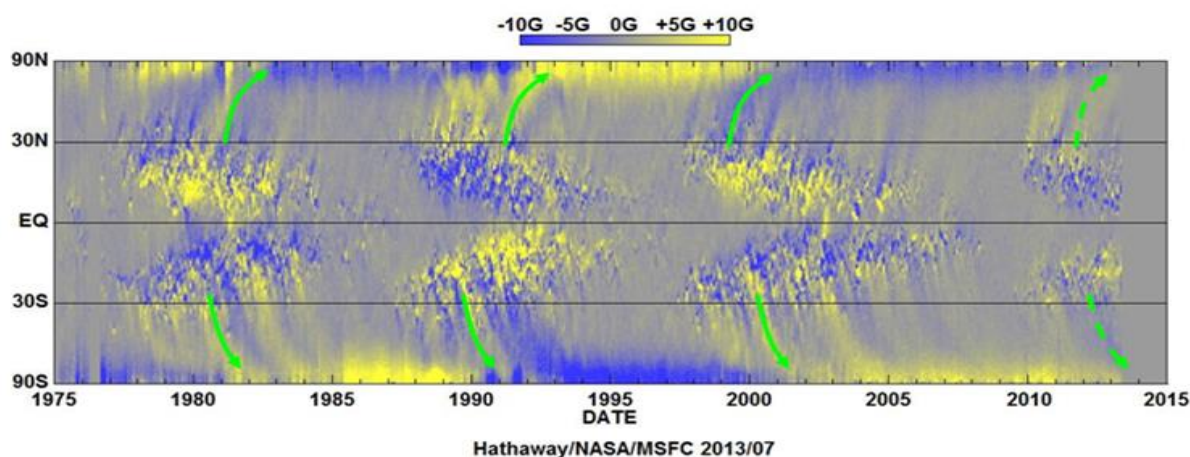
Εικόνα 4.2 Ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη K_p

Τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων είναι : Νοέμβριος 2001 (23^{ος} ηλιακός κύκλος) και Απρίλιος 2014 (24^{ος} ηλιακός κύκλος) (NASA-Royal Observatory, Greenwich ISAF/NOAA Sunspot Data):



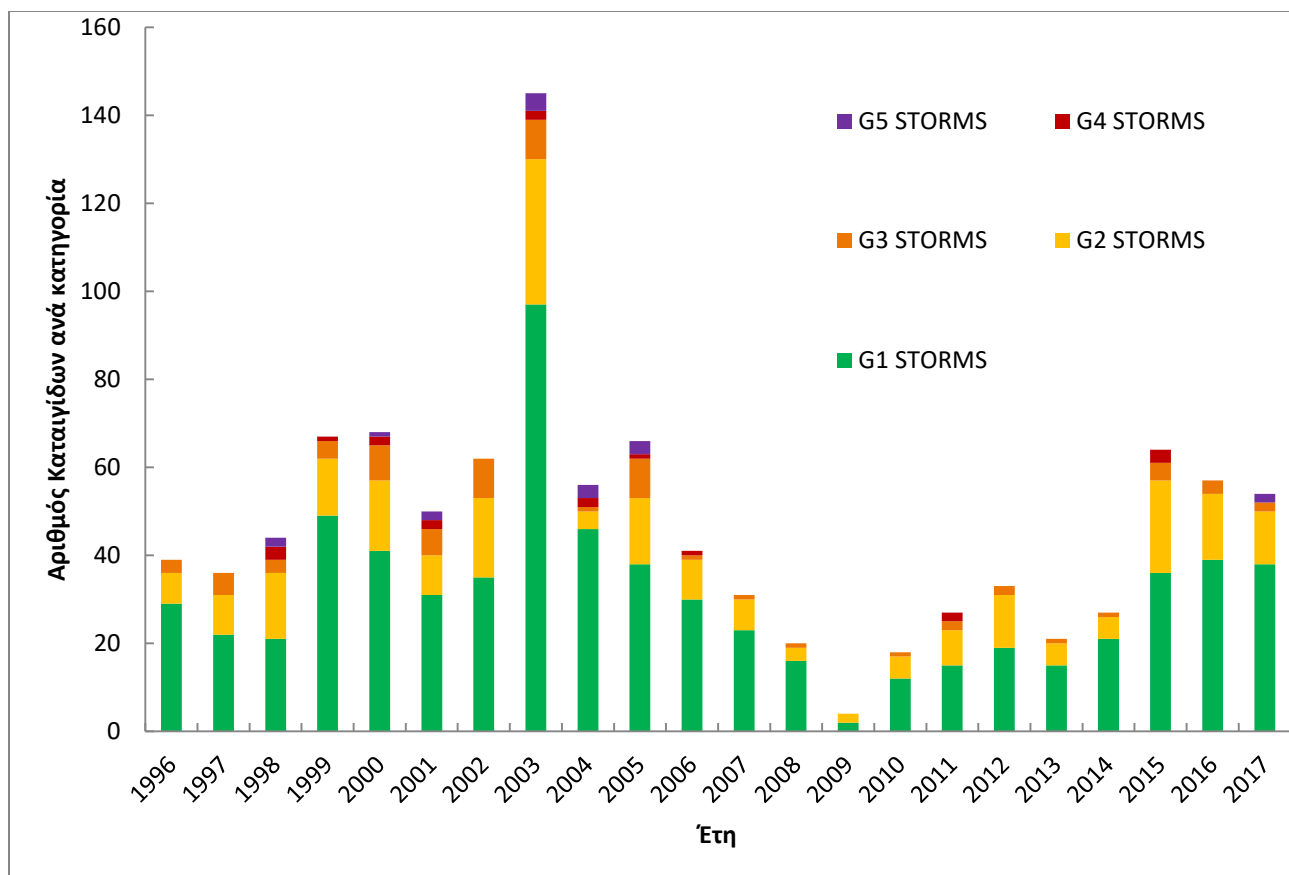
Εικόνα 4.3 Κατανομή των τελευταίων 3 ηλιακών κύκλων (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>)

Βλέπουμε το μέγιστο του 2003 όπου υπήρχε πολύ έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα με πολύ ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες, ειδικά κατά την Ισημερία Οκτώβρης-Νοέμβρης. Το έτος αυτό υπήρχε έντονη ηλιακή δραστηριότητα τόσο σε ηλιακές εκλάμψεις όσο και σε στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Επίσης, από τις εικόνες 4.2 και 4.3 γίνεται φανερό το ότι κατά την καθοδική φάση των δύο αυτών ηλιακών κύκλων, για ~ 1 χρόνο μετά το ηλιακό τους μέγιστο, παρατηρείται μια αύξηση στον αριθμό των γεωμαγνητικών καταιγίδων με $K_p \geq 5$ και στους δύο κύκλους. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Balveer S. Rathore το 2012. Μάλιστα στον κύκλο 23 έχουμε ένα μέγιστο το έτος 2002 (62 καταιγίδες) και ένα το 2005 (65 καταιγίδες) (εξαιρώντας το ιδιαίτερα ενεργητικό έτος 2003). Δηλαδή έχουμε μια ισοκατανομή των καταιγίδων στα δύο αυτά μέγιστα. Επισημαίνεται ότι εκεί έχουμε και την έναρξη της αλλαγής της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου (εικόνα 4.4), καθώς και την συσσώρευση των ηλιακών κηλίδων γύρω από τον ηλιακό ισημερινό. Οι κηλίδες κατά την άνοδο του ηλιακού κύκλου εμφανίζονται σε μεγάλα ηλιακά πλάτη και στη συνέχεια κατευθύνονται και συσσωρεύονται στον ηλιακό ισημερινό μέχρι να ελαττωθούν αρκετά κατά το ελάχιστο του ηλιακού κύκλου. Αυτό μπορεί να γίνει φανερό και από την εικόνα 4.4 με την πολικότητα να ξεκινάει από υψηλά ηλιακά πλάτη και να κατευθύνεται προς τον ηλιακό ισημερινό.



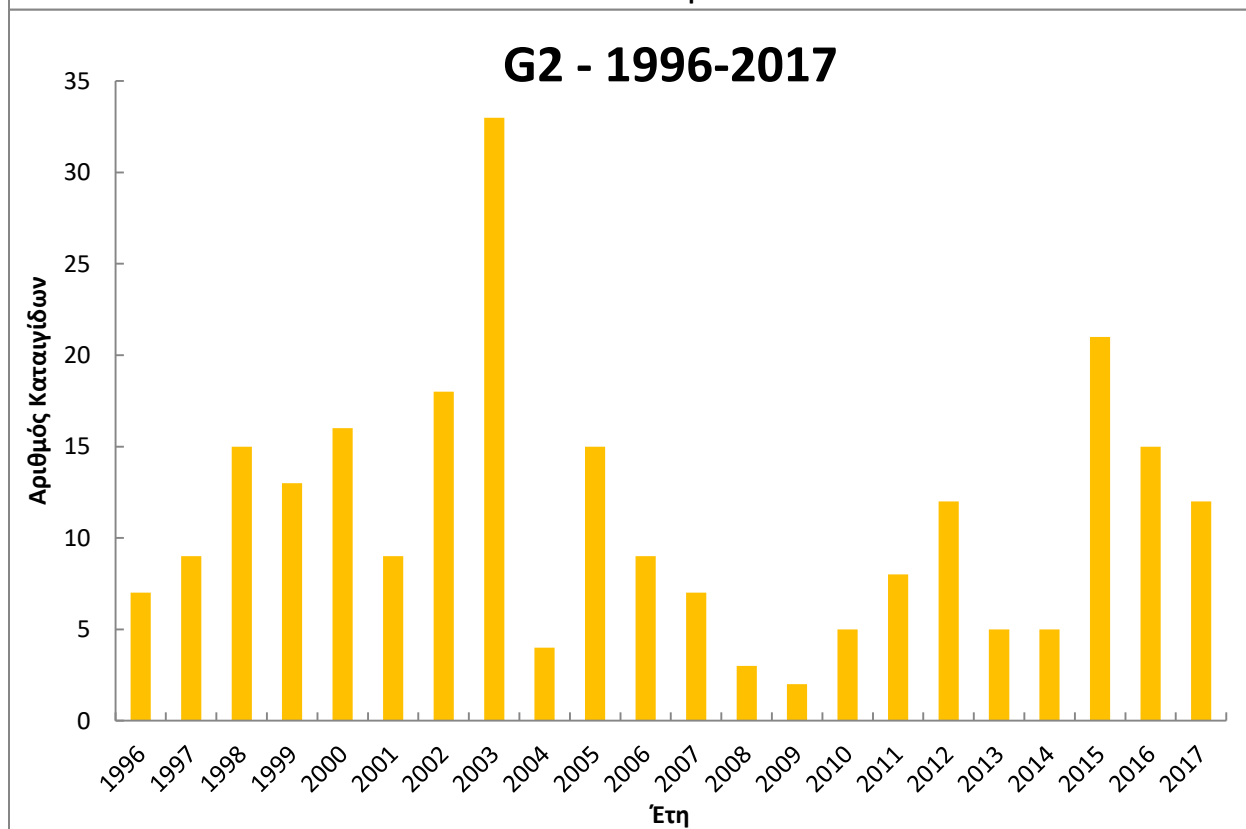
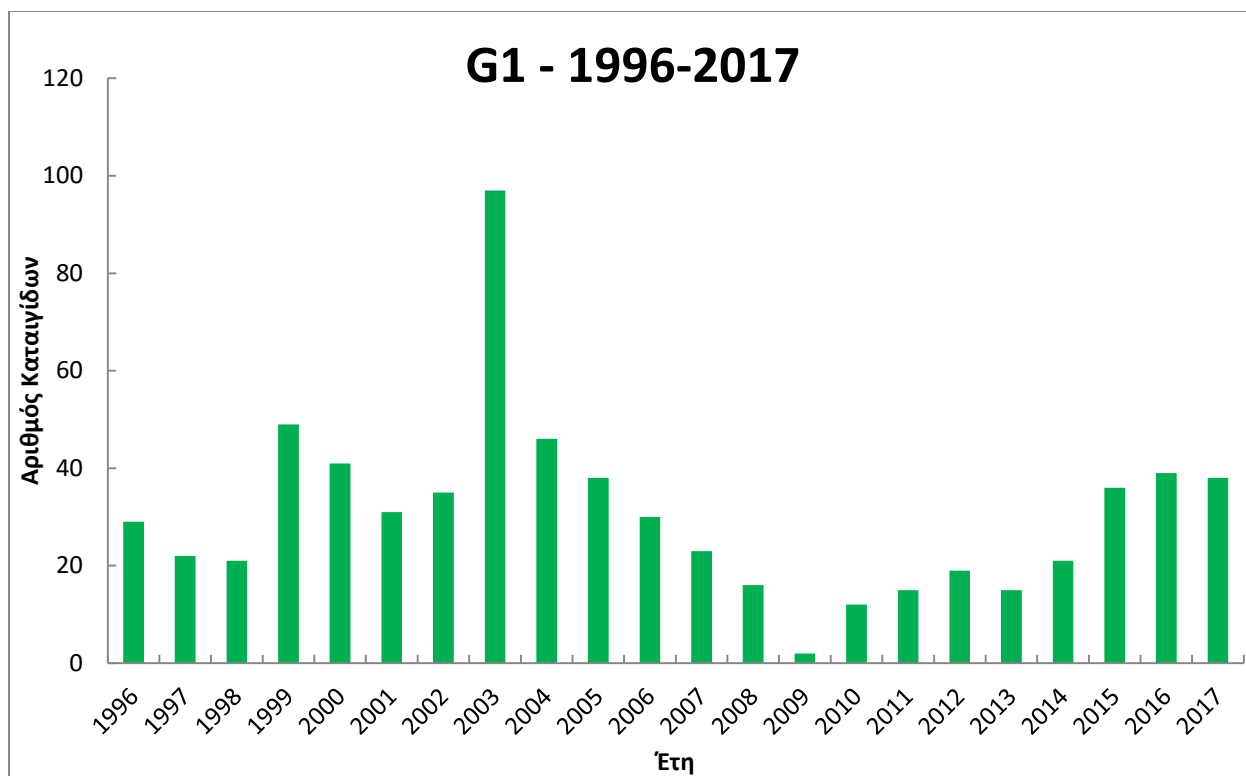
Εικόνα 4.4 Κατάσταση της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου. Φαίνεται με τα βέλη το έτος έναρξης αλλαγής της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου.

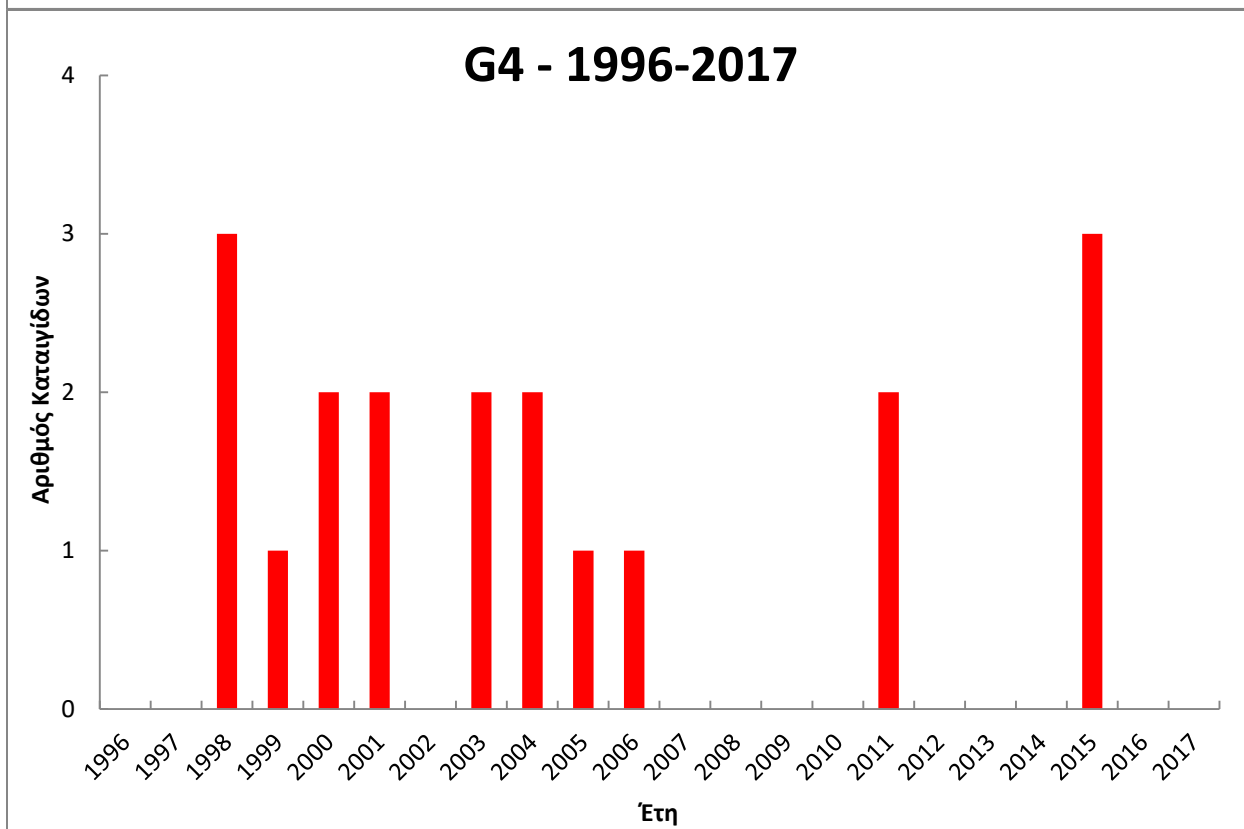
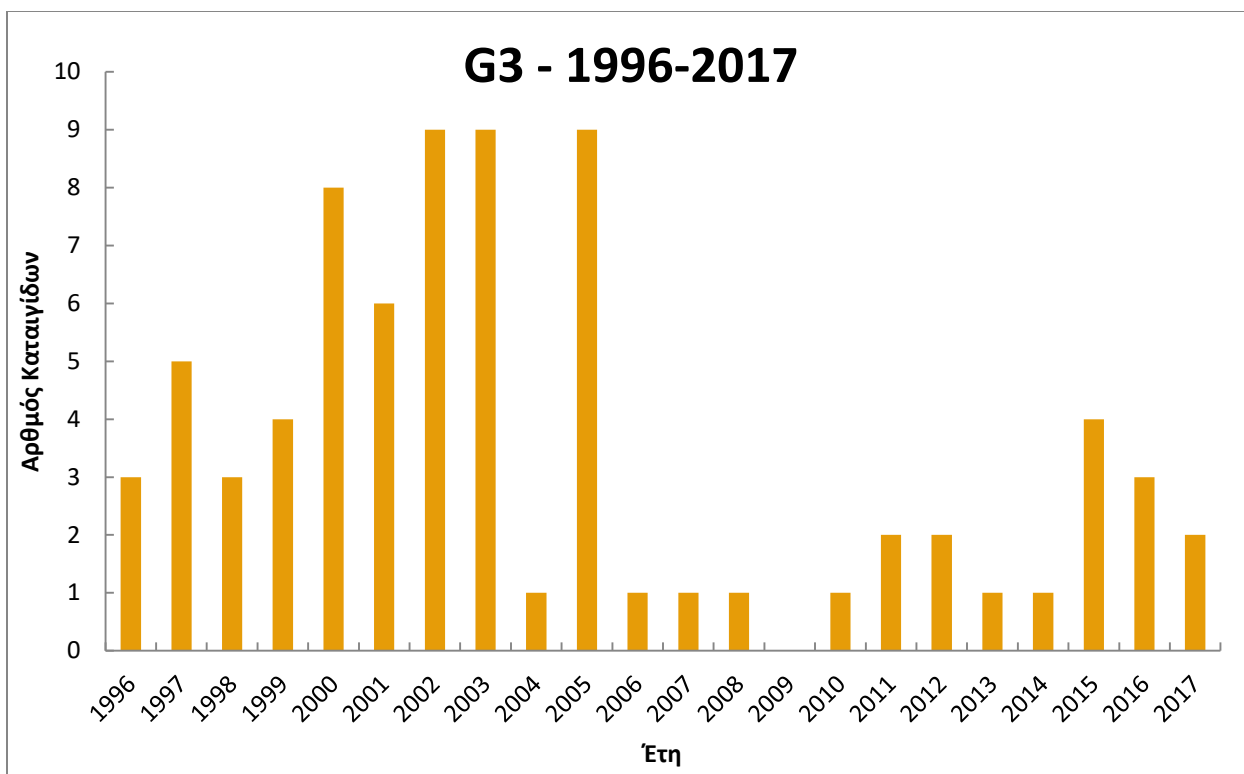
Στην εικόνα 4.5 φαίνεται επίσης η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων, ανά κατηγορία.

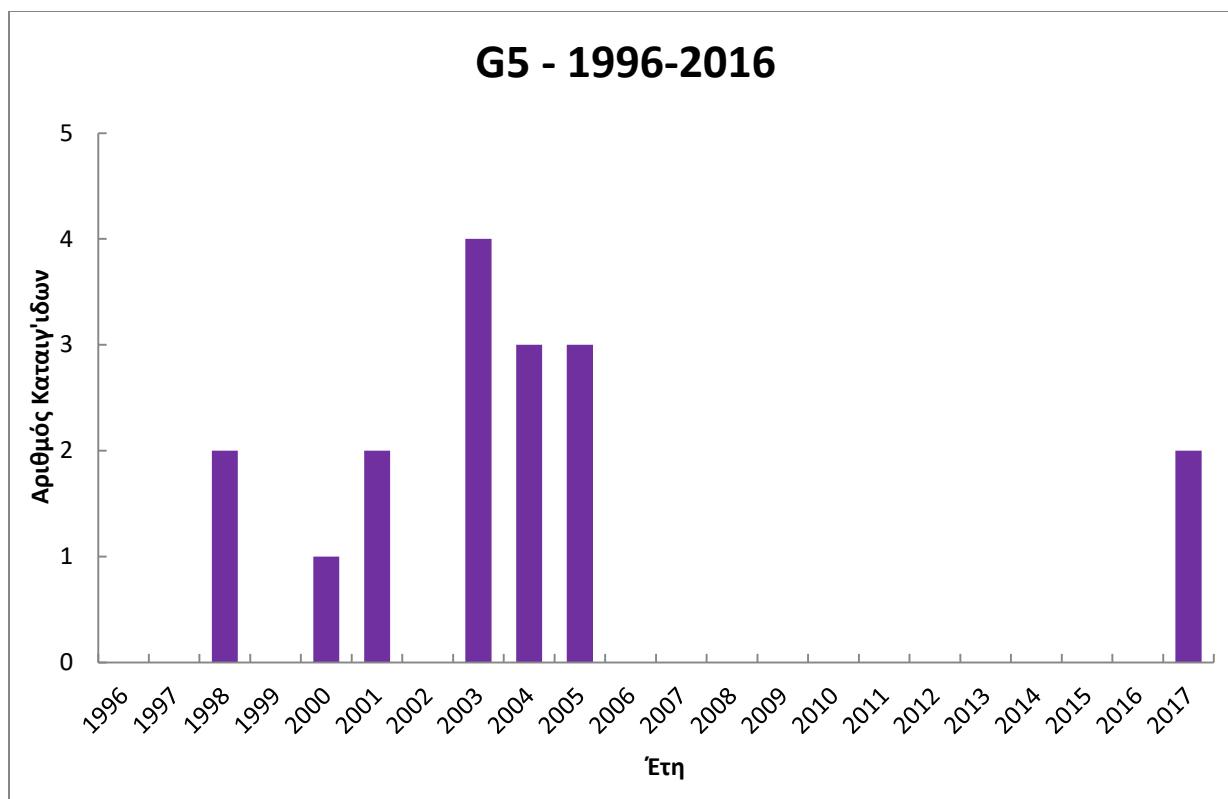


Εικόνα 4.5 Ετήσια κατανομή των συνολικών γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη K_p

Στην συνέχεια (εικόνα 4.6) μπορούμε να δούμε τις καταιγίδες ανά δείκτη K_p ξεχωριστά, δηλαδή για $K_p=5$ (G1 διαταραχή), $K_p=6$ (G2), $K_p=7$ (G3), $K_p=8$ (G4) και $K_p=9$ (G5) και για τους 2 ηλιακούς κύκλους :

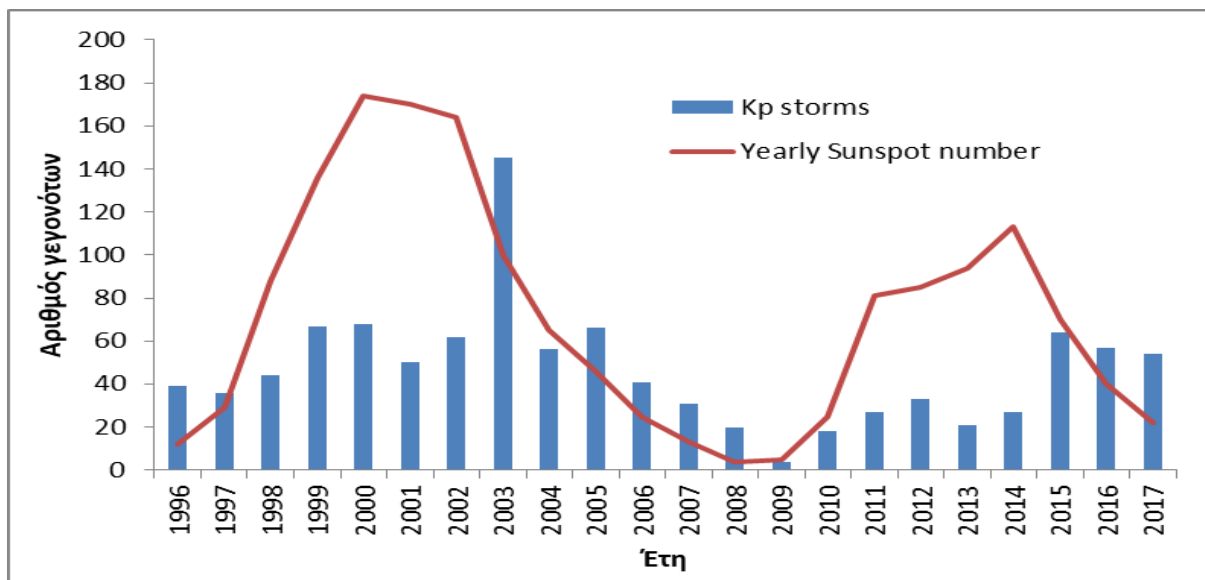






Εικόνα 4.6 Κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία (NOAA) για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη K_p

