



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η επίδραση του 11-ετούς ηλιακού κύκλου στην υγρασία
της ανώτερης τροπόσφαιρας**

Χαρίλαος Σ. Μπενετάτος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Ελευθεράτος, Επίκουρος καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

2018

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίδραση του 11-ετούς ηλιακού κύκλου στην υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας

Χαρίλαος Σ. Μπενετάτος

A.M.: 1114201200061

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Κωνσταντίνος Ελευθεράτος, Επίκουρος καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της ύπαρξης ή όχι συσχέτισης μεταξύ των υδρατμών της ανώτερης τροπόσφαιρας και της ηλιακής ροής. Στα πρώτα 3 κεφάλαια γίνεται εισαγωγή στις έννοιες της σχετικής υγρασίας, του ηλιακού κύκλου και αναφέρεται η επίδραση που ασκούν οι μεταβολές της υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στις πηγές των δεδομένων της υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας και περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία τους.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η ανάλυση των δεδομένων, όπου ερευνάται η κλιματολογία της υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας μέσα από τη μελέτη 34 ετών υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας σε χάρτες (από το 1980 έως το 2014). Έπειτα, οι χρονοσειρές της υγρασίας συγκρίνονται με τις αντίστοιχες χρονοσειρές του ηλιακού κύκλου. Ακόμη, μελετάται η συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων μέσω της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης καθώς και η στατιστική σημαντικότητα αυτής σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%. Κατά την μέθοδο αυτή βρέθηκαν ότι η συσχέτιση για την ζώνη μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 30° - 60° N είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99% καθώς και ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων σε πλάτη άνω των 60° N.

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the existence or not of correlation between the upper tropospheric humidity and the solar flux. In the first 3 chapters we introduce the concepts of relative humidity, the solar cycle and how changes in the upper tropospheric humidity can affect the greenhouse effect. In chapter 4, reference is made to the sources of upper tropospheric humidity data and to the methodology that was followed for processing the data.

Chapter 5 presents the analysis of the data, where the upper tropospheric humidity climatology is investigated by studying 34-years of upper tropospheric humidity data on maps (from 1980 to 2014). The time series of upper tropospheric humidity are then compared to the corresponding time series of the solar cycle. Moreover, the correlation between the two parameters is studied with the linear regression method as well as the statistical significance at 99% confidence level. It was found that the correlation of the latitude zone between 30° -60° N is statistically significant at a 99% confidence level and there is no correlation between the two parameters at latitudes above 60° N.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Κωνσταντίνο Ελευθεράτο διότι, μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα, μου παρείχε ουσιαστική επιστημονική βοήθεια και καθοδήγηση ενώ οι κριτικές παρατηρήσεις του στην ανάλυση του θέματος ήταν εξαιρετικά ωφέλιμες.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ..... 9

Περίληψη.....	9
1.1 Η δομή της ατμόσφαιρας	9
1.2 Τι είναι η υγρασία και ο μηχανισμός του κορεσμού;.....	12
1.3 Ποιος είναι ο μηχανισμός του υπερκορεσμού;	15
1.4 Μέγιστες τιμές σχετικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα.....	18
1.5 Τρόποι μέτρησης σχετικής υγρασίας	18
1.6 Ιστορία της μελέτης του υπερκορεσμού ως προς τον πάγο	20
1.7 Πόσο σημαντικό είναι το φαινόμενο του υπερκορεσμού για την ατμόσφαιρα, τον καιρό και το κλίμα;.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ο 11-ΕΤΗΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ..... 25

Περίληψη.....	25
2.1 Ο Ήλιος ως άστρο	25
2.1.1 Γενικά φυσικά χαρακτηριστικά.....	25
2.1.2 Ροή ακτινοβολίας από τον Ήλιο	26
2.2 Η σημασία του Ηλίου για τη Γη.....	27
2.2.1 Επιδράσεις στο γήινο κλίμα	27
2.2.2 Επιδράσεις στην γήινη βιολογία	28
2.3 Η ηλιακή δραστηριότητα	29
2.3.1 Δομή του Ηλίου.....	29
2.3.2 Εκρηκτικά φαινόμενα	31

2.4 Ιστορία καταγραφής ηλιακών κηλίδων	36
2.4.1 Πρώιμες αναφορές	36
2.4.2 Εισαγωγή του τηλεσκοπίου	37
2.4.3 Η ανακάλυψη του φαινομένου Wilson	37
2.4.4 Η ανάπτυξη της θεωρίας για τον ηλιακό κύκλο	38
2.5 Ο ηλιακός κύκλος	39
2.6 Δεδομένα ηλιακού κύκλου - solar flux 10.7 cm	40
2.7 Μεταβλητότητα του ηλιακού κύκλου	41
2.7.1 Μακροπρόθεσμη μεταβλητότητα	41
2.7.2 Βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	46
Περίληψη	46
3.1 Το ισοζύγιο ενέργειας	46
3.2 Επιπτώσεις του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου.	48
3.2.1 Επιπτώσεις στο περιβάλλον	48
3.2.2 Επιπτώσεις στην υγεία	48
3.3 Αντιμετώπιση του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου	49
3.4 Ο ρόλος των υδρατμών της ανώτερης τροπόσφαιρας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	50
Περίληψη	50
4.1 Γενικές πληροφορίες	50

4.2 Τεχνική εφαρμογή	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	57
Περίληψη.....	57
5.1 Κλιματολογία της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα	57
5.2 Η επίδραση της ηλιακής ροής στην υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην δομή της ατμόσφαιρας εισαγωγικά και εισάγεται η έννοια της υγρασίας. Η μελέτη της υγρασίας περιλαμβάνει τις μέγιστες τιμές της και που τις βρίσκουμε, τον τρόπο με τον οποίο παρατηρείται, την ιστορία καταγραφής της, και τέλος τον μηχανισμό του υπερκορεσμού και πόσο σημαντικός είναι για την ατμόσφαιρα.

1.1 Η δομή της ατμόσφαιρας

Με τον όρο ατμόσφαιρα της Γης εννοείται το αέριο σώμα που περιβάλλει τη Γη και συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς της. Το όριο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα δεν είναι αυστηρά καθορισμένο γιατί καθώς μεγαλώνει το υψόμετρο η ατμόσφαιρα σταδιακά εξασθενεί και εξαφανίζεται στο διάστημα. Γενικά, το υψόμετρο των 120 χιλιομέτρων θα μπορούσε να ορίζει το σύνορο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα επειδή είναι το σημείο όπου τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα γίνονται αισθητά κατά τη διάρκεια της επανεισόδου στην ατμόσφαιρα. Επίσης, η γραμμή Κάρμάν στα 100 Km πολύ συχνά επιτελεί τον ίδιο σκοπό.

πηγή: https://el.wikipedia.org/wiki/Ατμόσφαιρα_της_γης

Η κυριότερη διαίρεση της ατμόσφαιρας κατά ύψος, είναι αυτή που χρησιμοποιεί τις κατακόρυφες διαφορές της θερμοκρασίας που υπολογίζονται είτε με τις ραδιοβολίδες¹, είτε με τα ραδιοκύματα είτε τέλος, με τις πτήσεις των πυραύλων και των δορυφόρων. Σύμφωνα λοιπόν με τις θερμοκρασιακές διαφορές που επικρατούν κατά τον κατακόρυφο άξονα, η ατμόσφαιρα διαιρείται σε τέσσερα μεγάλα στρώματα ή «κελύφη». Αυτά είναι η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα και η θερμόσφαιρα (Παναγιώτης Μαχαίρας και Χρήστος Μπαλαφούτης, 1999). Ακόμα 2 στρώματα που θα πρέπει να αναφερθούν είναι η εξώσφαιρα και η ιονόσφαιρα.

¹ Η ραδιοβολίδα είναι μια συσκευή που μετρά διάφορες ατμοσφαιρικές παραμέτρους και τις αποστέλλει σε ένα σταθερό δέκτη. Η συσκευή προσδένεται σε ένα μεγάλο μπαλόνι, που γεμίζει είτε με ήλιο είτε με υδρογόνο και το οποίο την ανεβάζει δια μέσου της ατμόσφαιρας.