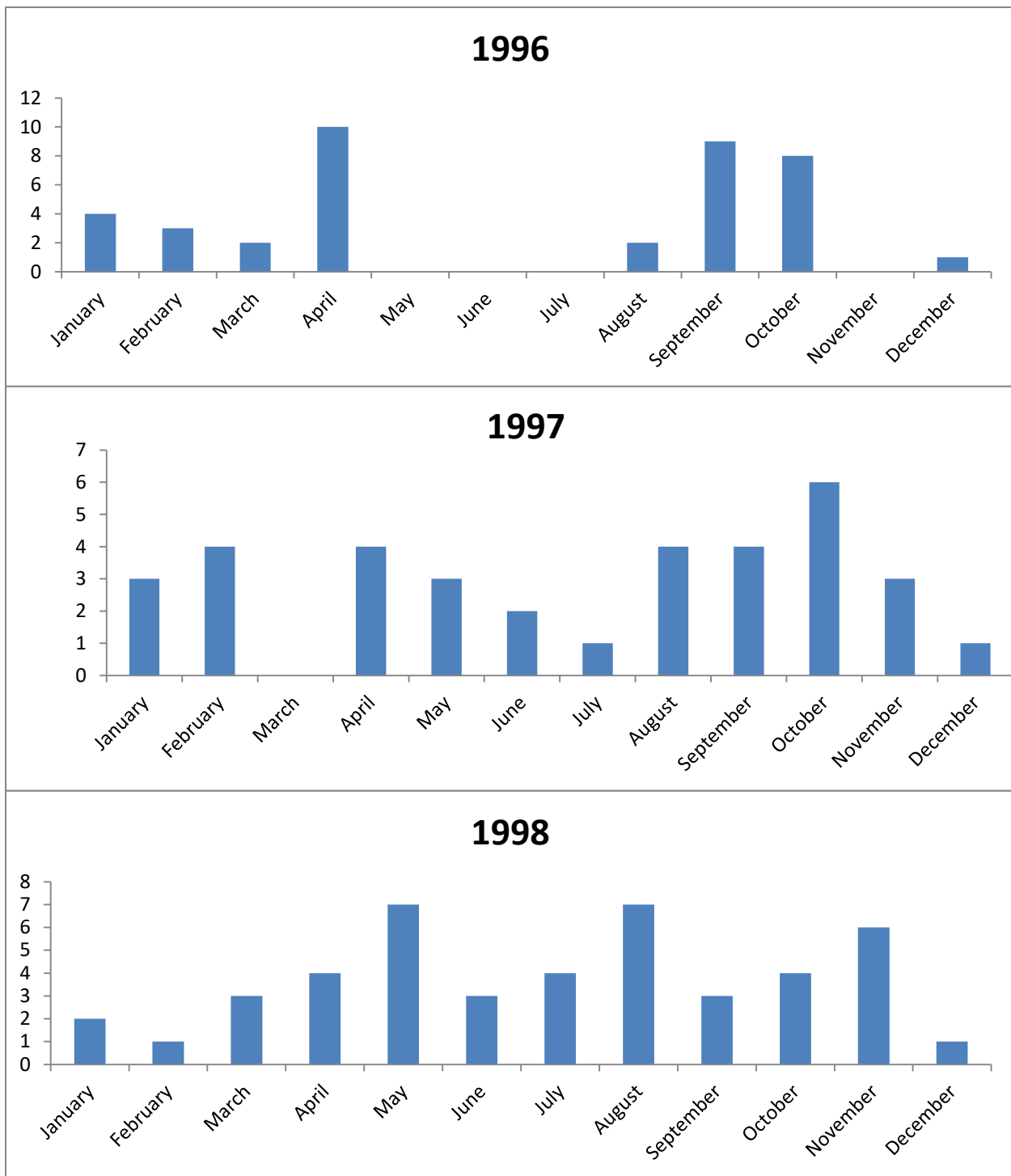
Γίνεται άμεσα φανερό ότι ο αριθμός των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά έτος συσχετίζεται πολύ καλά με τον 11-ετή ηλιακό κύκλο, τουλάχιστον μέχρι τις καταιγίδες τύπου G3, ακολουθώντας παρόμοια κατανομή με μια χρονική μετατόπιση $\sim$ ενός έτους. Για τις πολύ ισχυρές καταιγίδες G4 και G5, παρατηρούμε ότι στον κύκλο 23 έχουμε 29 καταιγίδες, ενώ στον 24 έχουμε 7 καταιγίδες. Δηλαδή ο κύκλος 23 είχε τέσσερεις φορές περισσότερες καταιγίδες από τον 24 και αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της χαμηλότερης ηλιακής δραστηριότητας, η οποία μπορεί να επιβεβαιωθεί και από την εικόνα 4.7, όπου φαίνεται ο ετήσιος αριθμός των γεωμαγνητικών καταιγίδων μαζί με τον ετήσιο αριθμό ηλιακών κηλίδων. Επίσης παρατηρούμε μια διαφορά στις G1 και G2-G3 καταιγίδες κατά το έτος 2004, όπου στις G2-G3 έχουμε μια απότομη μείωση στον αριθμό εμφάνισης των καταιγίδων αυτών, ενώ στις G1 δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο. Μάλιστα, οι G1 είναι περισσότερες κατά το έτος 2004 (46 καταιγίδες) απ' ό τι κατά το έτος 2005 (38 καταιγίδες).

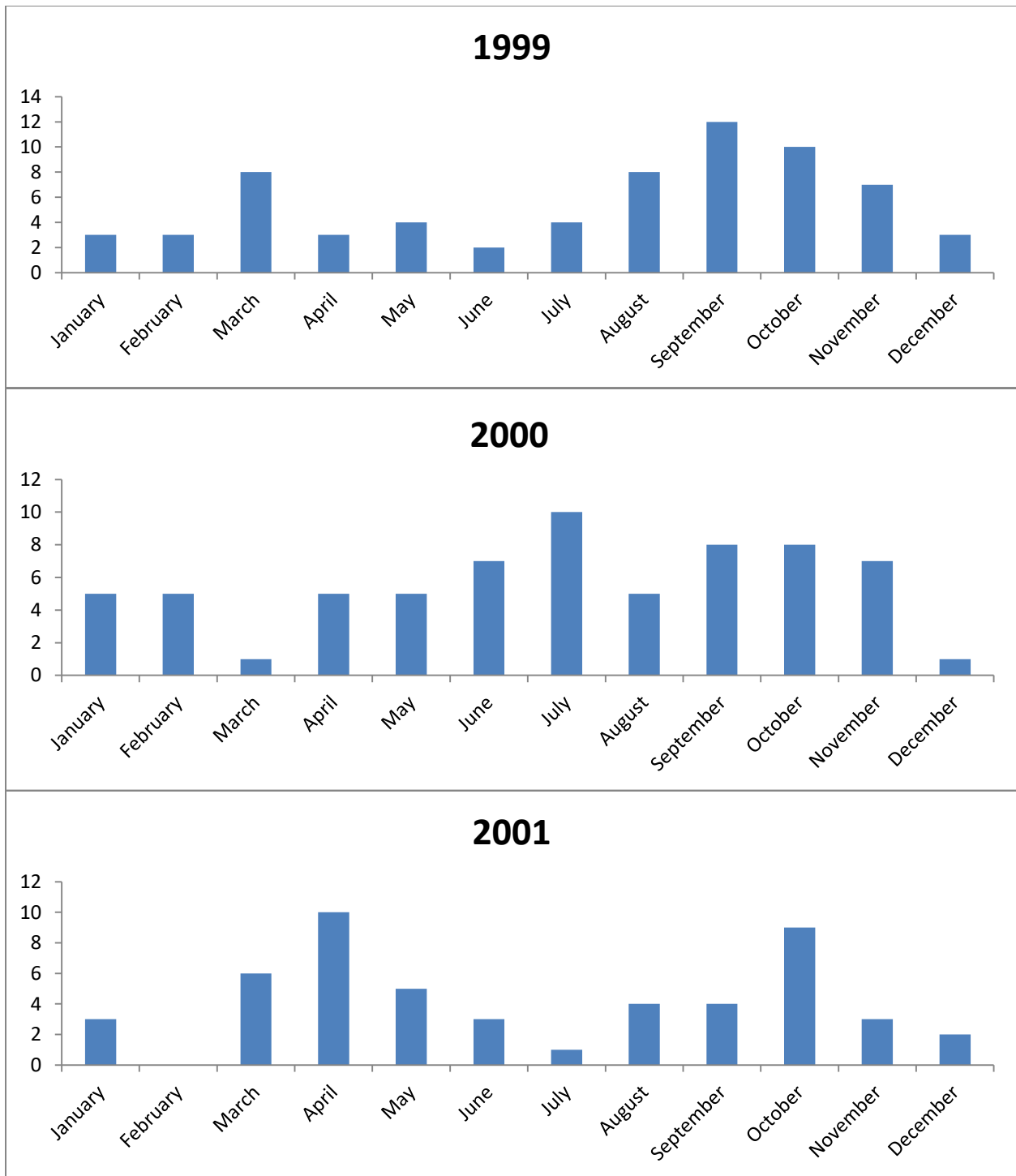


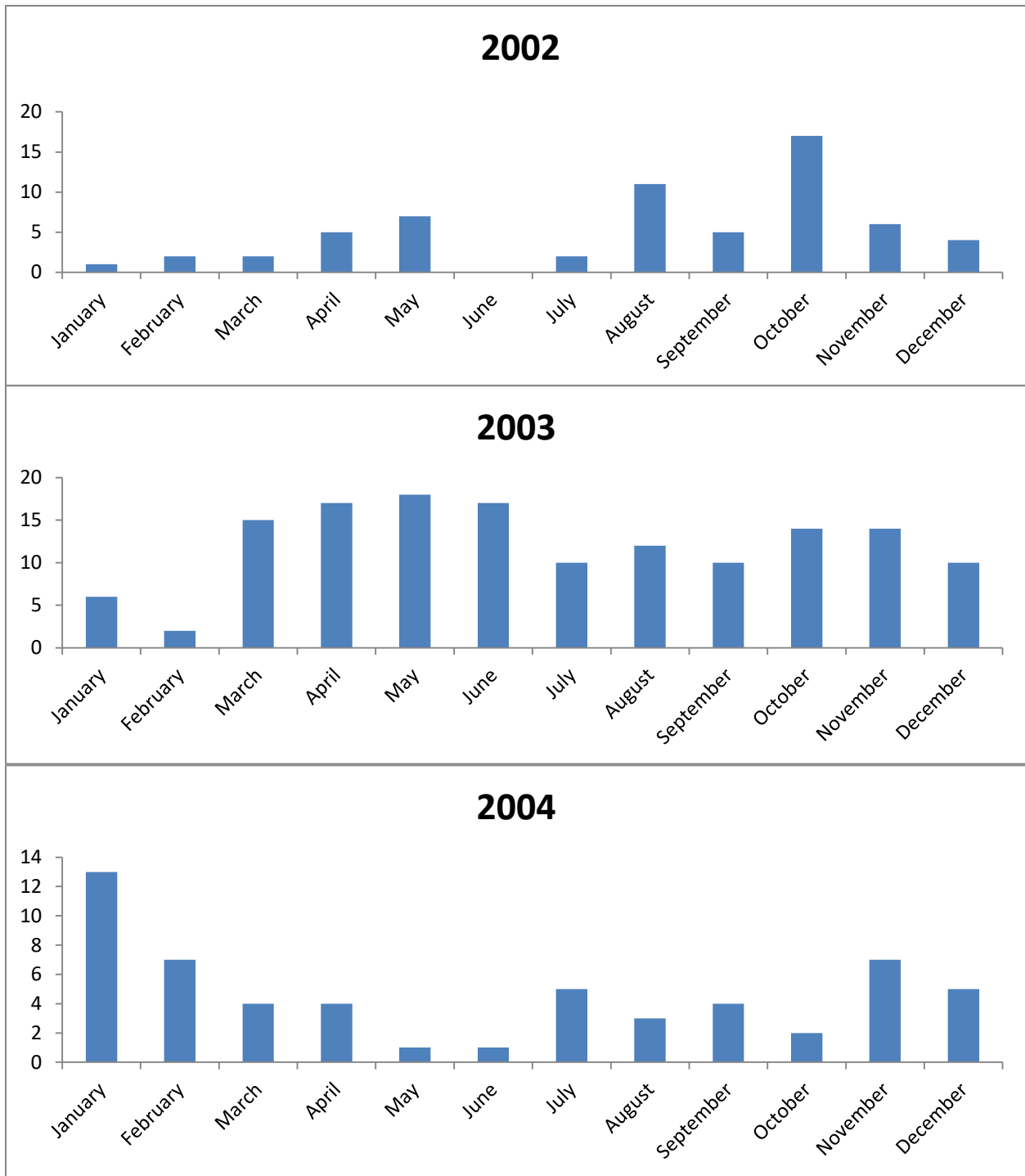
Εικόνα 4.7 Ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων μαζί με την ετήσια κατανομή των ηλιακών κηλίδων για τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη K_p

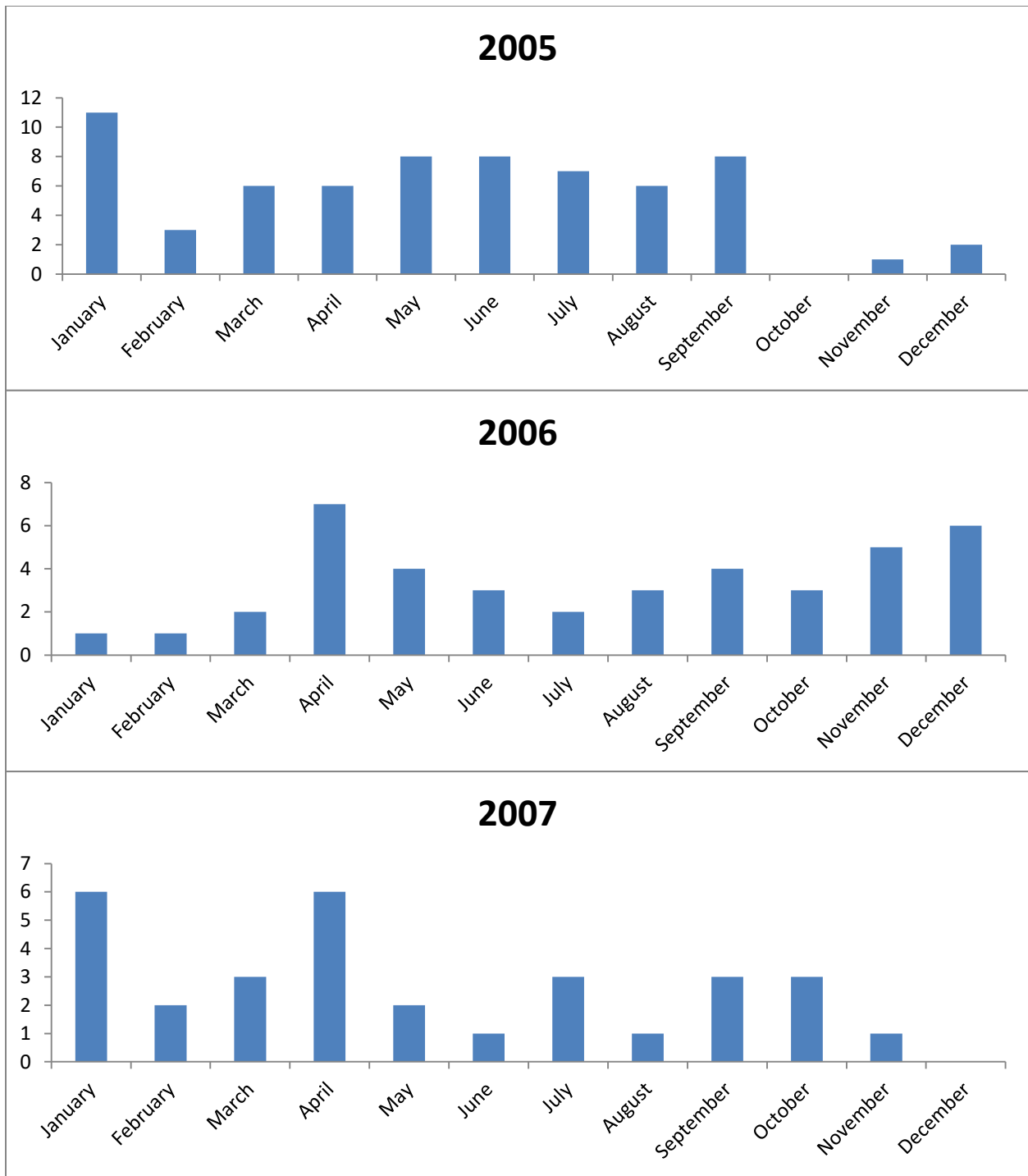
Από την εικόνα 4.7 βλέπουμε πάλι την αυξημένη γεωμαγνητική δραστηριότητα κατά την καθοδική φάση των δύο κύκλων, με μια μικρή μείωση να εμφανίζεται το 2004 (μόνο στις G2 και G3 καταιγίδες) στον ηλιακό κύκλο 23, χωρίς να παρατηρείται κάτι τέτοιο στον κύκλο 24. Παρατηρείται επίσης και στους δύο κύκλους μια μείωση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας κατά τα ηλιακά μέγιστα (2001, 2014).

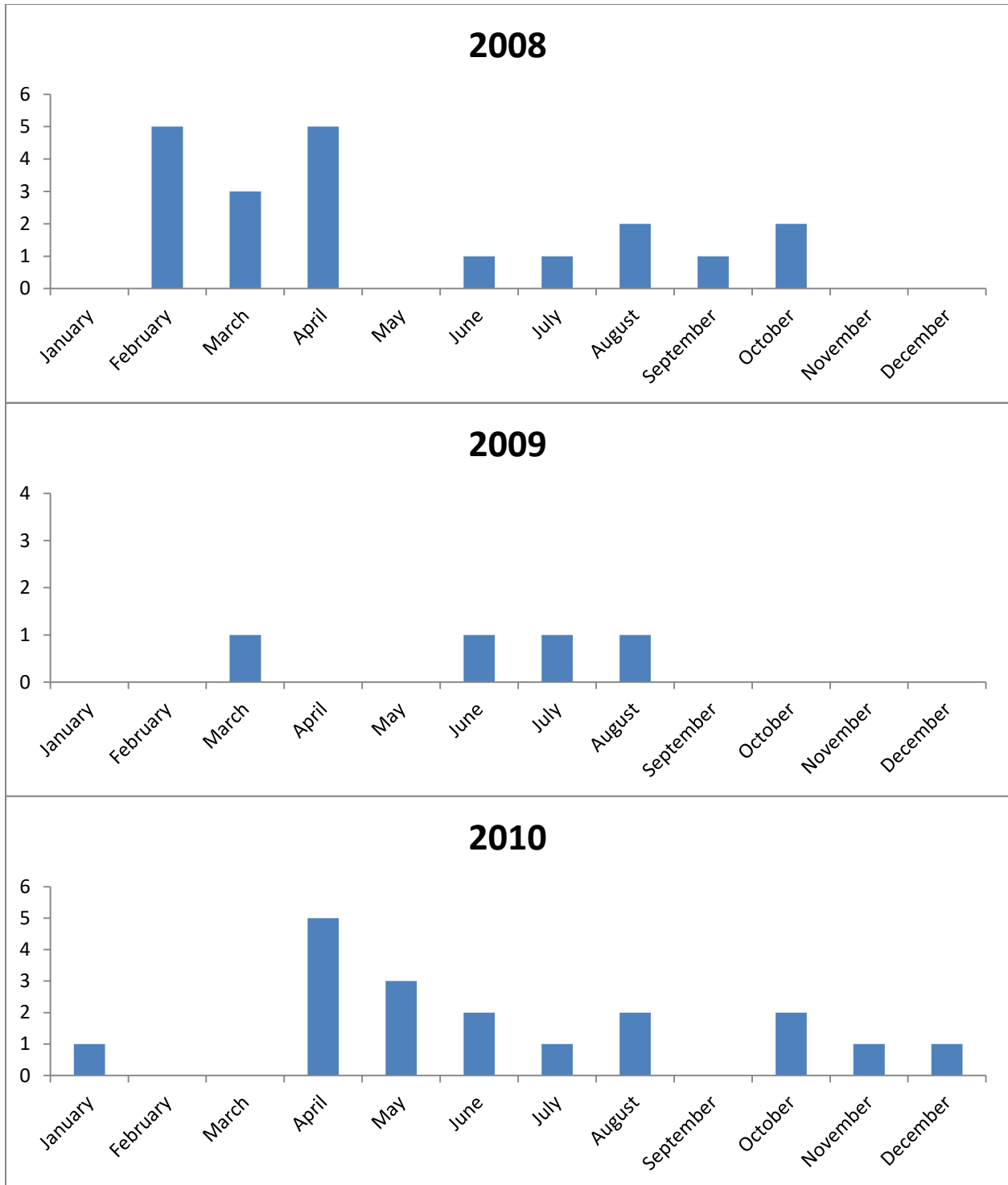
Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα μπορεί να εξαχθεί μελετώντας την μηνιαία κατανομή των καταιγίδων (αριθμός γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά μήνα με $K_p \geq 5$) ώστε να διαπιστωθεί η εποχιακή κατανομή τους σε κάθε ηλιακό κύκλο :