Η τροπόσφαιρα

Αποτελεί το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται προς τα πάνω σε ύψη περίπου 8 Km στους πόλους και 16 Km στον ισημερινό (11-12 στα μέσα γεωγραφικά πλάτη). Τα ύψη αυτά δεν είναι σταθερά αλλά μεταβάλλονται ανά εποχή (αυξάνονται το καλοκαίρι και μειώνονται τον χειμώνα). Η τροπόσφαιρα περιέχει το 75% της ολικής μοριακής μάζας αέρα και όλους του υδρατμούς και τα αερολύματα τα οποία θα αναφερθούν παρακάτω. Επίσης, περιλαμβάνει τα καιρικά φαινόμενα και υπάρχει μία πτώση της θερμοκρασίας κατά ύψος της τάξης των 6.5 °C ανά 1000 μέτρα. Η τροπόσφαιρα στο ανώτερο σημείο της καλύπτεται από μια επιφάνεια αναστροφής της θερμοκρασίας η οποία εμποδίζει τις ανοδικές κινήσεις. Αυτή η επιφάνεια έχει την έννοια της οροφής του καιρού και λέγεται τροπόπαυση (Παναγιώτης Μαχαίρας και Χρήστος Μπαλαφούτης, 1999). Το στρώμα της τροπόσφαιρας και συγκεκριμένα η ανώτερη περιοχή της θα μας απασχολήσουν και στην συνέχεια της εργασίας.

Η στρατόσφαιρα

Είναι το δεύτερο μεγάλο στρώμα της ατμόσφαιρας και εκτείνεται μέχρι το ύψος των 50 χιλιομέτρων περίπου. Η στρατόσφαιρα περιέχει το σύνολο σχεδόν του ατμοσφαιρικού όζοντος η παρουσία του οποίου είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση υψηλών θερμοκρασιών, οι οποίες προκαλούνται από την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από το όζον (Παναγιώτης Μαχαίρας και Χρήστος Μπαλαφούτης, 1999). Γενικά, η στρατόσφαιρα είναι ένα σημαντικό στρώμα καθώς η στατική μάζα αέρα που περιέχει αποτελεί ένα φράγμα για τα συστατικά της τροπόσφαιρας όπως είναι οι υδρατμοί. Το ανώτατο τμήμα της στρατόσφαιρας είναι η στρατόπαυση.

Η μεσόσφαιρα

Πάνω από την στρατόσφαιρα είναι η μεσόσφαιρα. Στην κορυφή της μεσόσφαιρας, περίπου στα 80-85 Km από την επιφάνεια της Γής οι θερμοκρασίες φτάνουν περίπου τους -90 °C. Η μεσόσφαιρα χαρακτηρίζεται από την απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας και από τις διαταρακτικές κινήσεις πάνω από ένα στρώμα με θερμότερο αέρα. Η ελάττωση της θερμοκρασίας οφείλεται και, μεταξύ άλλων, στην απουσία του όζοντος. Από το υπόλοιπο της ατμοσφαιρικής μάζας που δεν περιέχεται στην τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα (0.1%) το 99% αυτής κατέχει η μεσόσφαιρα και την υπόλοιπη το αμέσως υπερκείμενο ατμοσφαιρικό

στρώμα, η θερμόσφαιρα. Η μεσόσφαιρα οριοθετείται και αυτή από την μεσόπαυση (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Η θερμόσφαιρα

Ακριβώς πάνω από τη μεσόπαυση, αρχίζει το τέταρτο στρώμα της ατμόσφαιρας που ονομάζεται θερμόσφαιρα. Αυτό το στρώμα φτάνει σε ύψος περίπου τα 400 Km (τα όρια δεν είναι σαφώς καθορισμένα) ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται αλματωδώς έως τα ανώτερα υψομετρικά όρια του και φτάνει τους 1000° K. Η σημαντική αυτή αύξηση της κινητικής θερμοκρασίας της θερμόσφαιρας με το ύψος αποδίδεται στην μεγάλη αραίωση του αέρα στα μεγάλα αυτά ύψη (οπότε λιγότερα μόρια απορροφούν την ίδια ποσότητα ακτινοβολίας), στην έλλειψη τριατομικών μορίων, στην παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος μικρότερα των 1750 Å και στην ενέργεια που εκλύεται από διάφορες εξώθερμες χημικές αντιδράσεις (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Οι υψηλές τιμές της θερμοκρασίας επιβεβαιώνουν την έλλειψη διεργασιών απόψυξης του θερμοσφαιρικού στρώματος. Η μόνη σημαντική διεργασία ψύξης της θερμόσφαιρας γίνεται με αγωγή της θερμότητας προς τα κάτω. Για όλους αυτούς τους λόγους στα ύψη αυτά της θερμόσφαιρας παρουσιάζονται υψηλές τιμές (κινητικής) θερμοκρασίας που πολλές φορές φτάνουν την τιμή των 1500° K (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Ενδιαφέρον είναι, ότι οι τιμές θερμοκρασίας της θερμόσφαιρας παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές που εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος, την ώρα της ημέρας και την ηλιακή δραστηριότητα. Έχει παρατηρηθεί πως, στην περίοδο του ελαχίστου των ηλιακών κηλίδων, η μέση μέγιστη τιμή θερμοκρασίας της θερμόσφαιρας, πάνω από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη, φτάνει τους 750° K, ενώ κατά το μέγιστο της δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων, φτάνει τους 1300° K. Τέλος, σε περιπτώσεις ηλιακών εκλάμψεων έχουν σημειωθεί και τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες από 1700° K (Απόστολος Φλόκας, 1992). Όπως και τα προηγούμενα ατμοσφαιρικά στρώματα η θερμόσφαιρα οριοθετείται από το υπερκείμενο στρώμα, την εξώσφαιρα, με την διαχωριστική επιφάνεια της θερμόπαυσης.