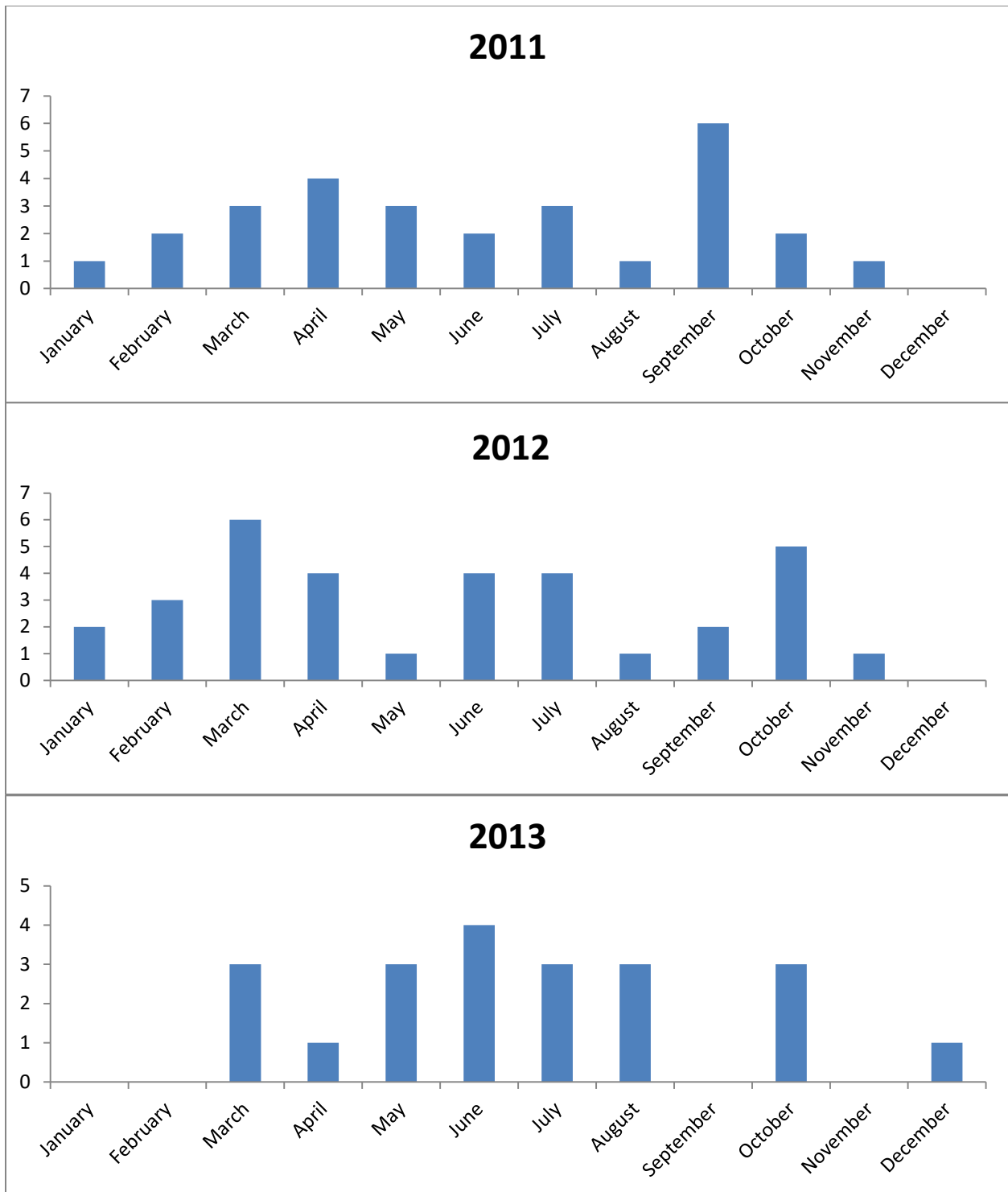


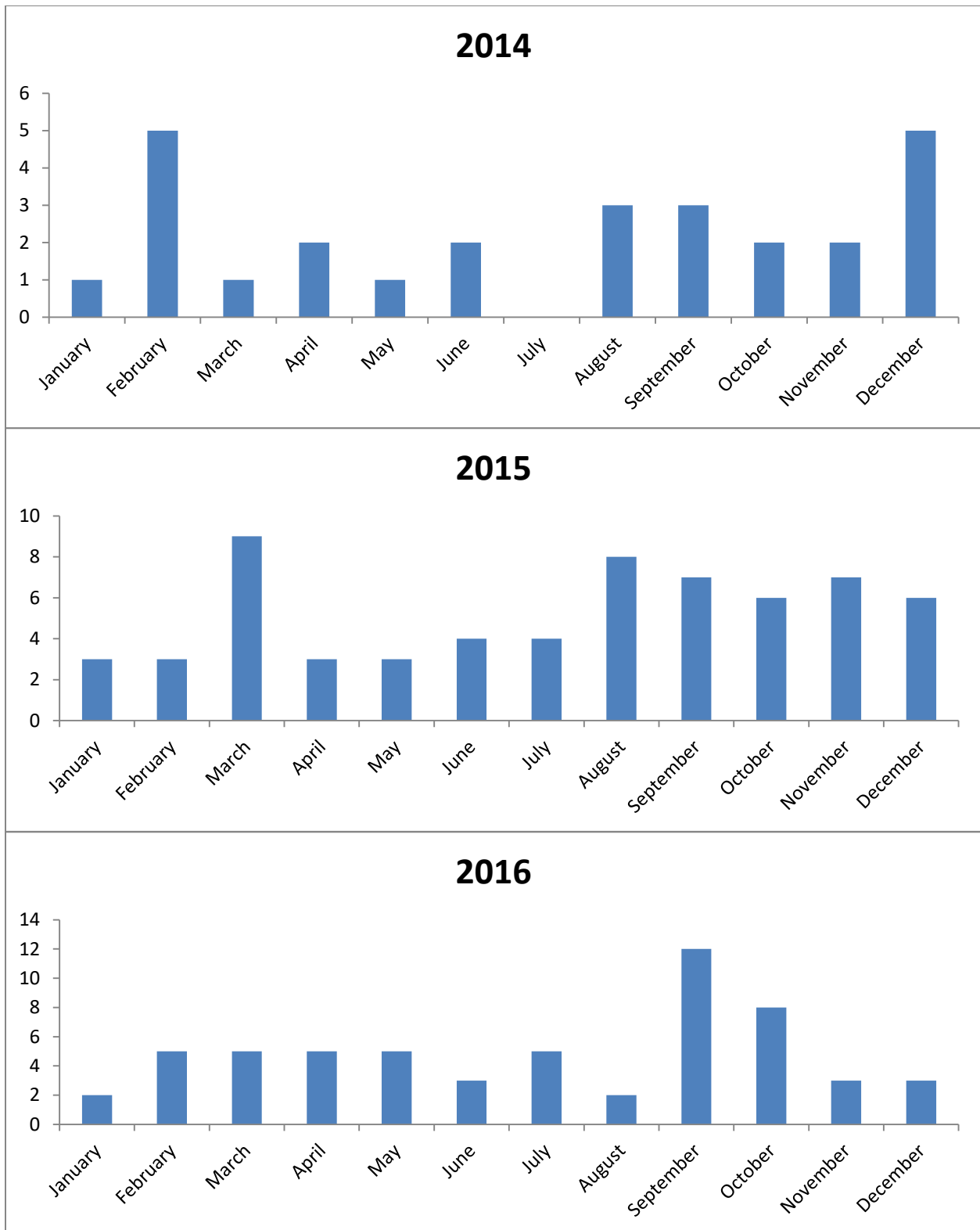


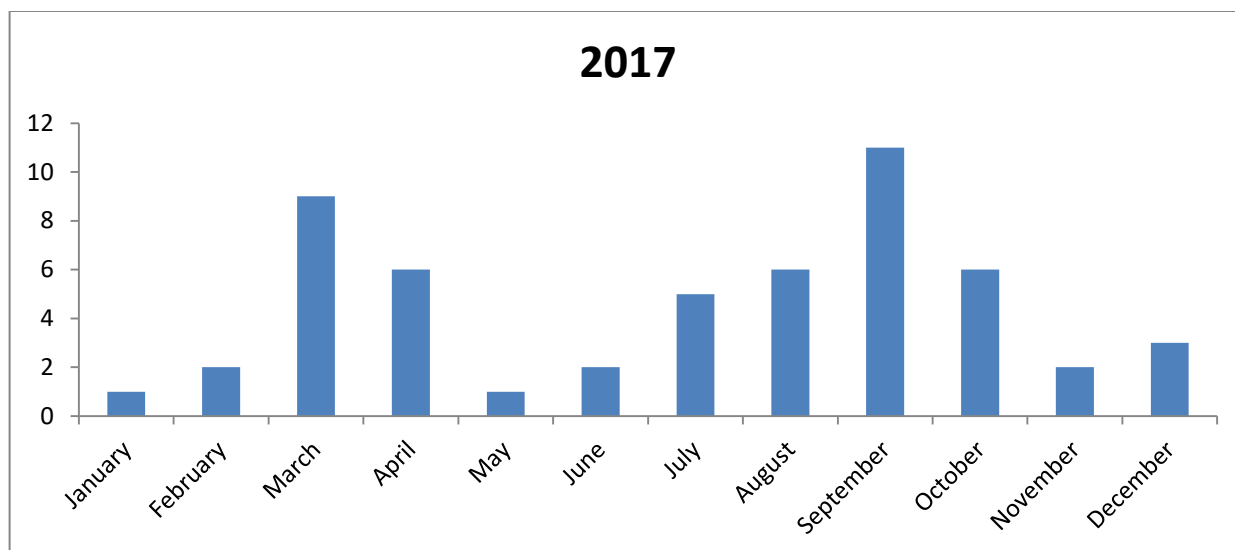






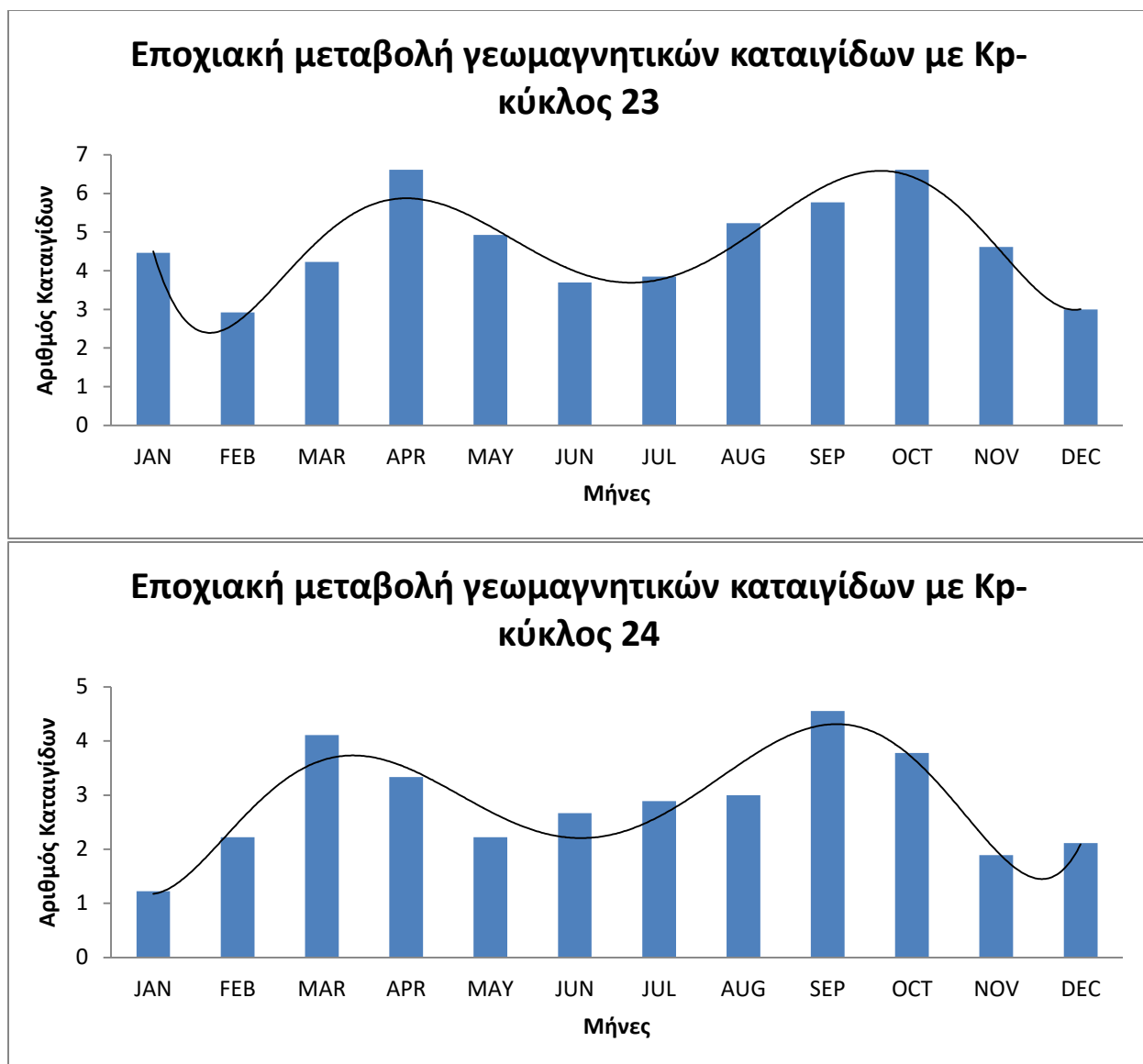






Εικόνα 4.8 Μηνιαία κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη K_p

Για να εξάγουμε ασφαλέστερα συμπεράσματα για την μηνιαία κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων, κατασκευάσαμε την μηνιαία κατανομή των καταιγίδων με τον μέσο όρο των καταιγίδων ανά μήνα, για κάθε ηλιακό κύκλο ξεχωριστά :



Εικόνα 4.9 Εποχιακή μεταβολή της εμφάνισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων κατά δείκτη K_p για τον κάθε ηλιακό κύκλο

Παρατηρείται, από την εικόνα 4.9, μια εποχιακή εξάμηνη μεταβολή της εμφάνισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων με μέγιστο τους μήνες Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο για κάθε ηλιακό κύκλο ξεχωριστά. Εδώ πήραμε την μέση τιμή του αριθμού των γεωμαγνητικών καταιγίδων κάθε μηνός για όλα τα χρόνια κάθε ηλιακού κύκλου. Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να διακρίνουμε ότι στα περισσότερα έτη εμφανίζεται μια εξάμηνη περιοδικότητα στις γεωμαγνητικές καταιγίδες και αυτή εμφανίζεται κατά κύριο λόγο κοντά στις Ισημερίες, Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο.

4.3 Στατιστική μελέτη της γεωμαγνητικής δραστηριότητας με την χρήση του δείκτη Dst

Χρησιμοποιώντας τις ωριαίες τιμές του δείκτη Dst (που καταγράφηκαν από τον σταθμό του Kyoto) για την καταγραφή του αριθμού των γεωμαγνητικών καταιγίδων που συνέβησαν στο χρονικό διάστημα των δύο τελευταίων ηλιακών κύκλων, αντίστοιχα με την διαδικασία που κάναμε με τον δείκτη K_p στην προηγούμενη παράγραφο.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2, η ταξινόμηση των καταιγίδων είναι η εξής:

- $-100 \leq Dst \leq -50$ nT : Moderate storm
- $-200 \leq Dst \leq -100$ nT : Strong storm
- $-350 \leq Dst \leq -200$ nT : Severe storm
- $Dst \leq -350$ nT : Great storm

Επομένως καταγράφουμε όλες τις γεωμαγνητικές καταιγίδες ως εξής :

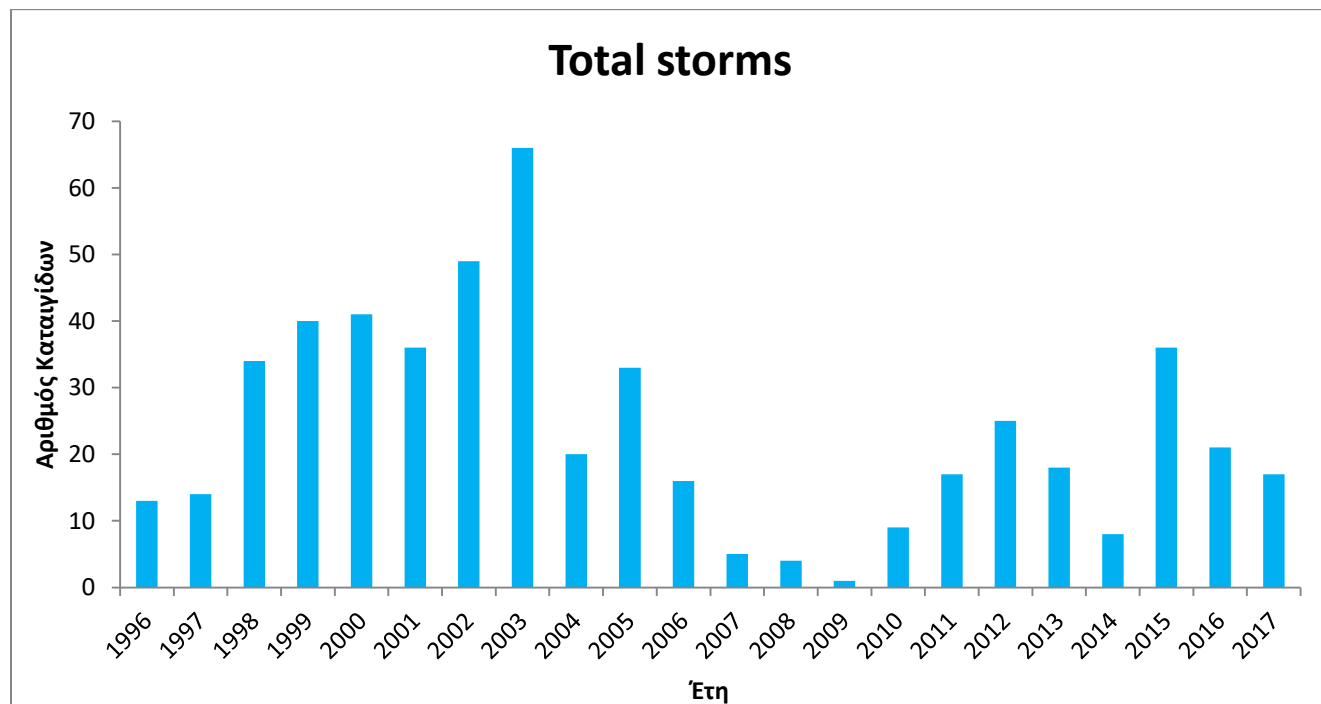
Κάθε φορά που ο δείκτης Dst παίρνει τιμή από -50 nanoTesla και κάτω, έχουμε την εμφάνιση γεωμαγνητικής καταιγίδας και το είδος της καταιγίδας εξαρτάται (όπως φαίνεται παραπάνω) από το ποιά θα είναι η ελάχιστη τιμή του Dst την ημέρα εκείνη.

Καταγράφοντας λοιπόν τις καταιγίδες με τον τρόπο αυτό, έχουμε τον ακόλουθο πίνακα :

Number of Storms					
Year	Moderate	Strong	Severe	Great	TOTAL PER YEAR
1996	12	1	-	-	13
1997	9	5	-	-	14
1998	20	12	2	-	34
1999	35	4	1		40
2000	28	9	4	-	41
2001	20	12	3	1	36
2002	31	18	-	-	49
2003	58	5	-	3	66
2004	12	5	2	1	20
2005	24	8	1	-	33
2006	15	1	-	-	16
2007	5	-	-	-	5
2008	4	-	-	-	4
2009	1	-	-	-	1
2010	9	-	-	-	9
2011	14	3	-	-	17
2012	19	6	-	-	25
2013	15	3	-	-	18
2014	7	1	-	-	8
2015	31	3	2	-	36
2016	20	1	-	-	21
2017	14	3	-	-	17
TOTAL	403	100	15	5	523

Εικόνα 4.10 Καταγραφή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη Dst

Η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 4.11 :



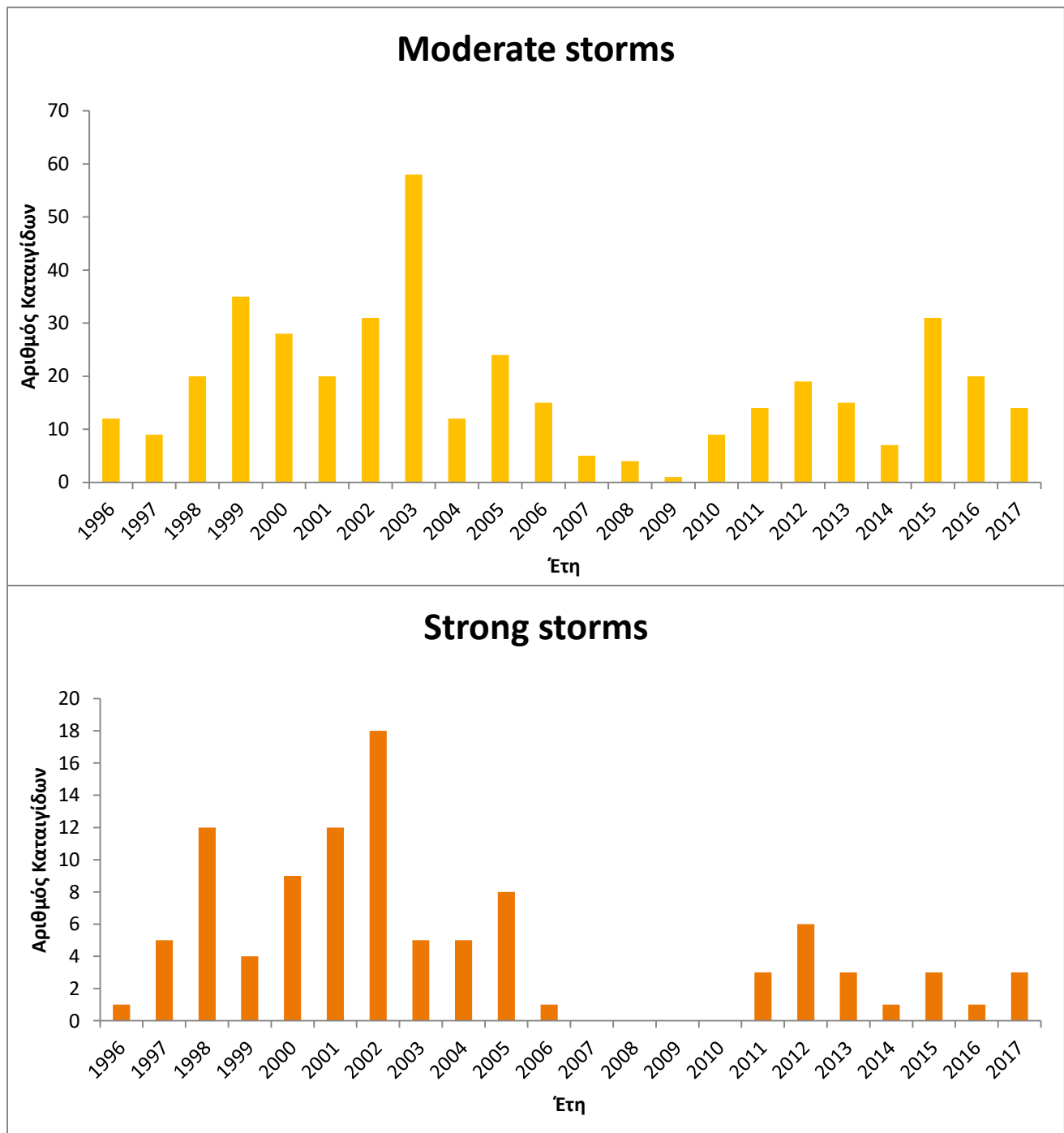
Εικόνα 4.11 Ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη Dst

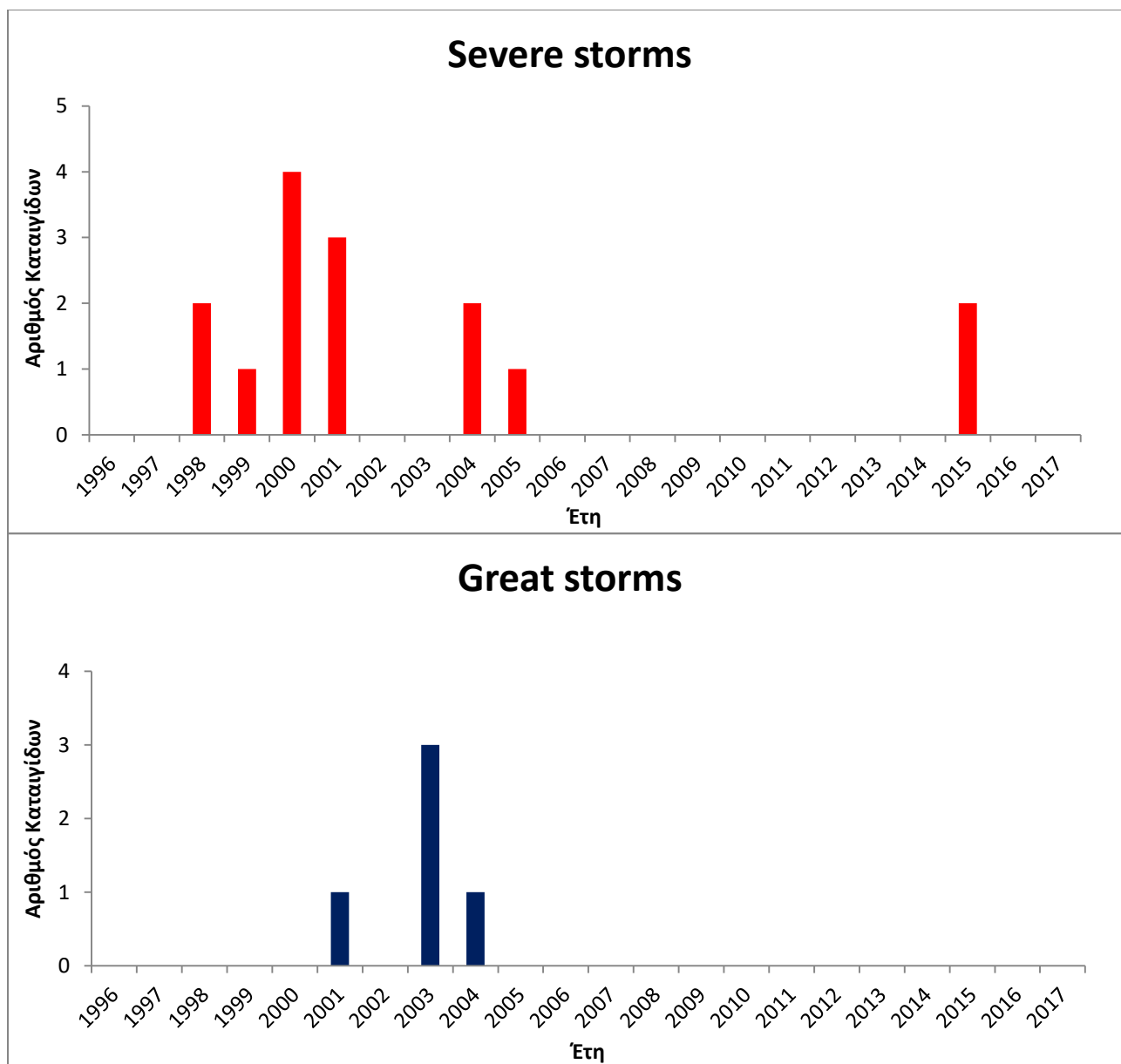
Παρατηρείται πάλι η αυξημένη γεωμαγνητική δραστηριότητα του έτους 2003, όπως και με τον δείκτη K_p . Επίσης είναι φανερό η αύξηση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας κατά την έναρξη της καθοδικής φάσης του κάθε ηλιακού κύκλου. Εδώ φαίνεται όμως μια αισθητή μείωση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας το έτος 2004, η οποία δεν ήταν τόσο φανερή με τον δείκτη K_p . Επίσης, εδώ έχουμε ξανά δύο μέγιστα στις καταιγίδες του κύκλου 23, με μεγαλύτερο του έτους 2002 (49 καταιγίδες) σε σχέση με το μέγιστο του 2005 (33 καταιγίδες) (εξαιρώντας πάλι το ιδιαίτερα ενεργό έτος 2003). Η διαφορά αυτή δεν ήταν τόσο φανερή με τον δείκτη K_p . Εκεί είχα ισοκατανομή των καταιγίδων στα δύο αυτά γεωμαγνητικά μέγιστα. Για τον κύκλο 24 φαίνεται να έχουμε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά του δείκτη K_p , με την διαφορά ότι στον δείκτη K_p φάνηκε έντονη δραστηριότητα και στα έτη 2016-2017 σε σχέση με τον μέγιστο του 2015, ενώ εδώ με τον δείκτη Dst φαίνεται μια μείωση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας από το 2016 και μετά.