Η εξώσφαιρα

Ακόμη, από το όριο της θερμόπαυσης και πάνω η ατμόσφαιρα γίνεται ισόθερμη και ονομάζεται εξώσφαιρα. Η βάση της βρίσκεται σε υψόμετρο μεταξύ 400-500 Km το οποίο εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα. Η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων στην

εξώσφαιρα είναι πολύ μεγάλη (κατά μέσο όρο 1.6 Km). Έτσι προκύπτει ότι σε αυτή την περιοχή τα ουδέτερα άτομα των αερίων μπορούν να διαφύγουν στο διάστημα. Όμως, το μέγεθος της ροής διαφυγής εξαρτάται από τον αριθμό των σωματιδίων που έχουν ταχύτητες διαφυγής (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Η ιονόσφαιρα

Η περιοχή της ατμόσφαιρας που εκτείνεται περίπου από τα 70 έως τα 1000 Km και στην οποία υπάρχει μεγάλος αριθμός από ηλεκτρόνια και ιόντα ονομάζεται ιονόσφαιρα ή ιοντόσφαιρα. Σε αυτή την περιοχή γίνεται μερικός ιονισμός των ατμοσφαιρικών συστατικών από τις διάφορες ακτινοβολίες του ήλιου ή και από σωματιδιακή ακτινοβολία. Σε διάφορα ύψη τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια πυκνώνουν και σχηματίζουν τα λεγόμενα ιονοσφαιρικά στρώματα. Από αυτά τα σημαντικότερα είναι το στρώμα D (60-90 Km), το στρώμα E (90-150 Km) το στρώμα F₁ (120-150 Km) και το στρώμα F₂ (250-350 Km) (Απόστολος Φλόκας, 1992). Τέλος, αυτά τα ιονισμένα στρώματα παίζουν μεγάλο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες λόγω του ότι αντανακλούν ορισμένα είδη ραδιοκυμάτων, και συγκεκριμένα τα μεσαίας και βραχέας συχνότητας κύματα.

1.2 Τι είναι η υγρασία και ο μηχανισμός του κορεσμού;

Ο αέρας στην ατμόσφαιρα της Γης περιέχει κυρίως άζωτο (78.1%) και οξυγόνο (20.9%). Οι υδρατμοί, ως ιχνοαέρια, καταλαμβάνουν λιγότερο από 1% όγκο στο σύνολο της ατμόσφαιρας μαζί με άλλα αέρια όπως το αργό, το όζον, το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου και όμως, είναι υπεύθυνοι για διάφορα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα όπως, τα δύο-τρίτα του φαινομένου του θερμοκηπίου, τον σχηματισμό νεφών, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις διαφόρων μορφών (βροχή, χαλάζι και χιόνι) καθώς και για το ένα-έκτο της ενέργειας που μεταφέρεται από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισοδιαπνοής του νερού στο έδαφος. Η συγκέντρωση των υδρατμών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με πολλούς τρόπους όπως, ο αριθμός των μορίων του νερού ανά όγκο ή μάζα αέρα ή και με την μερική πίεση που ασκούν τα μόρια. Αυτοί οι τρόποι είναι διαφορετικές μορφές έκφρασης της απόλυτης υγρασίας. Υπάρχει όμως μία έννοια η οποία χρησιμοποιείται σε όλα τα κοινά υγρόμετρα, η σχετική υγρασία. Η σχετική υγρασία χρησιμοποιείται στην μετεωρολογία και τις ατμοσφαιρικές επιστήμες επειδή έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις απόλυτες μετρήσεις της συγκέντρωσης των υδρατμών. Αρχικά, εκφράζεται σε ένα γνώριμο

εύρος ποσοστών από 0% (Καθόλου υδρατμοί) – 100% (Κορεσμός των υδρατμών) ενώ η κλίμακα της απόλυτης υγρασίας θα πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος καθώς η συγκέντρωση των μορίων του νερού διαφοροποιείται κατά έναν πολλαπλασιαστή της τάξης των 10^4 . Ακόμη, ο σχηματισμός των νεφών ελέγχεται από την σχετική και όχι από την απόλυτη υγρασία.

Όμως, τι εννοούμε σχετικό στην έννοια της σχετικής υγρασίας; Είναι ο λόγος των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε μια δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα των υδρατμών, την οποία ο αέρας είναι ικανός να κρατήσει στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ή εναλλακτικά, ο λόγος της μερικής πίεσης των μορίων του νερού στον αέρα προς την μερική πίεση τους σε κατάσταση κορεσμού. Ο κορεσμός των υδρατμών είναι η έκφραση μίας δυναμικής ισορροπίας μεταφοράς μορίων νερού από μία φάση σε μία άλλη. Για παράδειγμα, φανταστείτε μια μεγάλη λεκάνη με νερό. Καθώς τα μόρια του νερού βρίσκονται σε συνεχή κίνηση συγκρουόμενα μεταξύ τους, τότε, κάποια στιγμή ένα από τα μόρια θα έχει αποκτήσει αρκετή ποσότητα ενέργειας έτσι ώστε να αποδράσει από την λεκάνη και να εισέλθει στον χώρο από πάνω, δηλαδή να γίνει υδρατμός. Με την σειρά τους, τα μόρια που βρίσκονται σε μορφή υδρατμού είναι και αυτά σε συνεχή κίνηση συγκρουόμενα μεταξύ τους και πολλές φορές ένα από αυτά μπαίνει στην λεκάνη δηλαδή, υφίσταται συμπύκνωση και εισέρχεται στην υγρή φάση. Οπότε, υπάρχει μία αέναη ανταλλαγή μορίων μεταξύ της λεκάνης και του αέρα από πάνω δηλαδή, της υγρής και αέριας φάσης. Καθώς, η συγκέντρωση των μορίων νερού στο νερό διαφέρει μόνο στο ελάχιστο με αλλαγές στην πίεση και την θερμοκρασία, δεν γίνεται το ίδιο και στον αέρα. Στην αέρια φάση οι συγκεντρώσεις μπορεί να αλλάζουν δραστικά. Επομένως, ενώ η ροή μορίων νερού από το υγρό στο αέριο είναι σχεδόν σταθερή, η ροή των μορίων νερού από το αέριο στο υγρό αυξάνεται με αύξηση της συγκέντρωσης των μορίων του νερού στο αέριο. Δυναμική ισορροπία σημαίνει ότι αυτές οι δύο ροές είναι ίσες έτσι ώστε το καθαρό αποτέλεσμα να είναι μηδέν (δηλαδή το νερό στην λεκάνη παραμένει σταθερό, ούτε υπερисχύει η εξάτμιση ούτε η συμπύκνωση). Σε αυτή την περίπτωση, οι υδρατμοί πάνω από την λεκάνη λέμε ότι είναι κορεσμένοι, δηλαδή, ότι η σχετική υγρασία είναι 100%. Αυτή η συγκέντρωση είναι η τιμή αναφοράς για την συγκεκριμένη κλίμακα της σχετικής υγρασίας. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνουν τέσσερις επισημάνσεις.

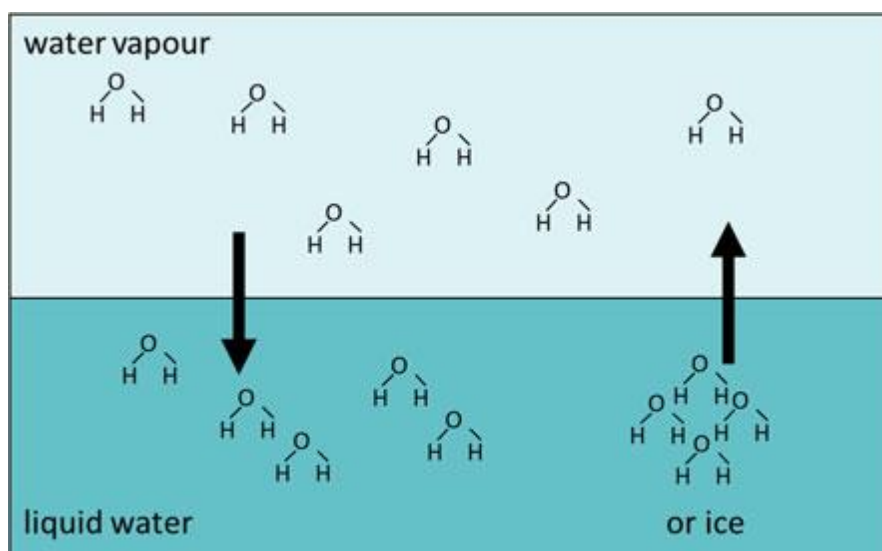
- Πρώτον, τα παραπάνω αναφέρονται στα μόρια του νερού ασχέτως εάν στο μίγμα υπάρχουν καθαροί υδρατμοί ή και άλλα αέρια, αρκεί το μίγμα να συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο. Οπότε, η σχετική υγρασία είναι ιδιότητα των μορίων του νερού ανεξάρτητα αν υπάρχουν και άλλα μόρια διαφορετικών αερίων και είναι οι υδρατμοί οι οποίοι βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού.