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι ο ετήσιος αριθμός των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι πάλι σε συμφωνία με τον 11-ετή ηλιακό κύκλο (αριθμό ηλιακών κηλίδων) όπου φαίνεται μια συσχέτιση με τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων (2001, 2014) αλλά και η έντονη ηλιακή

δραστηριότητα (που καταγράψαμε και με τον δείκτη K_p) η οποία εμφανίζεται με χρονική μετατόπιση ~ 1 έτους μετά το εκάστοτε ηλιακό μέγιστο, κατά την καθοδική του φάση (2003, 2015).

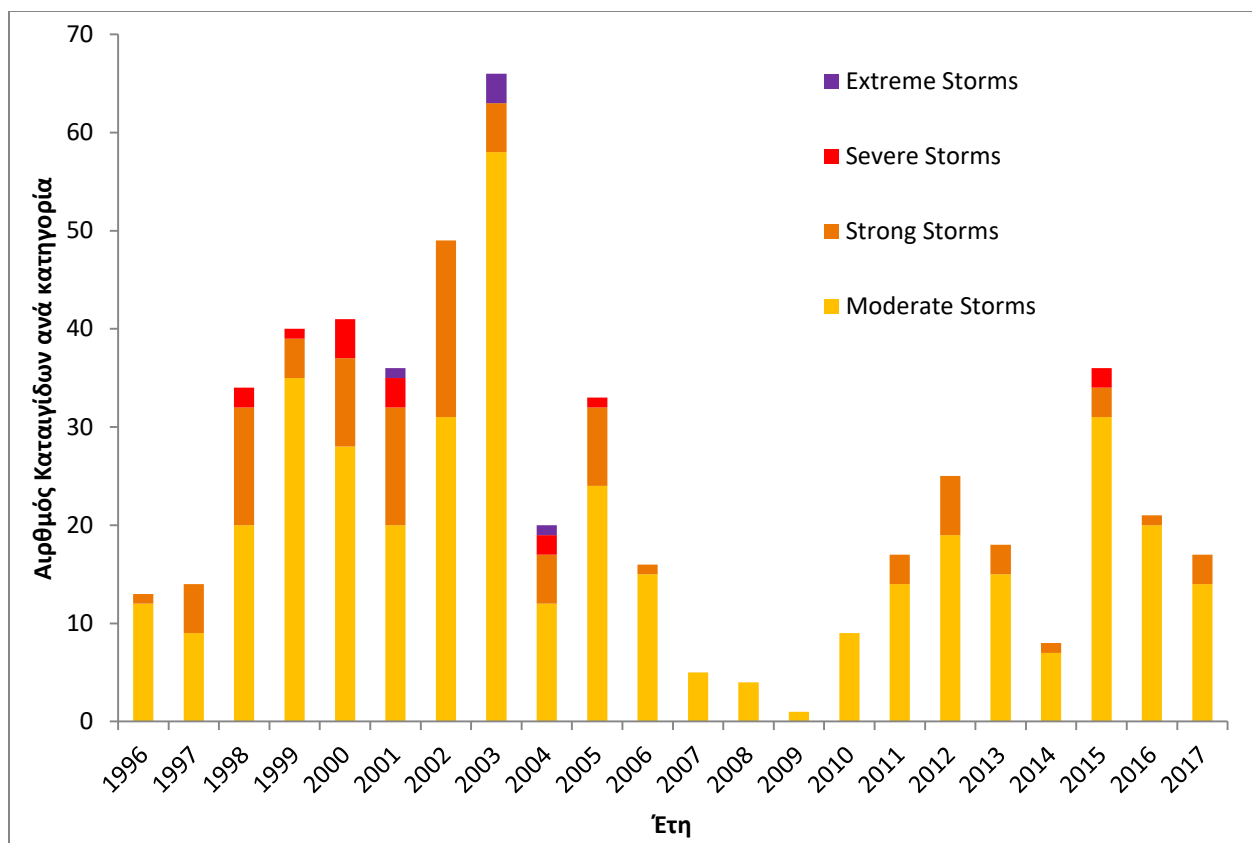
Στην συνέχεια μπορούμε να δούμε την κατανομή των καταιγίδων ανά κατηγορία :





Εικόνα 4.12 Ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη Dst

Μπορούμε να δούμε και ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των καταιγίδων μαζί, ανά κατηγορία :



Εικόνα 4.13 Κατανομή των συνολικών γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία για τους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη Dst

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε από όλα τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι :

Η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων ακολουθεί την δομή του ηλιακού κύκλου με μια χρονική μετατόπιση, όσον αφορά τουλάχιστον στις Moderate και τις Strong καταιγίδες. Τα δύο γεωμαγνητικά μέγιστα όμως των καταιγίδων (2002,2005 και 2012,2015 αντίστοιχα) είναι περισσότερο έντονα στις Moderate καταιγίδες παρά στις Strong. Ειδικά για τον κύκλο 24 δεν έχουμε ξεκάθαρη εμφάνιση των δύο μεγίστων στις Strong καταιγίδες όπως έχουμε στις Moderate. Έχουμε δηλαδή μια διαφορετική συμπεριφορά στον αριθμό των Moderate και Strong καταιγίδων για τους δύο αυτούς ηλιακούς κύκλους, κάτι το οποίο δεν φάνηκε να υπήρχε ανάμεσα στις G1,G2 και G3 καταιγίδες με τον δείκτη K_p (με εξαίρεση την διαφορά στο έτος 2004).

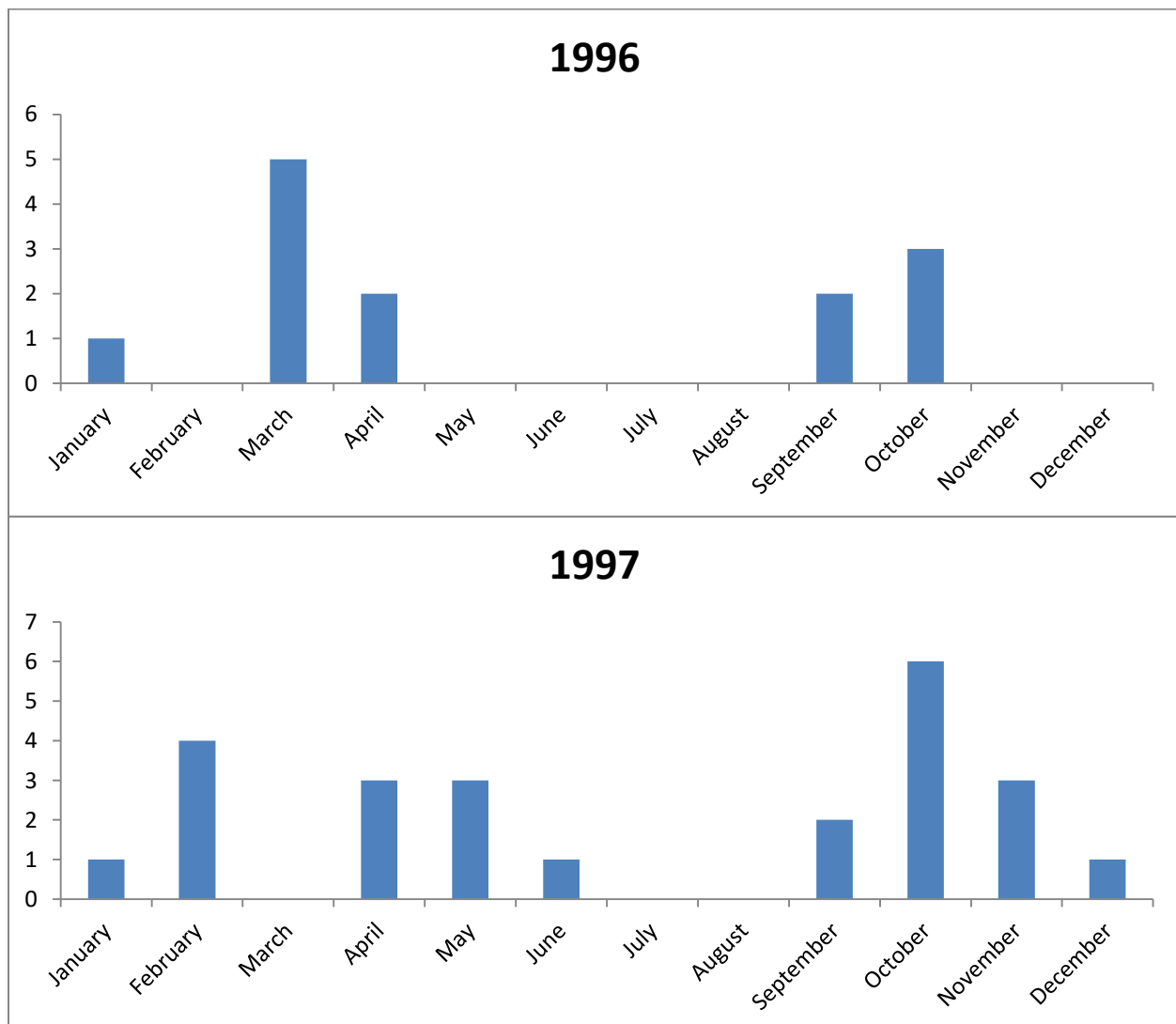
Παρατηρούμε επίσης ότι το 2003 είχαμε μέγιστο στις Moderate καταιγίδες ενώ στις Strong καταιγίδες είχαμε μέγιστο το 2002. Δηλαδή οι Strong, καθώς και οι Severe καταιγίδες, δεν

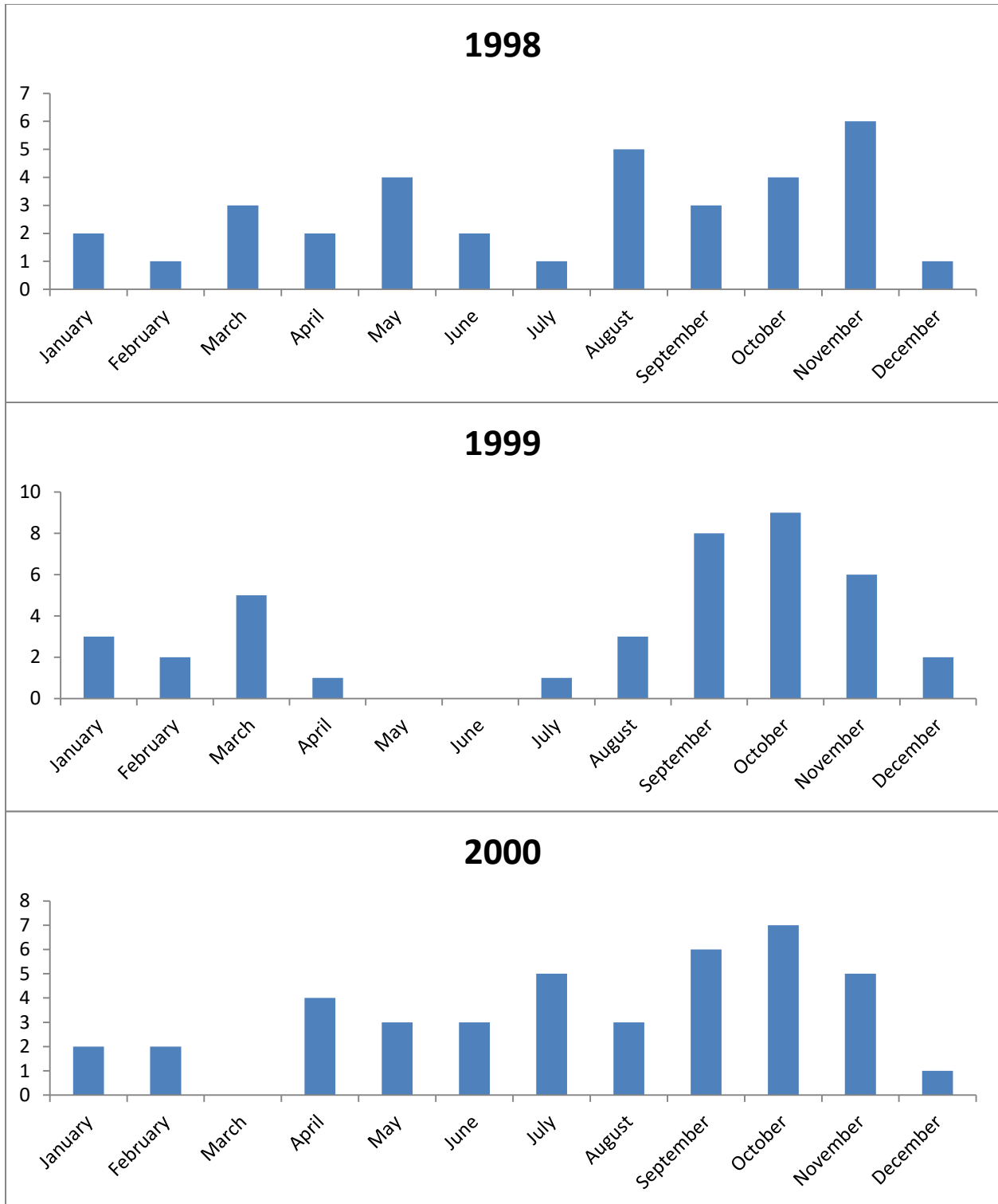
έδειξαν την έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα του 2003. Αυτή καταγράφηκε πιο ξεκάθαρα στις Moderate και στις Great καταιγίδες.

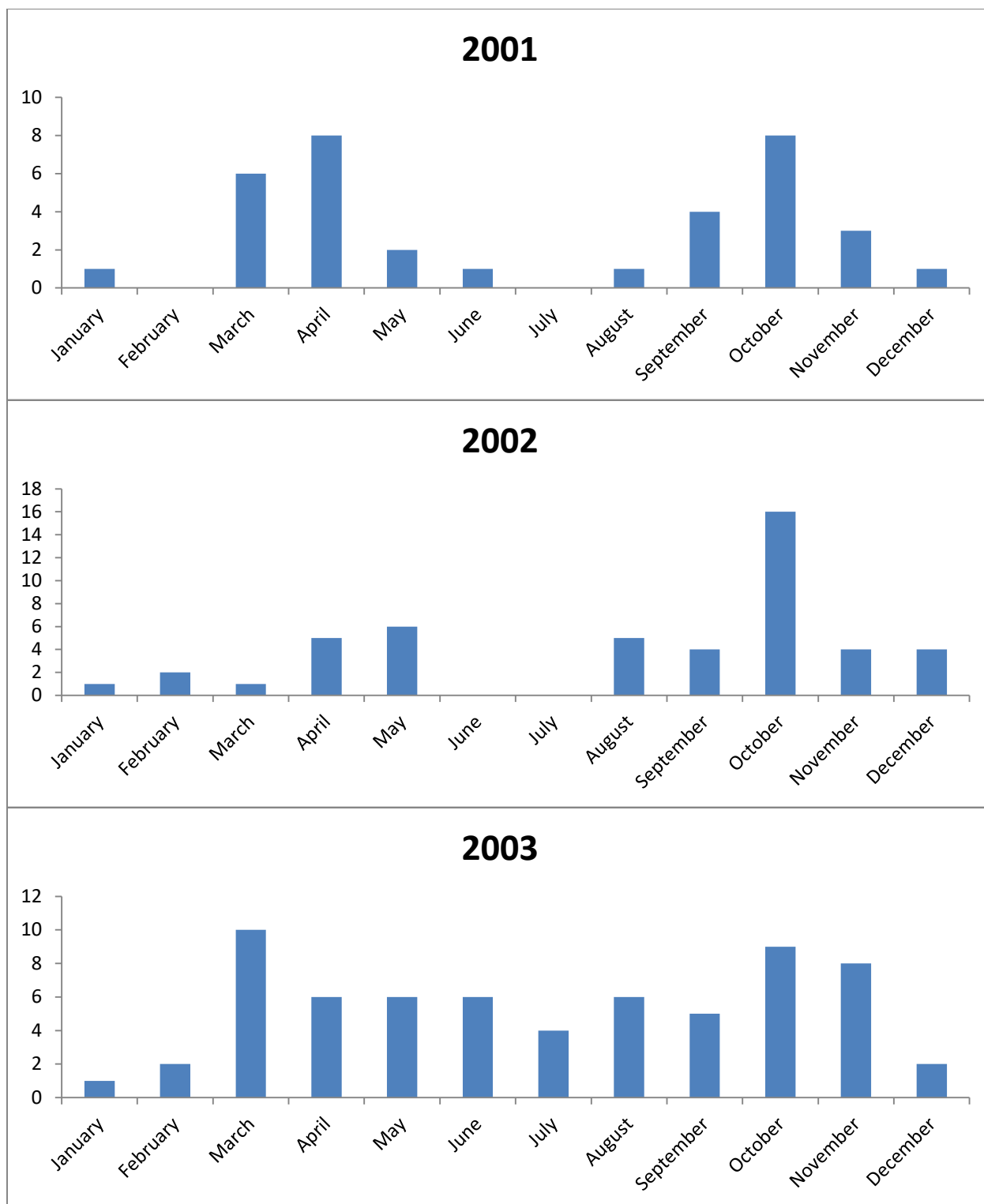
Είναι επίσης φανερό η έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα που εμφανίζεται ~1 χρόνο μετά το ηλιακό μέγιστο, όσον αφορά τουλάχιστον στις Moderate καταιγίδες κυρίως.

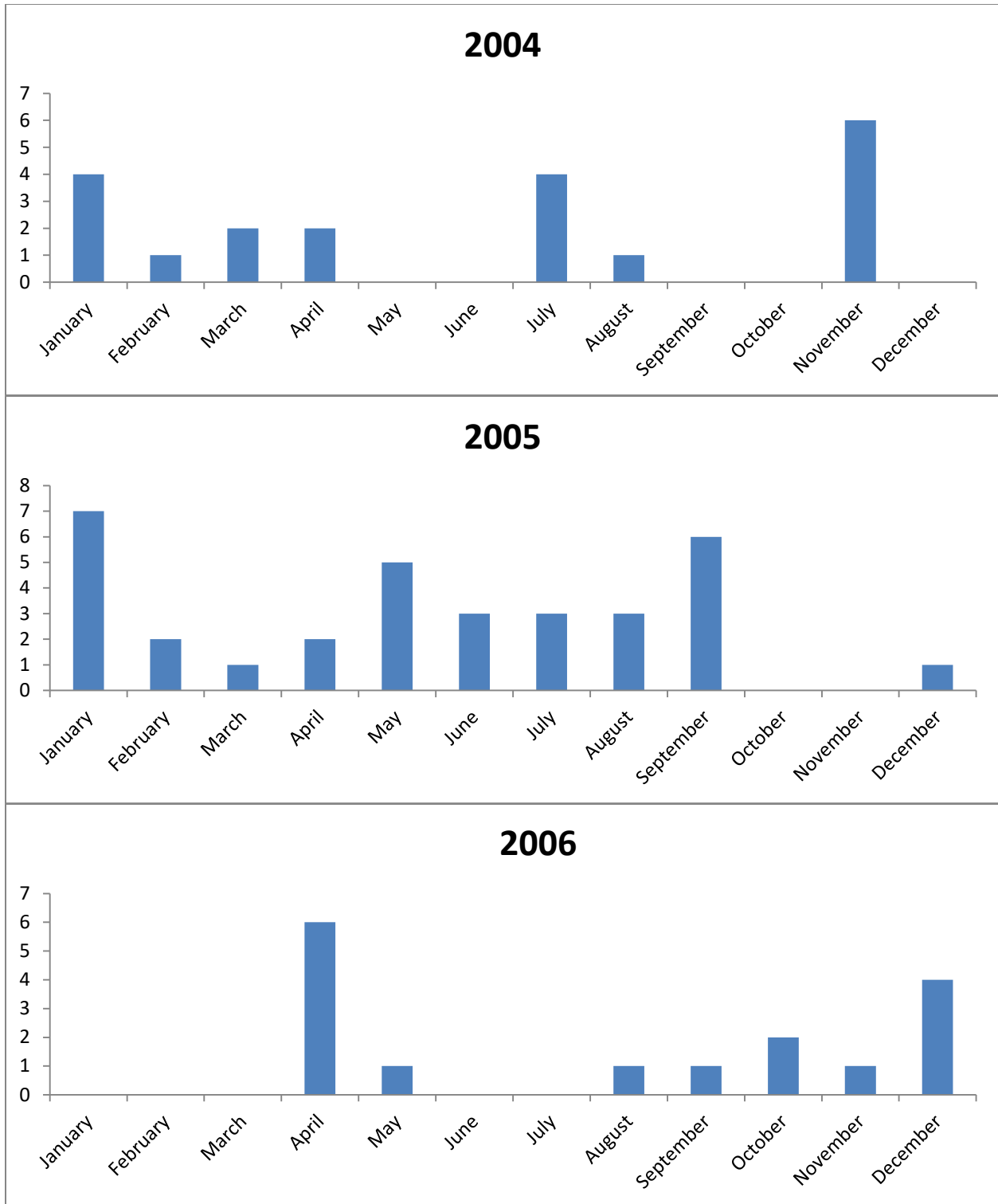
Παρατηρούμε επίσης μεγαλύτερο αριθμό (18) Severe και Great καταιγίδων στον ηλιακό κύκλο 23 παρά στον κύκλο 24 (2 καταιγίδες). Αυτό συμφωνεί με την μειωμένη ηλιακή δραστηριότητα του κύκλου 24 (τον πιο “ήρεμο” ηλιακό κύκλο των τελευταίων 150 ετών).

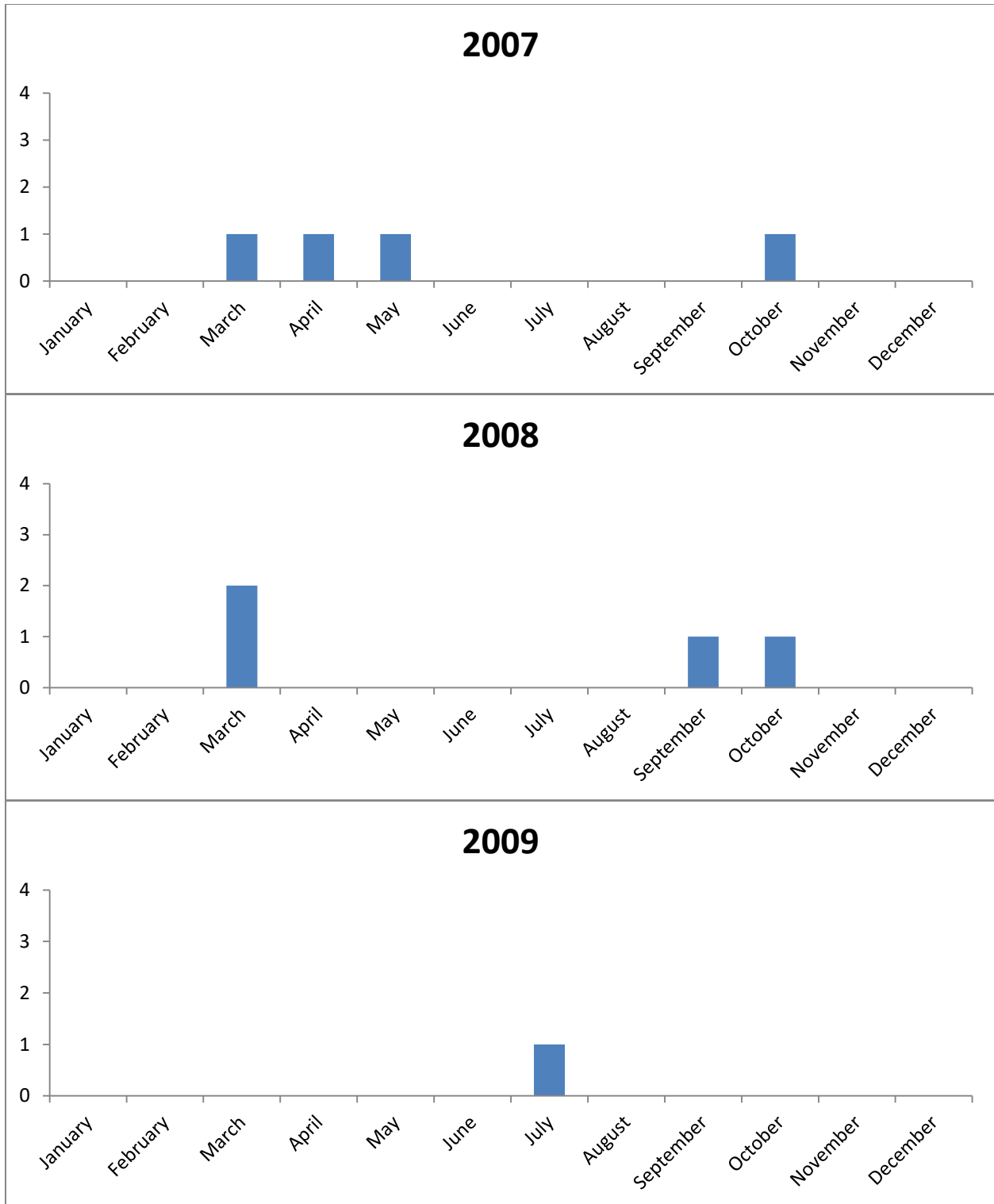
Στην συνέχεια μπορούμε να δούμε την μηνιαία κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων :

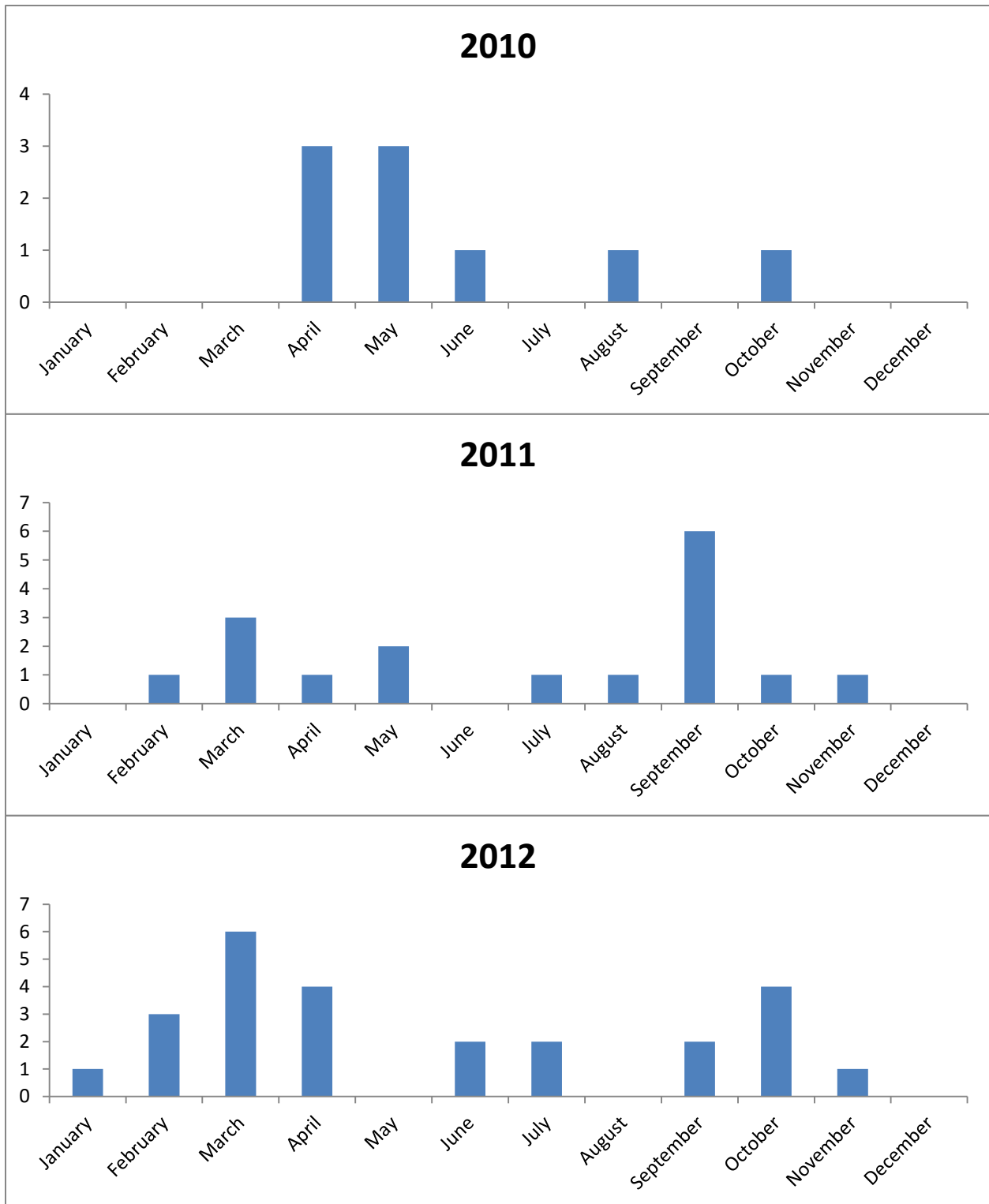


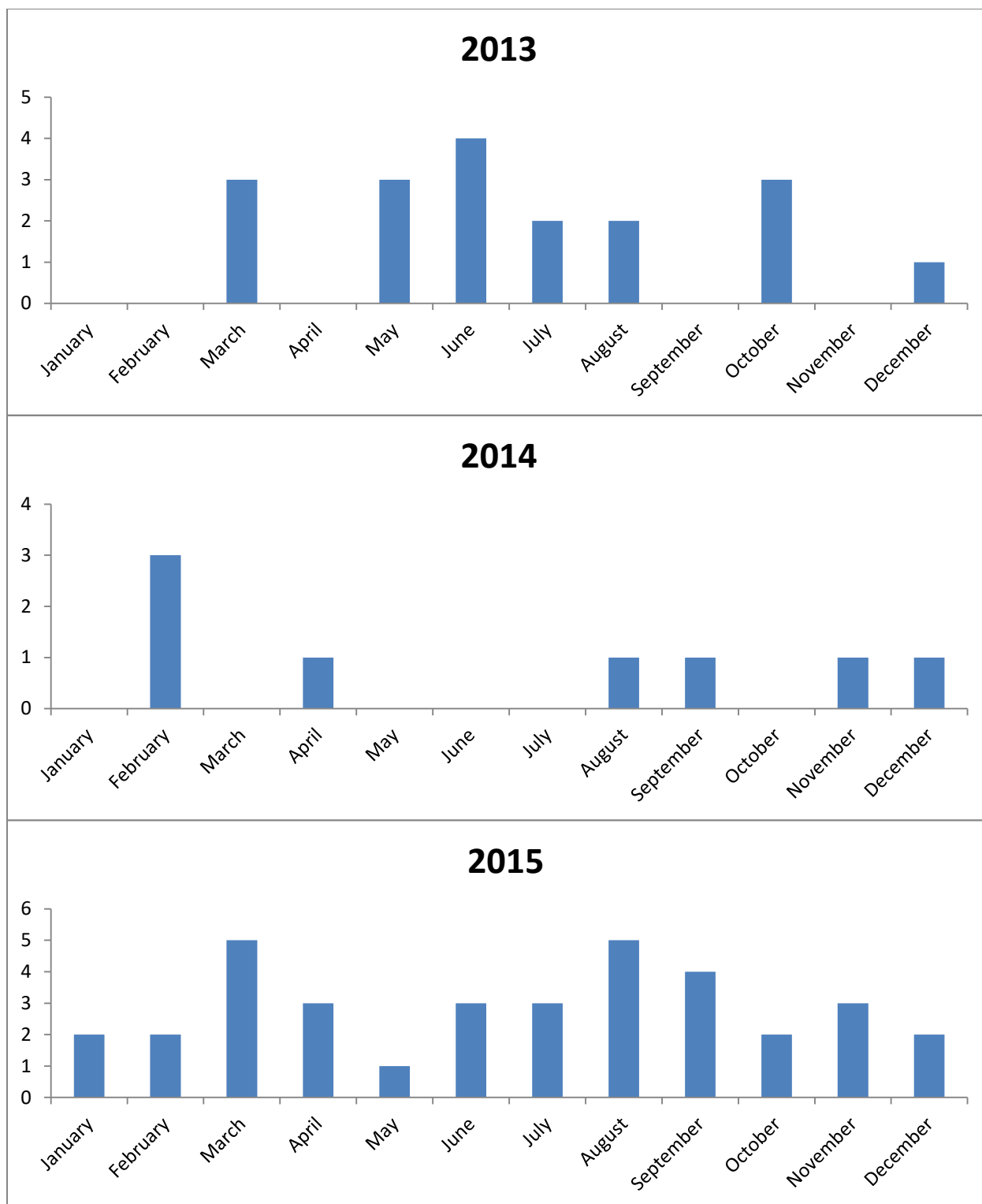


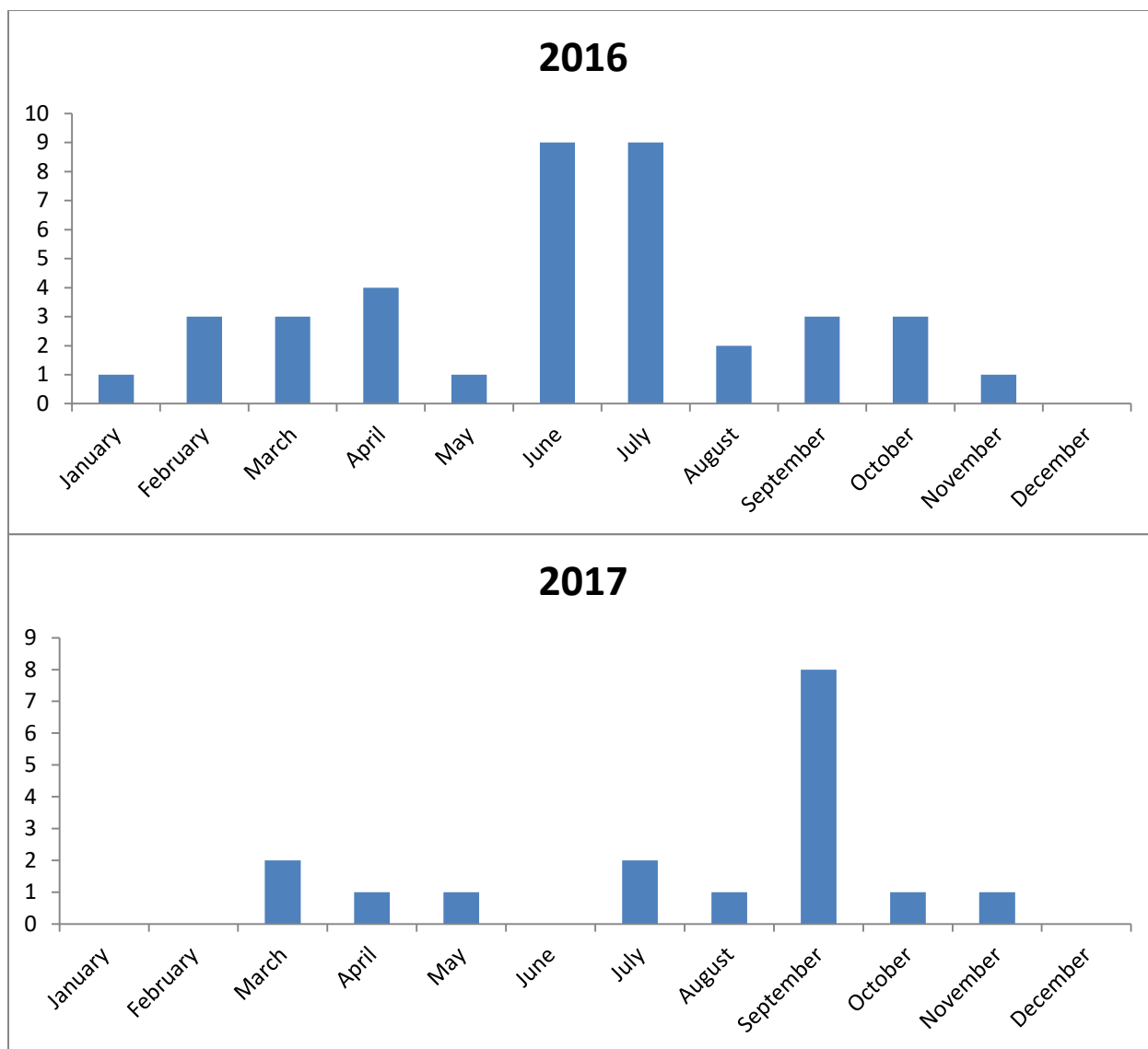






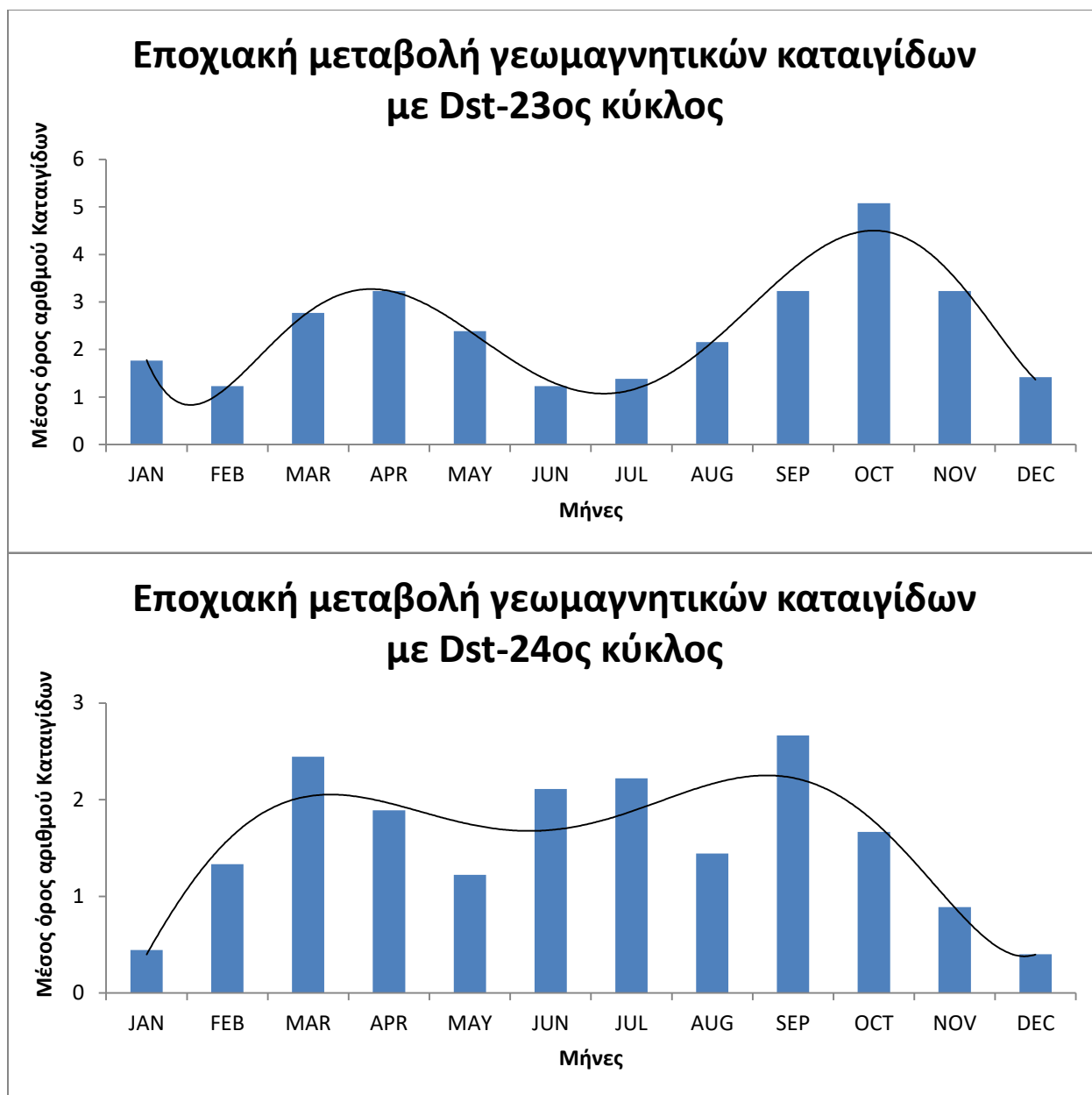






Εικόνα 4.14 Μηνιαία κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους 2 τελευταίους ηλιακούς κύκλους κατά δείκτη Dst

Διαπιστώνουμε και πάλι Μπορούμε πάλι την εξαμηνιαία εποχιακή μεταβολή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για κάθε ηλιακό κύκλο ξεχωριστά :



Εικόνα 4.15 Εποχιακή μεταβολή της εμφάνισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων κατά δείκτη Dst

Παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι πάλι εμφανίζεται η 6-μηνια μεταβολή στον αριθμό των καταιγίδων ανά έτος, όπως ακριβώς συνέβαινε και στις γεωμαγνητικές διαταραχές που μετρήθηκαν με τον δείκτη K_p . Φαίνεται βέβαια και εδώ ότι η μεταβολή αυτή δεν είναι καθολική σε όλα τα χρόνια ούτε και σταθερή κάθε χρόνο, φαίνεται όμως ότι υπάρχει μια “προτίμηση” στην εμφάνιση καταιγίδων κυρίως κατά τον Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο, όπως είδαμε και στις γεωμαγνητικές καταιγίδες κατά K_p . Κυρίως δηλαδή κοντά στις Ισημερίες της Γης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

α) Γεωμαγνητικές καταιγίδες με βάση τον δείκτη K_p

Αρχικά, έγινε καταγραφή των χαρακτηριστικών των γεωμαγνητικών καταιγίδων (αριθμός, ένταση, ημερομηνία) και στην συνέχεια συντάχθηκαν πίνακες που δίνουν την ετήσια και μηνιαία κατανομή των καταιγίδων καθώς και την ετήσια κατανομή τους ανά κατηγορία (G1, G2, G3, G4, G5) για την χρονική περίοδο 1996-2017 καλύπτοντας δύο ολόκληρους ηλιακούς κύκλους.

Η διαδικασία αυτή έγινε για να μελετήσουμε την γεωμαγνητική δραστηριότητα και την χρονική κατανομή των καταιγίδων μέσα στους ηλιακούς κύκλους 23 και 24, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από διαφορετική ηλιακή δραστηριότητα. Αυτή η διαδικασία έδειξε ότι :

- Καταγράφηκαν τα εξής γεγονότα που δίνονται στον Πίνακα 5.1:

Ηλιακός κύκλος 23		Ποσοστό
G1	478	65,9%
G2	158	21,8%
G3	60	8,3%
G4	14	1,9%
G5	15	2,1%
TOTAL	725	
Ηλιακός κύκλος 24		Ποσοστό
G1	197	64,6%
G2	85	27,9%
G3	16	5,2%
G4	5	1,6%
G5	2	0,7%
TOTAL	305	

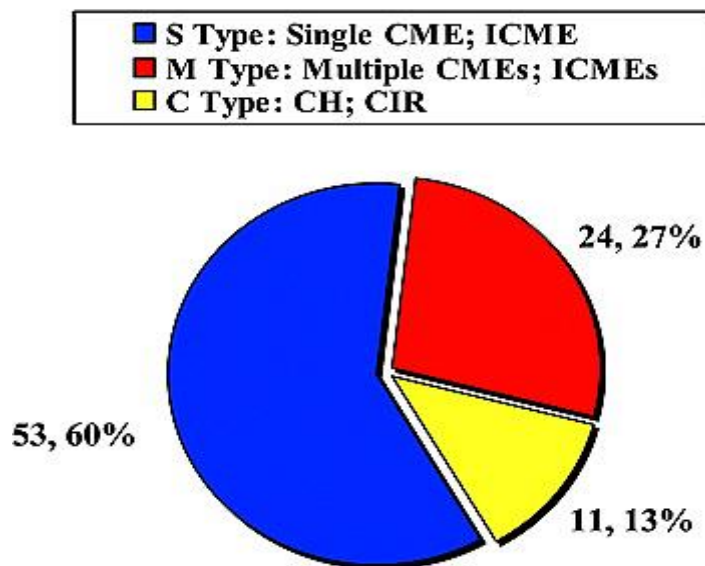
Πίνακα 5.1 Αριθμός και ποσοστό των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία και ανά ηλιακό κύκλο κατά τον δείκτη K_p

Επομένως επιβεβαιώνεται η χαμηλή δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου 24 (Jiang et al., 2015 ; Svalgaard Leif et al., 2005) και μέσω της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, η οποία φαίνεται να εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή δραστηριότητα. Παρατηρούμε επίσης ότι, παρόλο που οι δύο ηλιακοί κύκλοι διαφέρουν πολύ σε ένταση και σε γεωμαγνητική δραστηριότητα, εντούτοις οι διαταραχές που προκάλεσαν ήταν ποσοστιαία σχεδόν ίδιες. Αυτό θα μπορούσε να μας δώσει πληροφορίες και για την πρόβλεψη του Διαστημικού Καιρού και συγκεκριμένα του αριθμού όλων των τύπων γεωμαγνητικών καταιγίδων στο μέλλον.

- Σύμφωνα με την εικόνα 4.3, βλέπουμε ότι ο αριθμός των γεωμαγνητικών καταιγίδων φαίνεται να αυξάνει κατά τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων (2001, 2012), όμως το μέγιστο των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι μετατοπισμένο κατά περίπου 1 χρόνο μετά από το εκάστοτε μέγιστο των ηλιακών κύκλων. Έχουμε δηλαδή μια μορφή “εντεκαετούς κύκλου” των γεωμαγνητικών καταιγίδων, μετατοπισμένη από την μορφή του εντεκαετούς ηλιακού κύκλου κατά περίπου 1 χρόνο. Και ειδικά κατά τον κύκλο 24, οι καταιγίδες, ακόμα και μετά το μέγιστό τους κατά το έτος 2015, συνεχίζουν να είναι αρκετά ψηλά σε αριθμό σε σχέση με το έτος 2012 που ήταν το ηλιακό μέγιστο. Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους δύο τελευταίους ηλιακούς κύκλους οι γεωμαγνητικές καταιγίδες δεν ακολούθησαν τον εκάστοτε εντεκαετή ηλιακό κύκλο, αλλά διαμόρφωσαν μια δική τους εντεκαετή (σχεδόν) κατανομή.
- Για τις ισχυρές καταιγίδες (G4, G5) έχουμε εμφανή συσχέτιση κυρίως στην καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου, περίπου ένα χρόνο μετά το ηλιακό μέγιστο, δηλαδή στα μέγιστα των γεωμαγνητικών καταιγίδων. Αυτά τα ισχυρά γεγονότα των καταιγίδων επιβεβαιώνουν ότι τα μέγιστα των γεωμαγνητικών καταιγίδων όντως εμφανίστηκαν μετά από ~1 χρόνο από τα ηλιακά μέγιστα.

Για τις ισχυρές καταιγίδες των ετών 1996-2005 μπορούμε επίσης να διαπιστώσουμε ότι η κύρια πηγή τους ήταν οι ICMEs όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 5.2 των Zhang et. al. (2007) :

Solar-IP Sources of 88 Major Geomagnetic Storms



Εικόνα 5.2 Ποσοστιαία κατανομή των πηγών των ισχυρότερων γεωμαγνητικών καταιγίδων (με $Dst \leq -100$ nT) κατά τα έτη 1996-2005 (Zhang et al., 2007)

Βλέπουμε εδώ ότι οι ισχυρότερες καταιγίδες προκλήθηκαν κατά κύριο λόγο (53.6%) από μεμονομένες CMEs που έφτασαν στην Γη, δηλαδή τις ICMEs. Στην συνέχεια, ως δεύτερη πηγή (24.27%) αναφέρονται οι πολλαπλές CMEs που έφτασαν στην Γη και σε μικρότερο ποσοστό (11.13%) οι Στεμματικές οπές (Coronal Holes - CHs), οι οποίες δημιούργησαν ρεύματα ηλιακού ανέμου μεγάλης ταχύτητας που έφτασαν μέχρι την Γήινη μαγνητόσφαιρα, δημιουργώντας γεωμαγνητικές διαταραχές οι οποίες εξελίχθηκαν σε γεωμαγνητικές καταιγίδες (Corotating interaction regions – CIRs).

- Το μέγιστο των γεωμαγνητικών καταιγίδων του ηλιακού κύκλου 23 (2003) είναι παραπάνω από διπλάσιο από το μέγιστο των καταιγίδων του κύκλου 24 (2015). Για την ακρίβεια, στον κύκλο 23 είχαμε 145 καταιγίδες το 2003, ενώ μόνο 64 καταιγίδες το 2015. Αυτό εξηγείται προφανώς από την αρκετά χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα του κύκλου 24.
- Υπάρχει μια εξάμηνη περιοδικότητα, στην εικόνα 4.14, στην εμφάνιση των γεωμαγνητικών καταιγίδων, η οποία φαίνεται να εμφανίζει τα μέγιστά της κοντά στις ισημερίες, δηλαδή Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο, το οποίο δηλώνει την ύπαρξη εποχιακής μεταβολής των γεωμαγνητικών καταιγίδων. Τέτοιες εποχιακές μεταβολές έχουν μετρηθεί πάλι για την γεωμαγνητική δραστηριότητα (Paouris and Mavromichalaki, 2017 ; Tanskanen et al., 2017 ; Russell and McPherron, 1973), οι οποίες εμφανίζουν τα μέγιστά τους στις Ισημερίες και τα ελάχιστα τους στα Ηλιοστάσια. Μέχρι στιγμής δεν έχει υπάρξει μια αποδεκτή

επιστημονική εξήγηση για την εποχιακή αυτή μεταβολή της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, όμως οι επικρατέστερες θεωρίες που την εξηγούν είναι τρεις :

α) Η Ισημερινή υπόθεση (the equinoctial hypothesis : Bartels, 1932 ; McIntosh, 1959 ; Svalgaard, 1977) που βασίζεται στην κλίση των 23° του Ισημερινού επιπέδου με την εκλειπτική και την διαφορά των 11° μεταξύ του άξονα περιστροφή και του μαγνητικού διπόλου της Γης.

β) Ο μηχανισμός Russell-McPherron (Russell and McPherron, 1973) που βασίζεται στην γωνία 26° μεταξύ του ηλιακού και του γήινου ισημερινού επιπέδου και την διαφορά των 11° μεταξύ του άξονα περιστροφή και του μαγνητικού διπόλου της Γης.

γ) Η Αξονική υπόθεση (Cortie, 1912) που βασίζεται στην κλίση 7° του ηλιακού ισημερινού επιπέδου με το επίπεδο της εκλειπτικής.

β) Γεωμαγνητικές καταιγίδες με βάση τον δείκτη Dst

Όπως και στην προηγούμενη διαδικασία, έγινε καταγραφή των στοιχείων των γεωμαγνητικών καταιγίδων (αριθμός, ένταση, ημερομηνία) τα οποία μετρήθηκαν με την βοήθεια του δείκτη Dst και στην συνέχεια συντάχθηκαν πίνακες που δείχνουν την ετήσια και μηνιαία κατανομή των καταιγίδων καθώς και την ετήσια κατανομή τους ανά κατηγορία (Moderate, Strong κτλ).

Έγιναν επομένως οι ίδιες ενέργειες :

- Τα γεγονότα που καταγράφηκαν δίνονται στον Πίνακα 5.3 :

Ηλιακός κύκλος 23		Ποσοστό
Moderate	273	74,3%
Strong	80	21,0%
Severe	13	3,4%
Great	5	1,3%
TOTAL	371	
Ηλιακός κύκλος 24		Ποσοστό
Moderate	130	85,5%
Strong	20	13,2%
Severe	2	1,3%
Great	0	0,0%
TOTAL	152	

Πίνακας 5.3 Αριθμός και ποσοστό των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανά κατηγορία και ανά ηλιακό κύκλο κατά τον δείκτη Dst

Επιβεβαιώνεται και εδώ η χαμηλή δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου 24 (Jiang et al., 2015). Παρατηρούμε επίσης ότι οι 2 ηλιακοί κύκλοι διαφέρουν πολύ σε ένταση αλλά διαφέρουν λίγο και σε γεωμαγνητική δραστηριότητα καθώς οι διαταραχές που προκάλεσαν δεν ήταν ποσοστιαία πολύ κοντά, όπως έγινε με τις γεωμαγνητικές καταιγίδες κατά K_p . Βλέπουμε ότι στον κύκλο 24 είχαμε πιο πολλές, ποσοστιαία, μέτριες καταιγίδες (Moderate) απ'ότι στον κύκλο 23. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο κύκλος 24 ήταν πιο “φτωχός” από τον 23 και σε αριθμό αλλά και σε ένταση γεγονότων που σχετίζονται με την γεωμαγνητική δραστηριότητα.

- Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες των ηλιακών κύκλων 23 και 24 φαίνεται να έχουν και εδώ τα μέγιστα τους μετατωπισμένα ως προς τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων. Τα μέγιστα των καταιγίδων είναι ίδια όπως και με την δείκτη K_p , δηλαδή το 2003 και το 2015. Εμφανίζεται δηλαδή ξανά ένας “εντεκαετής κύκλος” γεωμαγνητικών καταιγίδων μετατωπισμένος από τον εντεκαετή ηλιακό κύκλο κατά 1-2 χρόνια περίπου. Επίσης και εδώ οι καταγεγραμμένες καταιγίδες του κύκλου 23 είναι διπλάσιες από τις καταιγίδες του μεγίστου του κύκλου 24. Στον κύκλο 23 οι καταιγίδες το 2003 είναι 66 ενώ στον κύκλο 24 το 2015 είναι 36. Αυτό συνάδει με το γεγονός ότι ο ηλιακός κύκλος 24 είναι πιο ασθενής σε ένταση και γεγονότα σε σχέση με τον 23.
- Επιβεβαιώνεται πάλι η χαμηλή δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου 24 (Jiang et al., 2015).
- Οι καταιγίδες που καταγράφηκαν με τον δείκτη Dst είναι περίπου 500 λιγότερες από αυτές που καταγράφηκαν με τον δείκτη K_p . Έχουμε δηλαδή τις μισές καταιγίδες με τον δείκτη Dst απ'ότι με τον δείκτη K_p (51% των καταιγίδων με K_p είναι οι καταιγίδες μετρημένες με τον Dst). Αυτό υποδηλώνει ότι καταγράφηκαν πολλές γεωμαγνητικές διαταραχές σε υψηλά πλάτη (με τον K_p) οι οποίες όμως δεν έφτασαν μέχρι το επίπεδο του μαγνητικού Ισημερινού. Επομένως παρατηρείται διαφορά στην καταμέτρηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με τους δύο αυτούς γεωμαγνητικούς δείκτες.
- Για τις ισχυρές καταιγίδες (Severe, Great) φαίνεται να έχουμε μικρή συσχέτιση μόνο με τον ηλιακό κύκλο 23, καθώς και μια επίσης μικρή συσχέτιση με τα μέγιστα της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, περίπου 1-2 χρόνια μετά το εκάστοτε ηλιακό μέγιστο. Αυτό έγινε φανερό και προηγουμένως με την χρήση του δείκτη K_p και με την σύγκριση των καταιγίδων με τις CMEs.

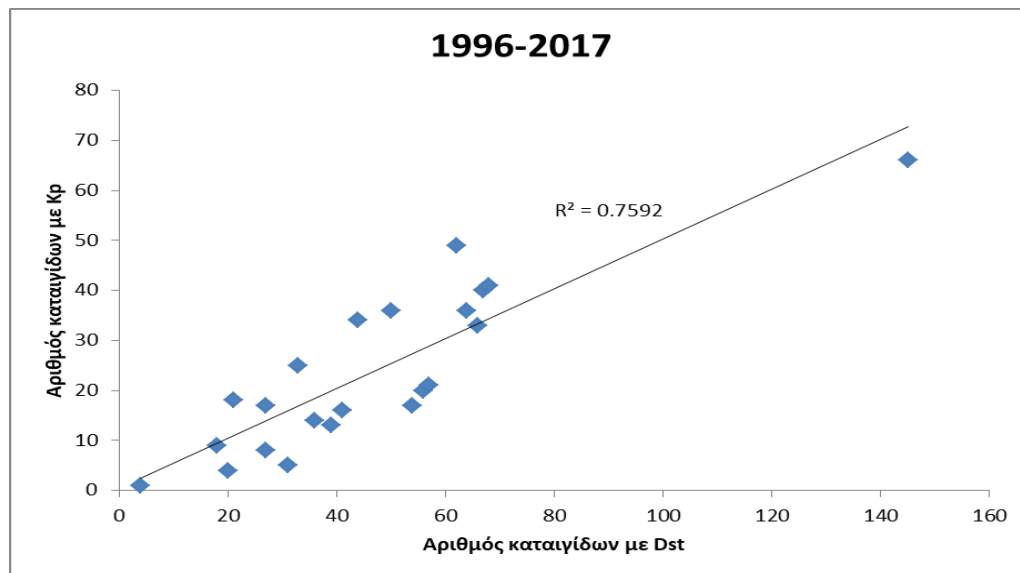
- Παρατηρείται πάλι η εξάμηνη εποχιακή μεταβολή στην εμφάνιση των γεωμαγνητικών καταιγίδων, η οποία φαίνεται να εμφανίζει τα μέγιστα της κοντά στις ισημερίες, δηλαδή Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο.

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τώρα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον προσδιορισμό των γεωμαγνητικών διαταραχών και καταιγίδων με χρήση τόσο του δείκτη K_p όσο και του ισημερινού δείκτη Dst, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

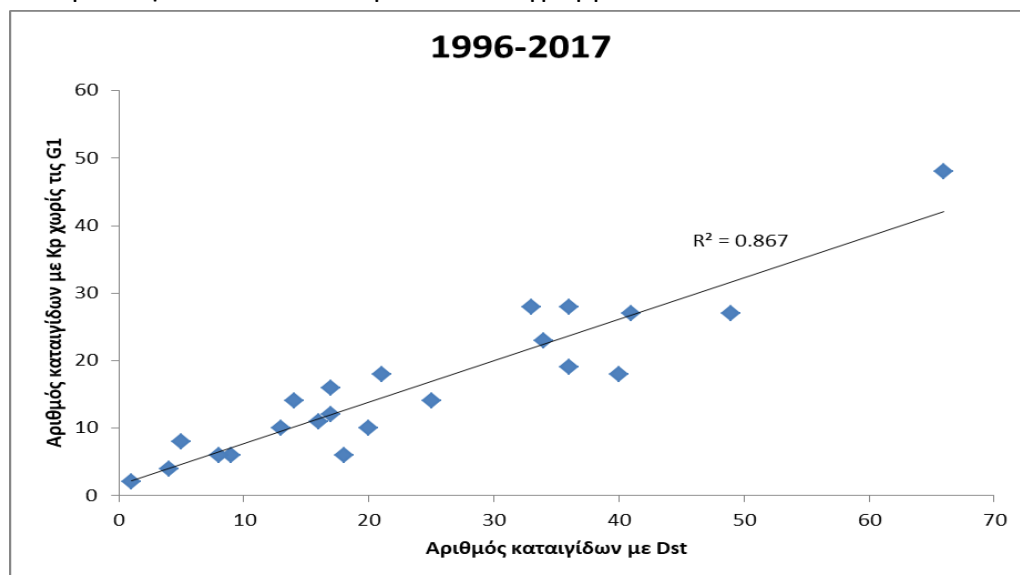
1. Με τον δείκτη K_p καταγράφηκαν 1030 γεωμαγνητικές καταιγίδες, σχεδόν διπλάσιος αριθμός (51%) απ'ότι με τον δείκτη Dst που ήταν 523 σε αριθμό, οι περισσότερες όμως ήταν μέτριας έντασης (675 δηλαδή 66% ήταν τύπου G1, εικόνα 4.1). Αυτό υποδηλώνει ότι σχεδόν οι μισές γεωμαγνητικές καταιγίδες τα έτη 1996-2017 έφτασαν μέχρι τα μεσαία γεωγραφικά πλάτη και δεν καταγράφηκαν στον Ισημερινό. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο δείκτης K_p καταγράφει ουσιαστικά και τις γεωμαγνητικές υποκαταιγίδες, οι οποίες δεν καταμετρώνται στο επίπεδο του Ισημερινού αλλά σε υψηλότερα πλάτη.

Ελέγχοντας την συσχέτιση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με τους δείκτες K_p και Dst, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα :



Εικόνα 5.4 Διάγραμμα συσχέτισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων με βάση τους δείκτες Kp και Dst. Ο συντελεστής συσχέτισης προκύπτει $R^2=0.76$

Έχουμε επομένως μια συσχέτιση της τάξης του 76%. Παρατηρώντας όμως ότι οι καταιγίδες τύπου G1 για τον Kp ονομάζονται Minor Storms (από την ταξινόμηση του NOAA) και οι αντίστοιχες Minor Storms για τον δείκτη Dst έχουν την ταξινόμηση : $-30\text{nT} \leq \text{Dst} \leq -50\text{nT}$ (Weak Storms) και δεν συγκαταλέγονται στις γεωμαγνητικές καταιγίδες σύμφωνα με την παγκόσμια ταξινόμησή τους, δοκιμάσαμε να συγκρίνουμε τις καταιγίδες με τον δείκτη Kp και Dst χωρίς να συμπεριλάβουμε τις καταιγίδες G1 (οι οποίες αποτελούν το 66% των συνολικών καταιγίδων με βάση τον δείκτη Kp) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 5.5 Διάγραμμα συσχέτισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων με βάση τους δείκτες K_p (χωρίς τις καταιγίδες τύπου G1) και Dst. Ο συντελεστής συσχέτισης προκύπτει $R^2=0.87$.

Παρατηρούμε επομένως καλύτερη συσχέτιση (~87%) των καταιγίδων με βάση τον K_p και τον Dst αφαιρώντας τις καταιγίδες G1. Επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αντιστοιχία των κατηγοριών των καταιγίδων με βάση τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες είναι :

Καταιγίδες με βάση τον K_p	Καταιγίδες με βάση τον Dst
G1 ($K_p=5$)	Weak ($-50 \leq Dst \leq -30$)
G2 ($K_p=6$)	Moderate ($-100 \leq Dst \leq -50$)
G3 ($K_p=7$)	Strong ($-200 \leq Dst \leq -100$)
G4 ($K_p=8$)	Severe ($-350 \leq Dst \leq -200$)
G5 ($K_p=9$)	Great ($Dst \leq -350$)

Εικόνα 5.6 Πίνακας αντιστοιχίας των γεωμαγνητικών καταιγίδων με βάση τους δύο βασικούς γεωμαγνητικούς δείκτες K_p και Dst, όπως προέκυψε από την εργασία αυτή

- Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες κατά τον K_p δείκτη για τους δύο ηλιακούς κύκλους ήταν ποσοστιαία όμοιες κατά κατηγορία, ενώ κατά τον δείκτη Dst διέφεραν λίγο (εικόνες 5.1 και 5.3). Στον κύκλο 24 είχαμε λίγο περισσότερες μέτριας έντασης καταιγίδες απ'ότι στον κύκλο 23. Αυτό εξηγείται από την χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου 24, η οποία επισημαίνεται στην εργασία των Jiang et al. (2015).
- Η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων και για τους δύο δείκτες, φαίνεται να ακολουθεί ελαφρώς μετατοπισμένα την κατανομή των ηλιακών κηλίδων, δηλαδή τον εντεκαετή ηλιακό κύκλο, με τα μέγιστα των κατανομών των καταιγίδων να είναι μετατοπισμένα κατά ~1 χρόνο από τα μέγιστα των ηλιακών κύκλων και μάλιστα είναι μετατοπισμένα προς την καθοδική φάση των ηλιακών κύκλων. Δηλαδή η κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων έχει την μορφή του “εντεκαετούς κύκλου”, μετατοπισμένου κατά ~1 χρόνο ως προς την κατανομή των ηλιακών κηλίδων. Ειδικά στον κύκλο 24,

σύμφωνα με τον δείκτη K_p (εικόνα 4.3) οι καταιγίδες, μετά το μέγιστό τους το 2015, συνεχίζουν να βρίσκονται σε υψηλό (για τον κύκλο 24) επίπεδο και μάλιστα είχαμε και την εμφάνιση δύο καταιγίδων τύπου G5 το 2017.

4. Η χαμηλή δραστηριότητα του κύκλου 24 επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι στον κύκλο 23, κατά το μέγιστο των γεωμαγνητικών καταιγίδων το 2003, είχαμε περίπου διπλάσιες καταιγίδες απ'ότι στον κύκλο 24 όπου το μέγιστο των καταιγίδων ήταν το 2015 (και για τους δύο δείκτες). Συγκεκριμένα, για τον δείκτη K_p είχαμε 145 καταιγίδες το 2003 και 64 το 2015, ενώ για τον δείκτη Dst είχαμε 66 καταιγίδες το 2003 και 36 το 2015.
5. Για τις ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες (τύπου G4,G5 και Severe,Great) φαίνεται να έχουμε πιο συχνή εμφάνισή τους κυρίως στις καθοδικές φάσεις των ηλιακών κύκλων (2003, 2015), χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχει και η εμφάνισή τους στις ανοδικές φάσεις των ηλιακών κύκλων. Πάντως οι εμφανίσεις τους φαίνεται να εξαρτώνται άμεσα από την εμφάνιση των ICMEs (J. Zhang et al., 2007 και εικόνα 5.2).
6. Εμφανίζεται μια εξάμηνη εποχιακή μεταβολή στην κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων (εικόνες 4.9 και 4.15), και για τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες, η οποία εμφανίζει τα μέγιστα της κοντά στις Ισημερίες, δηλαδή Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβρη-Οκτώβρη και τα ελάχιστα της στα ηλιοστάσια. Αυτή η εποχιακή μεταβολή της γεωμαγνητικής δραστηριότητας έχει παρατηρηθεί ξανά (Paouris and Mavromichalaki, 2017 ; Tanskanen et al., 2017 ; Svalgaard et al., 2002 ; Cliver and Crooker, 1993), ενώ αποδεκτή επιστημονική εξήγηση για την μεταβολή αυτή δεν έχει υπάρξει ακόμα. Οι επικρατέστερες θεωρίες για την εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι τρεις :
 - α) Η Ισημερινή υπόθεση (the equinoctial hypothesis : Bartels, 1932 ; McIntosh, 1959 ; Svalgaard, 1977) που βασίζεται στην κλίση των 23° του Ισημερινού επιπέδου με την εκλειπτική και την διαφορά των 11° μεταξύ του άξονα περιστροφή και του μαγνητικού διπόλου της Γης.
 - β) Ο μηχανισμός Russell-McPherron (Russell and McPherron, 1973) που βασίζεται στην γωνία 26° μεταξύ του ηλιακού και του γήινου ισημερινού επιπέδου και την διαφορά των 11° μεταξύ του άξονα περιστροφής και του μαγνητικού διπόλου της Γης.
 - γ) Η Αξονική υπόθεση (Cortie, 1912) που βασίζεται στην κλίση 7° του ηλιακού ισημερινού επιπέδου με το επίπεδο της εκλειπτικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε καταγραφή, ταξινόμηση και στατιστική μελέτη των γεωμαγνητικών καταιγίδων για τους ηλιακούς κύκλους 23 και 24 (1996-2017), ένα αρκετά μεγάλο χρονικό εύρος το οποίο βοηθάει να αποκτήσουμε μια πολύ καλή εικόνα για την συσχέτιση της ηλιακής με την γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε προσδιορισμός και ταξινόμηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με τη χρήση δεδομένων των γεωμαγνητικών δεικτών K_p και Dst. Ο δείκτης K_p λήφθηκε από την βάση δεδομένων του National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>) και μετράται κάθε 3 ώρες έχοντας συνολικά 8 τιμές ανά ημέρα, από την τιμή 0 (καθόλου γεωμαγνητική διαταραχή) έως και την τιμή 9 (πολύ ισχυρή γεωμαγνητική διαταραχή). Όταν ο δείκτης K_p είναι $K_p \geq 5$, τότε θεωρούμε ότι έχουμε γεωμαγνητική καταιγίδα μέσα στην ημέρα, επομένως καταγράφουμε την καταιγίδα ανάλογα με τον τύπο της (την έντασή της, βλέπε εικόνα 3.9). Οι γεωμαγνητικές αυτές καταιγίδες καταμετρώνται από 13 επίγειους σταθμούς σε μεγάλα πλάτη, κυρίως στο βόρειο ημισφαίριο και δεν είναι πάντα φανερές στον γεωμαγνητικό ισημερινό, όπως διαπιστώσαμε στην εργασία αυτή, προσδιορίζοντας και τις μικρές διαταραχές και καταιγίδες. Δηλαδή φάνηκε ότι ο δείκτης K_p συμπεριλαμβάνει και τις υποκαταιγίδες (απότομες και μικρής διάρκειας γεωμαγνητικές διαταραχές) ως διαταραχές με $K_p \geq 5$.

Η χρήση όμως του δείκτη Dst δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού των γεωμαγνητικών καταιγίδων που γίνονται ορατές και στον γεωμαγνητικό ισημερινό. Για τον δείκτη Dst, ο οποίος μετράται και καταγράφεται κάθε 1 ώρα από 4 επίγειους ισημερινούς σταθμούς, χρησιμοποιούμε τιμές του από -50nT και κάτω για να θεωρήσουμε ότι έχουμε γεωμαγνητική καταιγίδα (η οποία φθάνει και γίνεται αισθητή μέχρι τον γεωμαγνητικό ισημερινό). Ο δείκτης Dst λήφθηκε από τα δεδομένα του Παγκόσμιου Κέντρου δεδομένων Γεωμαγνητισμού του Κυότο (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>). Χρησιμοποιούμε την αντίστοιχη ταξινόμηση των καταιγίδων (βλέπε παράγραφο 3.2) και κάνουμε την ίδια μελέτη όπως με τον δείκτη K_p .

Καταγράφουμε τις καταιγίδες ανά ημέρα και στην συνέχεια κάνουμε την μηνιαία και ετήσια κατανομή τους, για ολόκληρους τους δύο ηλιακούς κύκλους (1996-2017).

Τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας αυτής είναι :

- Ο αριθμός των γεωμαγνητικών καταιγίδων που καταγράφηκαν με τον δείκτη Dst προέκυψε σχεδόν ο μισός (51%) από τον αριθμό των καταιγίδων που καταγράφηκαν με τον δείκτη K_p . Αυτό οφείλεται κυρίως στην καταμέτρηση και των μικρής ισχύος γεωμαγνητικών καταιγίδων τύπου G1 με βάση τον K_p , οι οποίες εάν δεν ληφθούν υπόψην τότε έχουμε βελτίωση της συσχέτισης των γεωμαγνητικών καταιγίδων με βάση τους δύο αυτούς δείκτες. Αυτό μας οδηγεί στην υπόθεση ότι ο K_p καταγράφει και τις λιγότερο ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες που δεν γίνονται αντιληπτές στον γεωμαγνητικό ισημερινό, δηλαδή ουσιαστικά τις γεωμαγνητικές υποκαταιγίδες (τις ισχυρότερες εξ'αυτών, καθώς γεωμαγνητικές υποκαταιγίδες μπορούμε να έχουμε αρκετές ανά ημέρα, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε με βάση τον δείκτη K_p για $K_p \geq 5$).
- Επιβεβαιώνεται η χαμηλή γεωμαγνητική δραστηριότητα του ηλιακού κύκλου 24, καθώς είχαμε περίπου διπλάσιες γεωμαγνητικές καταιγίδες στον ηλιακό κύκλο 23 απ'ότι στον 24 και για τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες.
- Η ετήσια κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων φαίνεται να ακολουθεί την δομή του εντεκαετούς ηλιακού κύκλου ελαφρώς μετατοπισμένη κατά ~ 1 χρόνο προς την καθοδική φάση κάθε κύκλου.
- Εμφανίζεται αυξημένη γεωμαγνητική δραστηριότητα κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου σε σχέση με την ανοδική φάση. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην συσσώρευση περισσότερων ηλιακών κηλίδων (άρα και ενεργών ηλιακών περιοχών – Active Regions) κοντά στον ηλιακό ισημερινό μετά το ηλιακό μέγιστο καθώς αυτές τείνουν να μειωθούν σε αριθμό κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου. Επομένως έχουμε την εμφάνιση ενεργών ηλιακών περιοχών σε ηλιακά πλάτη που τις κάνουν πιο γεωμαγνητικά ενεργές απ'ότι στην ανοδική φάση του ηλιακού κύκλου.
- Έχουμε την εμφάνιση δύο μεγίστων της ετήσιας κατανομής των γεωμαγνητικών καταιγίδων κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου 23 (2002-2003 και 2005). Αυτό έγινε φανερό και με τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες. Για τον κύκλο 24 βλέπουμε μέγιστα των καταιγίδων τα έτη 2012 (κοντά στο πρώτο μέγιστο του ηλιακού κύκλου 24) και το 2015 (μετά το κύριο μέγιστο του κύκλου 24). Βέβαια, για τον κύκλο 24 θα μπορέσουμε να βγάλουμε ασφαλέστερο συμπέρασμα μόλις έχουμε όλα τα δεδομένα για αυτόν (μέχρι τα τέλη του 2019 που προβλέπεται να ολοκληρωθεί).
- Έχουμε την εμφάνιση εποχιακής μεταβολής των γεωμαγνητικών καταιγίδων και για τους δύο ηλιακούς κύκλους και με τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες. Τα μέγιστα των γεωμαγνητικών καταιγίδων φάνηκε να βρίσκονται κοντά στις Ισημερίες, δηλαδή

Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο-Οκτώβριο. Έχει γίνει προσπάθεια εξήγησης του φαινομένου της εποχιακής αυτής μεταβολής από τους Russell και McPherron το 1973 και έχει παρατηρηθεί προγενέστερα για τα έτη 1875-1927 (Russell and McPherron, 1973) και για τα έτη 1957-1990 (Cliver and Crooker, 1992). Στην εργασία αυτή η εποχιακή μεταβολή παρατηρήθηκε τα έτη 1996-2017.

6.2 Προοπτικές

Η μελέτη που έγινε στην παρούσα εργασία με την επεξεργασία ενός μεγάλου όγκου δεδομένων μας πληροφορεί και μας παρακινεί σε περαιτέρω έρευνα για :

- την σχέση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με την ηλιακή δραστηριότητα και την κατανομή τους στη διάρκεια των ηλιακών κύκλων.
- την μελέτη του φαινομένου ύπαρξης των μεγίστων της κατανομής των γεωμαγνητικών καταιγίδων ~ 1 χρόνο μετά από το εκάστοτε ηλιακό μέγιστο, πράγμα που εκ πρώτης όψεως φαίνεται να εξηγείται από την θέση των ηλιακών κηλίδων πάνω στον ηλιακό δίσκο κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου.
- την συσχέτιση των δύο αυτών βασικών γεωμαγνητικών δεικτών που καταγράφουν τις γεωμαγνητικές καταιγίδες και γενικά την γεωμαγνητική δραστηριότητα. Η συσχέτιση των γεωμαγνητικών δεικτών είναι πολύ σημαντική για την χρήση τους στην κατανόηση της κατάστασης της γήινης μαγνητόσφαιρας κατά την διάρκεια μιας διαταραχής της καθώς και στην έγκαιρη και έγκυρη πρόβλεψη της κατάστασης αυτής.
- την συσχέτιση των γεωμαγνητικών καταιγίδων με την πρόγνωση του Διαστημικού Καιρού. Είναι αρκετά δύσκολο να γίνει άμεση συσχέτιση της καθημερινής διαδικασίας πρόγνωσης του Διαστημικού Καιρού με την στατιστική μελέτη των γεωμαγνητικών καταιγίδων των τελευταίων δύο ηλιακών κύκλων. Ωστόσο η μελέτη αυτή θα μπορούσε να μας βοηθήσει μελλοντικά στην πρόγνωση του Διαστημικού Καιρού, κυρίως ανά περιόδους μερικών μηνών και ετών, γνωρίζοντας στατιστικά τις μηνιαίες και ετήσιες κατανομές τους στους προηγούμενους ηλιακούς κύκλους, ώστε να έχουμε μια καλύτερη στατιστική κατανομή των γεωμαγνητικών καταιγίδων για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα και να δούμε την συμπεριφορά και την εμφάνισή τους ανά ηλιακό κύκλο. Αυτές οι διαδικασίες έγκαιρης και έγκυρης πρόγνωσης του Διαστημικού Καιρού θα μπορούσαν να βοηθήσουν τόσο στην προστασία όσο και στην διεξαγωγή των διαστημικών αποστολών, είτε επανδρωμένων είτε μη επανδρωμένων.
- την συσχέτιση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας τόσο με την Κοσμική Ακτινοβολία (Mavromichalaki et al., 1998) που καταφθάνει στην Γη, όσο και με την επίδραση και των δύο αυτών πεδίων στο γήινο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Για

παράδειγμα την επίδραση του ρυθμού εμφάνισης καρδιακών αρρυθμιών από την αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού και διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Giannaropoulou et al., 2014) ή τις δόσεις ακτινοβολίας των πληρωμάτων και των επιβατών των αεροπορικών πτήσεων κατά την διάρκεια εκδήλωσης γεωμαγνητικών καταιγίδων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΒΙΒΛΙΑ

Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη Ε., “Κοσμική Ακτινοβολία”, *Πανεπιστημιακό σύγγραμμα*, Εκδόσεις Συμμετρία, 2009

Μητροπούλου Π., “Επιδράσεις των Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον”, *Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2010

Μουσάς, Ξ. και Πρέκα-Παπαδήμα, Π.: “Φυσική Διαστήματος”, *Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2003

Πρέκα-Παπαδήμα Π., Δανέζης Μ., Θεοδοσίου Σ., Καργιολάκη Δ., “ Στα μονοπάτια του Ήλιου”, *Πανεπιστημιακό σύγγραμμα*, 2009

Arnold Hanslmeier: “ The Sun and Space Weather”, 2007

Daglis A. Ioannis and Volker Bothmer, “SPACE WEATHER, Physics and Effects”, 2007

Daglis A. Ioannis: “Effects of Space Weather on Technology Infrastructure”, 2004, Chapter 14

Kivelson G. Margaret, Russell T. Christopher: “INTRODUCTION TO SPACE PHYSICS”, 1995

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Akasofu, S. I. and S. Chapman : “Solar-Terrestrial Physics”, *Oxford at the Clarendon Press*, 1972

Alexakis, P., E. Paouris, M. Gerontidou, H. Mavromichalaki : “Geomagnetic storms of the solar cycle 24”, *The 13th Hellenic Astronomical Conference*, 2017, http://www.helas.gr/conf/2017/posters/S_1/palexakis.pdf

Alexakis, P., E. Paouris, M. Gerontidou, H. Mavromichalaki : “Geomagnetic storms of the solar cycle 24”, *The 13th Hellenic Astronomical Conference*, 2017

Axford I. and Hines C. O. : “Paper on magnetospheric convection”, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1961

Balveer S. Rathmore et. al. : "Statistical Study of Geomagnetic Storms and their Classification during Solar Cycle-23", *International Journal of Physics and Applications*, 3, Number 1, p.91-96, 2011

Balveer S. Rathmore et. al. : "Sunspots and Geomagnetic Storms during the Year 1996-2010", *International Journal of Applied Physics*, 1, 53-58, 2011

Balveer S. Rathmore et. al. : "Statistical Study of Geomagnetic Storms during Year 1996-2007", *Advanced Materials Research*, 433-440, 268-271, 2012

Belehaki, A., Mavromichalaki, H., Rafios, X. and Tsagouri, I. : "Hale-cycle effects in cosmic-ray intensity during the last four cycles", *Astrophys. Space Sci.* 246, 7, 1997

Dessler A. J., Parker E. N. : "Hydromagnetic theory of geomagnetic storms", *Journal of Geophysical Research*, 64, Issue 12, 1959

Chapman, S. and Ferraro V.c.A. : "A new theory of magnetic storms", *Terr. Magn*, 36, 77, 1931

Cliver E. W., Crooker N. U. : "A SEASONAL DEPENDENCE FOR THE GEOEFFECTIVENESS OF ERUPTIVE SOLAR EVENTS", *Solar Physics*, 145, 347-357, 1993

Davis, T. N. and M. Sugiura : "Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations", *J. Geophys. Res.*, 71, 785, 1966

Dungey, J. W. : "Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones", *Phys. Rev. Let.*, 6, 47-49, 1961

Frohlich C. : "Solar Irradiance Variability Since 1978", *Space Science Reviews*, 125, 53-65, 2006

Jiang J., Cameron R. H., Schussler M. : "The cause of the weak solar cycle 24", Cornell University Library, Solar and Stellar Astrophysics, arXiv:1507.01764, 2015

J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb, N. Gopalswamy, E. Huttunen, J. C. Kasper, N. V. Nitta, W. Poomvises, B. J. Thompson, C.-C. Wu, S. Yashiro, A. N. Zhukov : "Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996-2005", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Space Physics, 112, Issue A10, 2007

Gazis P. R. : "Long-term enhancements in solar wind speed", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 101, Issue A1, 415-424, 1996

Gerontidou, M., H. Mavromichalaki, A. Belov, V. Kurt : "Solar proton enhancements and coronal mass ejections during the last solar cycle" *Adv. Space Res.*, 43, 687-693, 2009

Gopalswamy, N. : "A global picture of CMEs in the inner heliosphere", in *The Sun and the Heliosphere as an Integrated System, Astrophys. And Space Sci. Library*, 317, 201-251, 2004

Loewe, C. A. and G. W. Prolss : "Classification and mean behavior of magnetic storms", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 102, NO. A7, PAGES 14,209-14,213, JULY 1, 1997

Manuel, J. R. and J. C. Samson : "The spatial development of the low-latitude boundary layer", *J. Geophys. Res.*, 98, 17, 367, 1993

Mavromichalaki, H., C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, S. Tatsis, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke and A. Pchelkin : "Athens Neutron Monitor and its aspects in the cosmic-ray variations", *Proc. 27th ICRC (Hamburg) 10, 4099*, 2001

Mavromichalaki, H., G. Souvatzoglou, C. Sarlanis, G. Mariatos, M. Gerontidou, A. Papaioannou, C. Plainaki, S. Tatsis, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke : "The new Athens Center on data processing from the Neutron Monitor Network in real time", *Annales Geophysicae*, 23, 3103-3110, 2005

Mavromichalaki, H., M. Gerontidou, G. Mariatos, M. Papailiou, A. Papaioannou, C. Plainaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou : "Athens Neutron Monitor Data Processing Center-ANMODAP Center", *Adv. Space. Res.*, 44, 1237-1246, 2009

Mavromichalaki, H., A. Papaioannou, C. Plainaki, C. Sarlanis, G. Souvatzoglou, M. Gerontidou, M. Papailiou, E. Eroshenko, A. Belov, V. Yanke, E. O. Flückiger, R. Bütikofer, M. Parisi, M. Storini, K – L. Klein, N. Fuller, C. T. Steigies, O. M. Rother, B. Heber, R. F. Wimmer – Schweingruber, K. Kudela, I. Strharsky, R. Langer, I. Usoskin, A. Ibragimov, A. Chilingaryan, G. Hovsepyan, A. Reymers, A. Yeghikyan, O. Kryakunova, E. Dryn, N. Nikolayevskiy, L. Dorman, L. Pustil'nik : "Applications and usage of the Real – time Neutron Monitor database" *Adv. Space Res.*, 47, 2210-2222, 2011

Menvielle, M., and Berthelier, A. : "The K-derived planetary indices: Description and availability", *Revs. of Geophys.*, 29(3), 415-432, 1991

Miura, A. : "Anomalous transport by magnetohydrodynamic Kelvin-Helmholtz instabilities in the solar wind – magnetosphere interaction", *J. Geophys. Res.*, 89, 801, 1984

Moraal, H., Belov, A., and Clem, J.M. : "Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor networks", *Space Sci. Rev.*, 93, p. 283-303, 2000

Paouris, E., Gerontidou, M., H. Mavromichalaki, A. Tezari, P. Alexakis, : "The geomagnetic storms of the year 2015 : Statistical analysis and forecasting", *EGU General Assembly 2016*

Russell, Randy. : "Earth's Magnetic Poles.", *Windows to the Universe*, University Corporation for Atmospheric Research, 22 Aug. 2007

Russell, C. T. : "The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial", *Plasma Sci., IEEE Trans.*, 28, Issue 6, p. 1818-1830, 2000

Russell, C.T., and McPherron, R.L. : "Semiannual variation of geomagnetic Activity", *J. Geophys. Res.*, 78(1), 92-108, 1973

Schwenn, R., Marsch, E. : "Physics of the Inner Heliosphere I. Large-Scale Phenomena", *Physics of the Inner Heliosphere I. Large-Scale Phenomena*, XI, 282 pp. 103 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Also *Physics and Chemistry in Space*, 20, 1, 1990

Shinichi Watari : "Geomagnetic storms of cycle 24 and their solar resources", *Earth, Planets and Space*, 2017

Srivastava, N., Schwenn, R. : "The origin of the solar wind: an overview", in *The Outer Heliosphere: Beyond the Planets, Based on the spring school Die äußere Heliosphäre- Jenseits der Planeten*, in Bad Honnef, Germany, 12 – 16 April 1999, p. 12–40, Copernicus, Katlenburg-Lindau, 2000

Svalgaard L., Cliver E. W., Ling A. G. : "The semiannual variation of great geomagnetic storms", *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 29, 16, 2002

Svalgaard Leif, Cliver W. Edward, Kamide Yohsuke : "Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years?", *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 32, 2005

Tanskanen E. I., Hynonen R., Mursula K. : "Seasonal Variations of High-Latitued Geomagnetic Activity in Individual Years", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 122, Issue 10, 2017

Vassiliadis, D., Kimas, A.J., Baker, D.N., and Roberts, D.A. : "A description of solar wind-magnetosphere coupling based on nonlinear filters", *J. Geophys. Res.*, 100 (A3), 3495, 1995

Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S., Michalek G., Howard R. A. : "Visibility of coronal mass ejections as a function of flares location and intensity", *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 110, 2005

ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<http://cosray.phys.uoa.gr>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP

<http://www.nmdb.eu>

<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/index.html>

<http://www.swpc.noaa.gov/SWN/>

<https://www.spaceweatherlive.com/>

<http://www.solen.info/solar/>

<http://www.bc.edu/content/bc/research/isr/spaceweatherforecasting.html>

http://ccmc.gsfc.nasa.gov/RoR_WWW/pbmod-rt/pbmod_realtime.php

<http://sidc.be/cactus/>

http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/>

http://ccmc.gsfc.nasa.gov/RoR_WWW/pbmod-rt/pbmod_realtime.php

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>

<http://keelynet.com/spider/magfield.htm>

http://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/kp_ap.html

<http://space.rice.edu/ISTP/wind.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα δίνονται οι πίνακες με τις γεωμαγνητικές καταιγίδες που μετρήθηκαν και με τους δύο γεωμαγνητικούς δείκτες, μαζί με την ημερομηνία εμφάνισής τους και τον τύπο τους :

α) Καταιγίδες που μετρήθηκαν με βάση τον δείκτη K_p

DATE	G1	G2	G3	G4	G5
13/1/1996		1			
14/1/1996		1			
20/1/1996	1				
29/1/1996	1				
11/2/1996	1				
13/2/1996	1				
23/2/1996		1			
11/3/1996		1			
13/3/1996	1				
12/4/1996	1				
14/4/1996	1	1			
15/4/1996	1				
16/4/1996	1				
17/4/1996		1			
18/4/1996			1		
19/4/1996			1		
20/4/1996	1				
23/4/1996	1				
29/8/1996		1			
30/8/1996	1				
10/9/1996	1				
16/9/1996	1				
18/9/1996	1				
20/9/1996	1				
21/9/1996	1				
22/9/1996	1				
23/9/1996	1				

26/9/1996	1										
28/9/1996	1										
9/10/1996	1										
13/10/1996	1										
18/10/1996	1										
19/10/1996	2										
20/10/1996	1										
22/10/1996	1										
23/10/1996			1			1996	G1	G2	G3	G4	G5
14/12/1996	1						29	7	3	-	-
10/1/1997		1									
12/1/1997	1										
28/1/1997	1										
8/2/1997		1									
9/2/1997	1										
11/2/1997	1										
17/2/1997	1										
27/2/1997		1									
11/4/1997			1								
16/4/1997	1										
21/4/1997	1										
24/4/1997	1										
1/5/1997	1										
15/5/1997			1								
27/5/1997		1									
9/6/1997		1									
27/6/1997	1										
31/7/1997	1										
3/8/1997	1										
14/8/1997	1										
28/8/1997	1										
29/8/1997	1										
3/9/1997	1										
9/9/1997	1										
18/9/1997	1										
28/9/1997	1										

1/10/1997		1								
9/10/1997	1									
10/10/1997	1	1								
24/10/1997		1								
25/10/1997	1									
7/11/1997			1							
22/11/1997			1							
23/11/1997			1							
30/12/1997		1								
7/1/1998		1								
30/1/1998	1									
17/2/1998	1									
11/3/1998		1								
15/3/1998	1									
21/3/1998		1								
24/4/1998		1								
25/4/1998	1									
26/4/1998	1									
27/4/1998	1									
2/5/1998			1							
3/5/1998			1							
4/5/1998									1	
5/5/1998		1								
24/5/1998	1									
29/5/1998		1								
30/5/1998	1									
7/6/1998	1									
14/6/1998	1									
26/6/1998			1							
16/7/1998		1								
23/7/1998		1								
24/7/1998	1									
31/7/1998		1								
6/8/1998				1						
7/8/1998		1								
22/8/1998		1								

1997 G1 G2 G3 G4 G5

22 9 5 - -

23/8/1998	1										
26/8/1998		1									
27/8/1998					1						
31/8/1998	1										
18/9/1998		1									
24/9/1998	1										
25/9/1998										1	
1/10/1998	1										
7/10/1998	1										
19/10/1998		1									
21/10/1998	1										
6/11/1998	1										
7/11/1998	1										
8/11/1998					1						
9/11/1998				1							
13/11/1998		1									
14/11/1998		1									
						1998	G1	G2	G3	G4	G5
11/12/1998	1						21	15	3	3	2
13/1/1999		1									
14/1/1999	1										
15/1/1999	1										
17/2/1999	1										
18/2/1999				1							
28/2/1999	1										
1/3/1999	1										
4/3/1999	1										
5/3/1999	1										
7/3/1999		1									
9/3/1999	1										
10/3/1999		1									
29/3/1999	2										
1/4/1999	1										
17/4/1999				1							
30/4/1999	1										
13/5/1999	2										
18/5/1999	1										

25/5/1999	1				
27/6/1999	1				
28/6/1999		1			
2/7/1999	2				
22/7/1999	1				
30/7/1999		1			
16/8/1999	1				
17/8/1999	1				
18/8/1999	1				
19/8/1999	1				
20/8/1999	1				
23/8/1999		1			
24/8/1999	1				
30/8/1999	1				
1/9/1999	1				
3/9/1999	1				
12/9/1999		1			
13/9/1999	1				
14/9/1999	1				
15/9/1999			1		
16/9/1999		1			
22/9/1999			1		
26/9/1999	1				
27/9/1999	1				
29/9/1999	1				
30/9/1999		1			
10/10/1999	1				
12/10/1999		1			
13/10/1999	1				
14/10/1999	1				
15/10/1999	1				
17/10/1999	1				
22/10/1999				1	
23/10/1999	1				
24/10/1999	1				
28/10/1999	1				

7/11/1999	1										
8/11/1999		1									
9/11/1999	1										
11/11/1999	1										
13/11/1999	1										
24/11/1999	1										
25/11/1999		1									
4/12/1999		1									
13/12/1999											
31/12/1999	1										
6/1/2000	1										
11/1/2000	1										
22/1/2000	1										
28/1/2000	1										
29/1/2000	1										
6/2/2000	1										
7/2/2000	1										
12/2/2000			1								
14/2/2000		1									
24/2/2000	1										
12/3/2000	1										
4/4/2000	1										
6/4/2000				1							
16/4/2000	1										
17/4/2000	1										
24/4/2000	1										
12/5/2000	1										
17/5/2000	1										
24/5/2000			1								
26/5/2000	1										
29/5/2000	1										
5/6/2000	1										
8/6/2000			1								
10/6/2000	1										
11/6/2000		1									
14/6/2000	1										

1999 G1 G2 G3 G4 G5

49 13 4 1 -

23/6/2000	1				
26/6/2000		1			
11/7/2000	1				
13/7/2000			1		
14/7/2000		1			
15/7/2000					1
20/7/2000		1			
22/7/2000	1				
23/7/2000	1				
28/7/2000	1				
29/7/2000		1			
31/7/2000	1				
5/8/2000	1				
10/8/2000	1				
11/8/2000			1		
12/8/2000				1	
28/8/2000	1				
2/9/2000	1				
4/9/2000	1				
8/9/2000	1				
12/9/2000	1				
16/9/2000	1				
17/9/2000			1		
19/9/2000		1			
30/9/2000		1			
3/10/2000		1			
4/10/2000		1			
5/10/2000			1		
13/10/2000		1			
14/10/2000		1			
28/10/2000	2				
30/10/2000	1				
4/11/2000	1				
6/11/2000		1			
10/11/2000		1			
12/11/2000	1				

27/11/2000		1									
28/11/2000		1									
29/11/2000			1			2000	G1	G2	G3	G4	G5
23/12/2000	1						43	16	8	2	1
21/1/2001	1										
24/1/2001	1										
31/1/2001	1										
5/3/2001	1										
20/3/2001			1								
27/3/2001	1										
28/3/2001		1									
29/3/2001	1										
31/3/2001											1
4/4/2001	1										
5/4/2001	1										
8/4/2001		1									
9/4/2001	1										
11/4/2001					1						
13/4/2001			1								
18/4/2001			1								
22/4/2001	1										
23/4/2001	1										
28/4/2001	1										
7/5/2001	1										
9/5/2001	1										
10/5/2001	1										
12/5/2001		1									
13/5/2001	1										
2/6/2001	1										
9/6/2001	1										
18/6/2001		1									
25/7/2001	1										
5/8/2001	1										
6/8/2001	1										
13/8/2001	1										
17/8/2001		1									

13/9/2001	1										
23/9/2001	1										
25/9/2001		1									
29/9/2001	1										
1/10/2001	1	1									
2/10/2001	1										
3/10/2001			1								
4/10/2001	1										
12/10/2001		1									
21/10/2001			1								
22/10/2001			1								
28/10/2001		1									
1/11/2001	1										
6/11/2001				1							
24/11/2001										1	
12/12/2001	1										
24/12/2001	1										
10/1/2002	1										
2/2/2002	1										
28/2/2002	1										
19/3/2002	1										
24/3/2002		1									
17/4/2002		1									
18/4/2002			1								
19/4/2002		1									
20/4/2002			1								
23/4/2002		1									
11/5/2002		1									
12/5/2002	1										
14/5/2002		1									
18/5/2002	1										
19/5/2002	1										
23/5/2002			1								
27/5/2002	1										
12/7/2002	1										
22/7/2002	1										
						2001	G1	G2	G3	G4	G5
							31	9	6	2	2

1/8/2002	1				
2/8/2002	1	1			
4/8/2002	1				
10/8/2002	1				
15/8/2002	1				
16/8/2002	1				
18/8/2002	1				
19/8/2002	1				
21/8/2002			1		
26/8/2002	1				
4/9/2002		1			
7/9/2002			1		
10/9/2002	1				
11/9/2002		1			
30/9/2002		1			
1/10/2002			1		
2/10/2002			1		
3/10/2002		1			
4/10/2002			1		
5/10/2002	1				
6/10/2002	1				
7/10/2002		1			
8/10/2002		1			
9/10/2002	1				
10/10/2002	1				
14/10/2002		1			
16/10/2002	1				
24/10/2002		1			
25/10/2002		2			
26/10/2002	1				
30/10/2002	1				
2/11/2002	1				
10/11/2002	1				
21/11/2002			1		
22/11/2002	1				
23/11/2002	1				

26/11/2002	1					2002	G1	G2	G3	G4	G5						
19/12/2002	1																
21/12/2002	1																
23/12/2002	1																
27/12/2002		1											35	18	9	-	-
20/1/2003	1																
22/1/2003	1																
25/1/2003	1																
30/1/2003	2																
31/1/2003	1																
2/2/2003		1															
4/2/2003	1																
4/3/2003	1																
6/3/2003	1																
14/3/2003		1															
15/3/2003	1																
16/3/2003	1																
17/3/2003		1															
18/3/2003	1																
20/3/2003	1																
21/3/2003	1																
23/3/2003		1															
27/3/2003	1																
28/3/2003	1																
30/3/2003	2																
31/3/2003		1															
4/4/2003	1																
5/4/2003	1																
8/4/2003	1																
9/4/2003	1																
10/4/2003	1																
14/4/2003	1																
15/4/2003	1																
16/4/2003		1															
17/4/2003	1																
18/4/2003	1																

21/4/2003	1				
23/4/2003	1				
24/4/2003	1				
25/4/2003	2				
28/4/2003	1				
30/4/2003		1			
1/5/2003		1			
2/5/2003	1				
6/5/2003	1				
7/5/2003		1			
8/5/2003	1				
9/5/2003	1				
10/5/2003		1			
11/5/2003		1			
13/5/2003	1				
14/5/2003	1				
21/5/2003	1				
23/5/2003	1				
24/5/2003	1				
25/5/2003	1				
28/5/2003		1			
29/5/2003	1			1	
30/5/2003	1				
2/6/2003		1			
3/6/2003	1				
7/6/2003	1				
9/6/2003		1			
10/6/2003		1			
14/6/2003	1				
16/6/2003	1	1			
18/6/2003			1		
19/6/2003	1				
21/6/2003	1				
23/6/2003	1				
24/6/2003	1				
27/6/2003		1			

28/6/2003		1			
29/6/2003	1				
30/6/2003	1				
4/7/2003	1				
11/7/2003		1			
12/7/2003			1		
15/7/2003	1				
16/7/2003		1			
19/7/2003	1				
26/7/2003	1				
28/7/2003	1				
29/7/2003	1				
31/7/2003	1				
1/8/2003	1				
6/8/2003			1		
7/8/2003	1				
12/8/2003	1				
13/8/2003	1				
18/8/2003				1	
21/8/2003			1		
22/8/2003		1			
23/8/2003			1		
24/8/2003	1				
25/8/2003	1				
30/8/2003	1				
11/9/2003	1				
16/9/2003		1			
17/9/2003			1		
18/9/2003	1	1			
19/9/2003	1				
20/9/2003	1				
21/9/2003	1				
24/9/2003	1				
25/9/2003	1				
3/10/2003	1				
14/10/2003		1			

15/10/2003			1									
16/10/2003	1											
17/10/2003	1											
18/10/2003	1											
19/10/2003	1											
20/10/2003	2											
22/10/2003		1										
24/10/2003			1									
29/10/2003										2		
30/10/2003										1		
1/11/2003	1											
4/11/2003			1									
6/11/2003	1											
9/11/2003		1										
10/11/2003	1											
11/11/2003		1										
12/11/2003	1											
13/11/2003		1										
15/11/2003		1										
16/11/2003	1											
17/11/2003	1											
20/11/2003										1		
22/11/2003	1											
23/11/2003	1											
5/12/2003		1										
8/12/2003		1										
9/12/2003	1											
10/12/2003		1										
11/12/2003		1										
12/12/2003	1											
13/12/2003	1											
14/12/2003	1											
15/12/2003	1											
31/12/2003	1						2003	G1	G2	G3	G4	G5
								97	33	9	2	4
1/1/2004	1											
3/1/2004	1											

6/1/2004	1				
7/1/2004	1				
9/1/2004	1				
10/1/2004	1				
16/1/2004	1				
22/1/2004			1		
23/1/2004	1				
25/1/2004	1				
28/1/2004	1				
30/1/2004	1				
31/1/2004	1				
2/2/2004	1				
6/2/2004	1				
11/2/2004	1				
12/2/2004	1				
15/2/2004	1				
28/2/2004	1				
29/2/2004	1				
3/3/2004	1				
10/3/2004		1			
11/3/2004	1				
28/3/2004	1				
3/4/2004	1				
5/4/2004	1				
9/4/2004	1				
23/4/2004	1				
20/5/2004	1				
15/6/2004	1				
17/7/2004		1			
22/7/2004		1			
24/7/2004	1				
25/7/2004				1	
27/7/2004					1
7/8/2004	1				
30/8/2004	1				
31/8/2004		1			

14/9/2004	1											
17/9/2004	1											
18/9/2004	1											
22/9/2004	1											
13/10/2004	1											
14/10/2004	1											
8/11/2004										1		
9/11/2004					1							
10/11/2004										1		
12/11/2004	1											
21/11/2004	1											
25/11/2004	1											
28/11/2004	1											
1/12/2004	1											
7/12/2004	1											
12/12/2004	1											
21/12/2004	1											
22/12/2004	1						2004	G1	G2	G3	G4	G5
								46	4	1	2	3
2/1/2005	1											
3/1/2005	1											
5/1/2005	1											
7/1/2005				1								
12/1/2005	1											
15/1/2005			1									
17/1/2005				1								
18/1/2005				1								
19/1/2005				1								
21/1/2005						1						
31/1/2005	1											
8/2/2005			1									
9/2/2005	1											
18/2/2005	1											
6/3/2005	1											
7/3/2005	1		1									
14/3/2005	1											
19/3/2005	1											

25/3/2005	1				
5/4/2005			1		
12/4/2005		1			
13/4/2005	1				
14/4/2005	1				
20/4/2005	1				
30/4/2005	1				
1/5/2005		1			
8/5/2005			1		
13/5/2005	1				
15/5/2005					1
16/5/2005	1	1			
20/5/2005		1			
30/5/2005			1		
4/6/2005	1				
5/6/2005	1				
7/6/2005	1				
12/6/2005		1			
15/6/2005	1				
16/6/2005		1			
23/6/2005			1		
24/6/2005	1				
10/7/2005		1			
12/7/2005		1			
13/7/2005	1				
17/7/2005	1				
18/7/2005		1			
21/7/2005	1				
27/7/2005	1				
6/8/2005	1				
7/8/2005	1				
10/8/2005	1				
24/8/2005					1
25/8/2005	1				
31/8/2005		1			
2/9/2005	1				

3/9/2005		1									
4/9/2005	1										
10/9/2005	1										
11/9/2005										1	
12/9/2005		1									
14/9/2005	1										
15/9/2005			1								
3/11/2005	1										
11/12/2005	1										
27/12/2005	1										
26/1/2006		1									
20/2/2006		1									
19/3/2006		1									
20/3/2006	1										
5/4/2006	1										
9/4/2006	1	1									
14/4/2006			1								
15/4/2006	2										
28/4/2006	1										
4/5/2006	1										
6/5/2006	1										
7/5/2006	1										
18/5/2006	1										
6/6/2006	1										
8/6/2006	1										
15/6/2006	1										
5/7/2006	1										
28/7/2006		1									
7/8/2006		1									
19/8/2006		1									
27/8/2006	1										
4/9/2006		1									
18/9/2006	2										
24/9/2006	1										
1/10/2006	1										
13/10/2006	1										

2005 G1 G2 G3 G4 G5

38 15 9 1 3

22/10/2006	1										
10/11/2006		1									
16/11/2006	1										
23/11/2006	1										
24/11/2006	1										
30/11/2006	1										
6/12/2006	1										
8/12/2006	1										
11/12/2006	1										
12/12/2006	1										
15/12/2006				1		2006	G1	G2	G3	G4	G5
20/12/2006	1						30	9	1	1	-
2/1/2007	1										
15/1/2007		1									
16/1/2007	1										
17/1/2007	1										
29/1/2007			1								
13/2/2007	1										
28/2/2007	1										
6/3/2007	1										
13/3/2007	1										
24/3/2007	1										
1/4/2007	1										
2/4/2007	1										
23/4/2007	1										
28/4/2007	1										
29/4/2007	1										
30/4/2007	1										
7/5/2007	1										
23/5/2007		1									
29/6/2007	1										
11/7/2007	1										
14/7/2007		1									
21/7/2007	1										
7/8/2007		1									
2/9/2007	1										

27/9/2007		1									
28/9/2007	1										
19/10/2007	1										
25/10/2007		1									
29/10/2007	1					2007	G1	G2	G3	G4	G5
20/11/2007		1					23	7	1	-	-
1/2/2008	1										
10/2/2008	1										
14/2/2008	1										
27/2/2008	1										
29/2/2008	1										
9/3/2008	1										
27/3/2008	1	1									
4/4/2008	1										
5/4/2008		1									
6/4/2008	1										
23/4/2008	1										
30/4/2008	1										
14/6/2008	1										
12/7/2008	1										
9/8/2008	1										
18/8/2008	1										
4/9/2008		1									
4/10/2008	1					2008	G1	G2	G3	G4	G5
11/10/2008			1				16	3	1	-	-
13/3/2009	1										
24/6/2009	1										
22/7/2009		1				2009	G1	G2	G3	G4	G5
30/8/2009		1					2	2	0	-	-
20/1/2010	1										
5/4/2010			1								
6/4/2010		1									
12/4/2010		1									
14/4/2010	1										
23/4/2010	1										
2/5/2010		1									

29/5/2010	1										
30/5/2010	1										
4/6/2010	1										
30/6/2010	1										
14/7/2010	1										
3/8/2010		1									
25/8/2010	1										
11/10/2010	1										
23/10/2010	1										
27/11/2010		1									
28/12/2010	1										
6/1/2011	1										
4/2/2011		1									
18/2/2011	1										
1/3/2011		1									
10/3/2011	1										
11/3/2011		1									
6/4/2011		1									
12/4/2011	1										
20/4/2011	1										
30/4/2011	1										
2/5/2011	1										
28/5/2011		1									
29/5/2011		1									
4/6/2011		1									
8/6/2011	1										
5/7/2011	1										
19/7/2011	1										
30/7/2011	1										
5/8/2011					1						
9/9/2011			1								
10/9/2011	1										
12/9/2011	1										
17/9/2011		1									
26/9/2011					1						
28/9/2011	1										

2010	G1	G2	G3	G4	G5
	12	5	1	0	-

5/10/2011	1										
24/10/2011			1			2011	G1	G2	G3	G4	G5
1/11/2011	1						15	8	2	2	-
22/1/2012	1										
24/1/2012	1										
15/2/2012	1										
19/2/2012	1										
27/2/2012	1										
7/3/2012		1									
8/3/2012	1										
9/3/2012			1								
10/3/2012	1										
12/3/2012		1									
15/3/2012		1									
13/4/2012	1										
24/4/2012	1	1									
26/4/2012	1										
23/5/2012	1										
3/6/2012	1										
11/6/2012	1										
16/6/2012		1									
17/6/2012		1									
6/7/2012	1										
9/7/2012	2										
15/7/2012		1									
2/8/2012	1										
3/9/2012		1									
5/9/2012		1									
1/10/2012			1								
8/10/2012		1									
9/10/2012	1	1									
13/10/2012	1					2012	G1	G2	G3	G4	G5
14/11/2012		1					19	12	2	-	-
1/3/2013	1										
17/3/2013		1									
29/3/2013	1										

26/4/2013	1										
18/5/2013	1										
24/5/2013	1										
25/5/2013	1										
1/6/2013		1									
2/6/2013	1										
7/6/2013		1									
29/6/2013			1								
10/7/2013	1										
11/7/2013	1										
15/7/2013	1										
4/8/2013	1										
16/8/2013	1										
27/8/2013	1										
2/10/2013	1	1									
8/10/2013	1										
8/12/2013		1				2013	G1	G2	G3	G4	G5
2/1/2014	1						15	5	1	-	-
8/2/2014	1										
15/2/2014	1										
19/2/2014		1									
20/2/2014		1									
27/2/2014		1									
13/3/2014	1										
12/4/2014	1										
20/4/2014	1										
23/5/2014	1										
8/6/2014		1									
18/6/2014	1										
19/8/2014		1									
28/8/2014	1										
29/8/2014	1										
12/9/2014	1		1								
19/9/2014	1										
14/10/2014	1										
20/10/2014	1										

10/11/2014	1										
11/11/2014	1										
7/12/2014	2										
12/12/2014	1										
22/12/2014	1					2014	G1	G2	G3	G4	G5
29/12/2014	1						21	5	1	-	-
3/1/2015	1										
4/1/2015	1										
7/1/2015			1								
1/2/2015	1										
17/2/2015	1										
24/2/2015	1										
1/3/2015	1										
2/3/2015	1										
17/3/2015				1							
18/3/2015		1									
19/3/2015	1										
20/3/2015	2										
22/3/2015		1									
23/3/2015	1										
10/4/2015		1									
15/4/2015	1										
16/4/2015		1									
6/5/2015	1										
13/5/2015		1									
19/5/2015		1									
8/6/2015		1									
14/6/2015	1										
22/6/2015				1							
25/6/2015		1									
5/7/2015		1									
10/7/2015	1										
13/7/2015	1										
23/7/2015	1										
7/8/2015	1										
15/8/2015		1									

16/8/2015		1									
17/8/2015	1										
23/8/2015		1									
27/8/2015		2									
28/8/2015		1									
4/9/2015	1										
7/9/2015		1									
9/9/2015		1									
11/9/2015			1								
14/9/2015	1										
19/9/2015	1										
20/9/2015			1								
4/10/2015	1										
5/10/2015	1										
7/10/2015			1								
12/10/2015	1										
14/10/2015	1										
18/10/2015	1										
3/11/2015	1										
7/11/2015		1									
10/11/2015		1									
11/11/2015	2										
18/11/2015	1										
30/11/2015	1										
6/12/2015	1										
10/12/2015	1										
14/12/2015	1										
20/12/2015		1									
26/12/2015	1										
31/12/2015		1				2015	G1	G2	G3	G4	G5
							36	21	4	2	-
6/1/2016	1										
21/1/2016		1									
3/2/2016	1										
8/2/2016	1										
16/2/2016		1									
17/2/2016		1									

18/2/2016	1				
6/3/2016			1		
11/3/2016		1			
14/3/2016	1				
15/3/2016	1				
16/3/2016	1				
2/4/2016		1			
7/4/2016	1				
12/4/2016	1				
14/4/2016	1				
23/4/2016	1				
2/5/2016	1	1			
6/5/2016	1				
8/5/2016			1		
21/5/2016	1				
6/6/2016		1			
14/6/2016		1			
22/6/2016	1				
7/7/2016	1				
8/7/2016	1				
12/7/2016	1				
19/7/2016	1				
24/7/2016	1				
2/8/2016	1				
23/8/2016	1				
1/9/2016	1	1			
3/9/2016	1	1			
4/9/2016	1				
5/9/2016	1				
20/9/2016	1				
25/9/2016	2				
27/9/2016		1			
28/9/2016		1			
30/9/2016	1				
2/10/2016	1				
4/10/2016	1				

13/10/2016		1									
16/10/2016	1										
25/10/2016			1								
26/10/2016		1									
27/10/2016	1										
29/10/2016	1										
11/11/2016	1										
24/11/2016	1										
25/11/2016		1									
9/12/2016	1										
21/12/2016		1				2016	G1	G2	G3	G4	G5
26/12/2016	1						39	16	3	-	-
31/1/2017	1										
1/2/2017	1										
24/2/2017	1										
1/3/2017		1									
3/3/2017	1										
4/3/2017	1										
6/3/2017	1										
21/3/2017	1										
22/3/2017	1										
27/3/2017		1									
30/3/2017	2										
4/4/2017	1										
9/4/2017	1										
19/4/2017	1										
20/4/2017		1									
22/4/2017		1									
23/4/2017		1									
28/5/2017			1								
11/6/2017	1										
16/6/2017	1										
2/7/2017	1										
9/7/2017	1										
16/7/2017		1									
17/7/2017		1									

22/7/2017	1										
17/8/2017	1										
18/8/2017	1										
20/8/2017	1										
22/8/2017		1									
23/8/2017	1										
31/8/2017	1										
2/9/2017	1										
4/9/2017	1										
7/9/2017										1	
8/9/2017										1	
12/9/2017	1										
14/9/2017		1									
16/9/2017		1									
18/9/2017	1										
27/9/2017	1										
28/9/2017	1		1								
11/10/2017	1										
12/10/2017	1										
13/10/2017		1									
15/10/2017	1										
24/10/2017	1										
25/10/2017	1										
7/11/2017		1									
21/11/2017	1										
5/12/2017	1										
17/12/2017	2										
						2017	G1	G2	G3	G4	G5
							38	12	2	-	2

β) Καταιγίδες που μετρήθηκαν με βάση τον δείκτη Dst

Date	Moder.	Strong	Severe	Great					
13/1/1996	1								
11/3/1996	1								
20/3/1996	1								
21/3/1996	1								
24/3/1996	1								
25/3/1996	1								
15/4/1996	1								
17/4/1996	1								
23/9/1996	1								
26/9/1996	1								
19/10/1996	1								
20/10/1996	1				1996	Moder.	Strong	Severe	Great
23/10/1996		1				12	1	-	-
10/1/1997	1								
9/2/1997	1								
11/2/1997	1								
17/2/1997	1								
27/2/1997	1								
11/4/1997	1								
16/4/1997	1								
21/4/1997		1							
1/5/1997									
15/5/1997		1							
27/5/1997									
9/6/1997									
3/9/1997									
18/9/1997									
1/10/1997									
9/10/1997									
10/10/1997	1	1							
24/10/1997									
25/10/1997									
7/11/1997		1							
22/11/1997									
23/11/1997		1			1997	Moder.	Strong	Severe	Great
30/12/1997	1					9	5	-	-
7/1/1998	1								
30/1/1998	1								

18/2/1998		1		
10/3/1998		1		
15/3/1998	1			
21/3/1998	1			
24/4/1998	1			
26/4/1998	1			
2/5/1998	1			
3/5/1998	1			
4/5/1998			1	
5/5/1998		1		
14/6/1998	1			
26/6/1998		1		
16/7/1998	1			
6/8/1998		1		
7/8/1998		1		
26/8/1998	1			
27/8/1998		1		
31/8/1998	1			
18/9/1998	1			
24/9/1998	1			
25/9/1998			1	
1/10/1998	1			
7/10/1998	1			
19/10/1998		1		
21/10/1998	1			
6/11/1998	1			
7/11/1998	1			
8/11/1998		1		
9/11/1998		1		
13/11/1998		1		
14/11/1998		1		
11/12/1998	1			
13/1/1999		1		
14/1/1999	1			
15/1/1999	1			
18/2/1999		1		
28/2/1999	1			
1/3/1999	1			
5/3/1999	1			
7/3/1999	1			
10/3/1999	1			

1998	Moder.	Strong	Severe	Great
	20	12	2	-

29/3/1999	1			
17/4/1999	1			
30/7/1999	1			
20/8/1999	1			
23/8/1999	1			
24/8/1999	1			
12/9/1999	1			
13/9/1999	1			
14/9/1999	1			
15/9/1999	1			
16/9/1999	1			
22/9/1999		1		
27/9/1999	1			
30/9/1999	1			
10/10/1999	1			
12/10/1999	1			
13/10/1999	1			
15/10/1999	1			
17/10/1999	1			
22/10/1999			1	
23/10/1999	1			
24/10/1999	1			
28/10/1999	1			
7/11/1999	1			
8/11/1999	1			
9/11/1999	1			
11/11/1999	1			
13/11/1999		1		
24/11/1999	1			
13/12/1999	1			
31/12/1999	1			
11/1/2000	1			
22/1/2000	1			
12/2/2000		1		
14/2/2000	1			
4/4/2000	1			
7/4/2000			1	
16/4/2000	1			
24/4/2000	1			
17/5/2000	1			
24/5/2000		1		

1999	Moder.	Strong	Severe	Great
	35	4	1	-

29/5/2000	1			
8/6/2000	1			
10/6/2000	1			
26/6/2000	1			
16/7/2000			1	
20/7/2000	1			
22/7/2000	1			
23/7/2000	1			
29/7/2000	1			
11/8/2000		1		
12/8/2000			1	
28/8/2000	1			
2/9/2000	1			
12/9/2000	1			
16/9/2000	1			
18/9/2000			1	
19/9/2000	1			
30/9/2000	1			
3/10/2000	1			
5/10/2000		1		
13/10/2000	1			
14/10/2000		1		
29/10/2000		1		
30/10/2000	1			
6/11/2000		1		
10/11/2000	1			
27/11/2000	1			
28/11/2000	1			
29/11/2000		1		
23/12/2000	1			
24/1/2001	1			
5/3/2001	1			
20/3/2001		1		
27/3/2001	1			
28/3/2001	1			
29/3/2001	1			
31/3/2001				1
5/4/2001	1			
8/4/2001	1			
9/4/2001	1			
11/4/2001			1	

2000	Moder.	Strong	Severe	Great
	28	9	4	

13/4/2001	1			
18/4/2001		1		
22/4/2001		1		
23/4/2001	1			
9/5/2001	1			
10/5/2001	1			
18/6/2001	1			
17/8/2001		1		
13/9/2001	1			
23/9/2001	1			
26/9/2001		1		
29/9/2001	1			
1/10/2001	1	1		
2/10/2001		1		
3/10/2001		1		
4/10/2001	1			
12/10/2001	1			
21/10/2001		1		
22/10/2001		1		
28/10/2001		1		
1/11/2001		1		
6/11/2001			1	
24/11/2001			1	
24/12/2001	1			
10/1/2002	1			
2/2/2002	1			
28/2/2002	1			
24/3/2002		1		
17/4/2002	1			
18/4/2002		1		
19/4/2002		1		
20/4/2002		1		
23/4/2002	1			
11/5/2002		1		
12/5/2002	1			
14/5/2002	1			
19/5/2002	1			
23/5/2002		1		
27/5/2002	1			
1/8/2002	1			
2/8/2002	1	1		

2001	Moder.	Strong	Severe	Great
	20	12	3	1

4/8/2002	1			
19/8/2002	1			
21/8/2002		1		
4/9/2002		1		
8/9/2002		1		
10/9/2002	1			
11/9/2002	1			
1/10/2002		1		
2/10/2002		1		
3/10/2002	1			
4/10/2002		1		
5/10/2002		1		
6/10/2002	1			
7/10/2002		1		
8/10/2002		1		
9/10/2002	1			
10/10/2002	1			
14/10/2002		1		
16/10/2002	1			
24/10/2002	1			
25/10/2002	2			
26/10/2002	1			
2/11/2002	1			
21/11/2002		1		
22/11/2002	1			
23/11/2002	1			
19/12/2002	1			
21/12/2002	1			
23/12/2002	1			
27/12/2002	1			
30/1/2003	1			
2/2/2003	1			
4/2/2003	1			
4/3/2003	1			
6/3/2003	1			
16/3/2003	1			
17/3/2003	1			
18/3/2003	1			
27/3/2003	1			
28/3/2003	1			
30/3/2003	2			

2002	Moder.	Strong	Severe	Great
	31	18	-	-

31/3/2003	1			
4/4/2003	1			
5/4/2003	1			
24/4/2003	1			
25/4/2003	2			
30/4/2003	1			
1/5/2003	1			
9/5/2003	1			
10/5/2003	1			
21/5/2003	1			
29/5/2003		1		
30/5/2003	1			
2/6/2003	1			
16/6/2003	1			
18/6/2003		1		
19/6/2003	1			
21/6/2003	1			
24/6/2003	1			
11/7/2003	1			
12/7/2003		1		
16/7/2003	1			
29/7/2003	1			
6/8/2003	1			
7/8/2003	1			
18/8/2003		1		
21/8/2003	1			
22/8/2003	1			
23/8/2003	1			
17/9/2003	1			
18/9/2003	1			
19/9/2003	1			
24/9/2003	1			
25/9/2003	1			
14/10/2003	1			
15/10/2003	1			
16/10/2003	1			
17/10/2003	1			
19/10/2003	1			
20/10/2003	1			
22/10/2003	1			
30/10/2003				2

1/11/2003	1									
4/11/2003	1									
11/11/2003	1									
13/11/2003	1									
15/11/2003	1									
20/11/2003					1					
22/11/2003	1									
23/11/2003	1									
8/12/2003	1					2003	Moder.	Strong	Severe	Great
10/12/2003	1						58	5	-	3
7/1/2004	1									
22/1/2004		1								
23/1/2004	1									
25/1/2004	1									
11/2/2004	1									
10/3/2004	1									
11/3/2004	1									
4/4/2004		1								
5/4/2004	1									
17/7/2004	1									
23/7/2004	1									
25/7/2004		1								
27/7/2004		1								
31/8/2004		1								
8/11/2004					1					
9/11/2004			1							
10/11/2004			1							
12/11/2004	1									
25/11/2004	1					2004	Moder.	Strong	Severe	Great
28/11/2004	1						12	5	2	1
2/1/2005	1									
7/1/2005	1									
12/1/2005	1									
17/1/2005	1									
18/1/2005		1								
19/1/2005	1									
21/1/2005	1									
8/2/2005	1									
18/2/2005	1									
7/3/2005	1									
5/4/2005	1									

12/4/2005	1								
8/5/2005		1							
15/5/2005			1						
20/5/2005	1								
30/5/2005		1							
13/6/2005		1							
23/6/2005	1								
24/6/2005	1								
10/7/2005	1								
12/7/2005	1								
18/7/2005	1								
24/8/2005		1							
25/8/2005	1								
31/8/2005		1							
3/9/2005	1								
4/9/2005	1								
11/9/2005		1							
12/9/2005	1								
14/9/2005	1								
15/9/2005	1				2005	Moder.	Strong	Severe	Great
11/12/2005	1					24	8	1	-
5/4/2006	1								
9/4/2006	2								
14/4/2006	1								
15/4/2006	2								
6/5/2006	1								
19/8/2006	1								
24/9/2006	1								
1/10/2006	1								
13/10/2006	1								
30/11/2006	1								
6/12/2006	1								
11/12/2006	1								
15/12/2006		1			2006	Moder.	Strong	Severe	Great
20/12/2006	1					15	1	-	-
24/3/2007	1								
1/4/2007	1								
23/5/2007	1								
25/10/2007	1				2007	Moder.	Strong	Severe	Great
20/11/2007	1					5	-	-	-
9/3/2008	1								

27/3/2008	1								
4/9/2008	1								
11/10/2008	1				2008	Moder.	Strong	Severe	Great
22/7/2009	1				2009	4	-	-	-
5/4/2010	1					1	-	-	-
6/4/2010	1								
12/4/2010	1								
2/5/2010	1								
29/5/2010	1								
30/5/2010	1								
4/6/2010	1								
3/8/2010	1				2010	Moder.	Strong	Severe	Great
11/10/2010	1					9	-	-	-
4/2/2011	1								
1/3/2011	1								
10/3/2011	1								
11/3/2011	1								
6/4/2011	1								
28/5/2011	1								
29/5/2011	1								
5/7/2011	1								
5/8/2011		1							
9/9/2011	1								
10/9/2011	1								
12/9/2011	1								
17/9/2011	1								
26/9/2011		1							
28/9/2011	1								
24/10/2011		1			2011	Moder.	Strong	Severe	Great
1/11/2011	1					14	3	-	-
22/1/2012	1								
15/2/2012	1								
19/2/2012	1								
27/2/2012	1								
7/3/2012	1								
8/3/2012	1								
9/3/2012		1							
10/3/2012	1								
12/3/2012	1								
15/3/2012	1								
13/4/2012	1								

24/4/2012	1	1							
26/4/2012	1								
11/6/2012	1								
17/6/2012	1								
9/7/2012	1								
15/7/2012		1							
3/9/2012	1								
5/9/2012	1								
1/10/2012		1							
8/10/2012	1								
9/10/2012		1							
13/10/2012	1				2012	Moder.	Strong	Severe	Great
14/11/2012		1				19	6	-	-
1/3/2013	1								
17/3/2013		1							
29/3/2013	1								
18/5/2013	1								
24/5/2013	1								
25/5/2013	1								
1/6/2013		1							
2/6/2013	1								
7/6/2013	1								
29/6/2013		1							
10/7/2013	1								
15/7/2013	1								
4/8/2013	1								
27/8/2013	1								
2/10/2013	2								
8/10/2013	1				2013	Moder.	Strong	Severe	Great
8/12/2013	1					15	3	-	-
19/2/2014		1							
20/2/2014	1								
27/2/2014	1								
12/4/2014	1								
28/8/2014	1								
12/9/2014	1								
10/11/2014	1				2014	Moder.	Strong	Severe	Great
22/12/2014	1					7	1	-	-
4/1/2015	1								
7/1/2015	1								
17/2/2015	1								

24/2/2015	1			
2/3/2015	1			
17/3/2015			1	
18/3/2015	1			
19/3/2015	1			
20/3/2015	2			
10/4/2015	1			
15/4/2015	1			
16/4/2015	1			
13/5/2015	1			
8/6/2015	1			
22/6/2015			1	
25/6/2015	1			
5/7/2015	1			
13/7/2015	1			
23/7/2015	1			
15/8/2015	1			
16/8/2015	1			
27/8/2015	2			
28/8/2015	1			
7/9/2015	1			
9/9/2015	1			
11/9/2015	1			
20/9/2015	1			
4/10/2015	1			
7/10/2015		1		
3/11/2015	1			
7/11/2015	1			
10/11/2015	1			
20/12/2015		1		
31/12/2015		1		
21/1/2016	1			
3/2/2016	1			
16/2/2016	1			
17/2/2016	1			
6/3/2016	1			
14/3/2016	1			
16/3/2016	1			
2/4/2016	1			
7/4/2016	1			
12/4/2016	1			

2015	Moder.	Strong	Severe	Great
	31	3	2	-

14/4/2016	1								
8/5/2016	1								
2/8/2016	1								
23/8/2016	1								
1/9/2016	2								
3/9/2016	1								
13/10/2016		1							
25/10/2016	1								
29/10/2016	1				2016	Moder.	Strong	Severe	Great
11/11/2016	1					20	1	-	-
1/3/2017	1								
27/3/2017	1								
22/4/2017	1								
28/5/2017		1							
16/7/2017	1								
17/7/2017	1								
31/8/2017	1								
7/9/2017		1							
8/9/2017		1							
12/9/2017	1								
14/9/2017	1								
16/9/2017	1								
27/9/2017	1								
28/9/2017	2								
13/10/2017	1				2017	Moder.	Strong	Severe	Great
7/11/2017	1					14	3	-	-