- Δεύτερον, μπορεί να γίνει μια παρόμοια θεώρηση αυτή τη φορά με πάγο αντί για νερό στην λεκάνη. Ωστόσο, καθώς οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων του πάγου είναι ισχυρότερες, η ροή των μορίων νερού από το στερεό στο αέριο είναι μικρότερη από την ροή των μορίων από το υγρό στο αέριο. Έτσι, μια μικρότερη συγκέντρωση των μορίων του νερού στην αέρια φάση μπορεί να ισορροπήσει την ροή, και ο κορεσμός των υδρατμών με μία επιφάνεια πάγου από κάτω επιτυγχάνεται με μικρότερη συγκέντρωση υδρατμών από ότι ο κορεσμός με μία επιφάνεια υγρού νερού. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο περιπτώσεις σχετικής υγρασίας, η μία ως προς το νερό και η άλλη ως προς το πάγο. Σε θερμοκρασίες υπό το μηδέν, όπου υπέρψυχρο (supercooled) νερό σε υγρή μορφή μπορεί να υπάρξει μέχρι τους $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ οι δύο έννοιες μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα, όμως σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο τήξης του πάγου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η σχετική υγρασία ως προς το νερό, το οποίο συνήθως εφαρμόζεται στα κοινά υγρόμετρα.
- Τρίτον, παρόλο που αυτά τα όργανα έχουν εύρος τιμών $0\% - 100\%$ δεν υπάρχει κάτι που απαγορεύει μια μεγαλύτερη συγκέντρωση υδρατμών στον αέρα. Όταν, η συγκέντρωση υπερβεί το 100% τότε υπάρχει το φαινόμενο του υπερκορεσμού. Ωστόσο, ο υπερκορεσμός δεν είναι μια σταθερή κατάσταση. Δεν υπάρχει δυναμική ισορροπία σε αυτό το φαινόμενο. Οπότε, θα συμβούν διάφορες διεργασίες όπως η συμπύκνωση οι οποίες θα οδηγήσουν την κατάσταση πίσω στην δυναμική ισορροπία, δηλαδή στον κορεσμό. Παρόμοια, όταν υπάρχει μια συμπυκνωμένη φάση ο υποκορεσμός δεν είναι μία σταθερή κατάσταση· επιφέρει τα φαινόμενα της εξάτμισης και της εξάχνωσης.
- Τέταρτον, η συγκέντρωση των υδρατμών στην οποία θεωρούνται κορεσμένοι (και για τις δύο περιπτώσεις) εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η εξίσωση Clausius-Clapeyron εκφράζει αυτή την εξάρτηση με το μέγεθος της μερικής πίεσης:

$$\diamond d \ln (e/dT) = L/RT^2$$

όπου:

- R: Σταθερά των αερίων
- L: Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ή εξάχνωσης
- e: Μερική πίεση των υδρατμών οι οποίοι προέρχονται από υγρό ή στερεό (εξαρτάται από το L)



Σχήμα 1.1 Μόρια νερού σε υγρή μορφή (νερό), στερεή (πάγος), και αέρια (υδρατμοί). Τα βελάκια υποδεικνύουν την ανταλλαγή μορίων νερού μεταξύ των φάσεων δηλαδή από την συμπυκνωμένη - υγρή και στερεή φάση στην αέρια και αντίστροφα. Εάν η συγκέντρωση των μορίων του νερού στην αέρια φάση έχει ακριβώς την τιμή που χρειάζεται έτσι ώστε η ροή μεταξύ των φάσεων να έχει καθαρό αποτέλεσμα μηδέν τότε η σχετική υγρασία είναι 100% (Gierens et al., 2012).

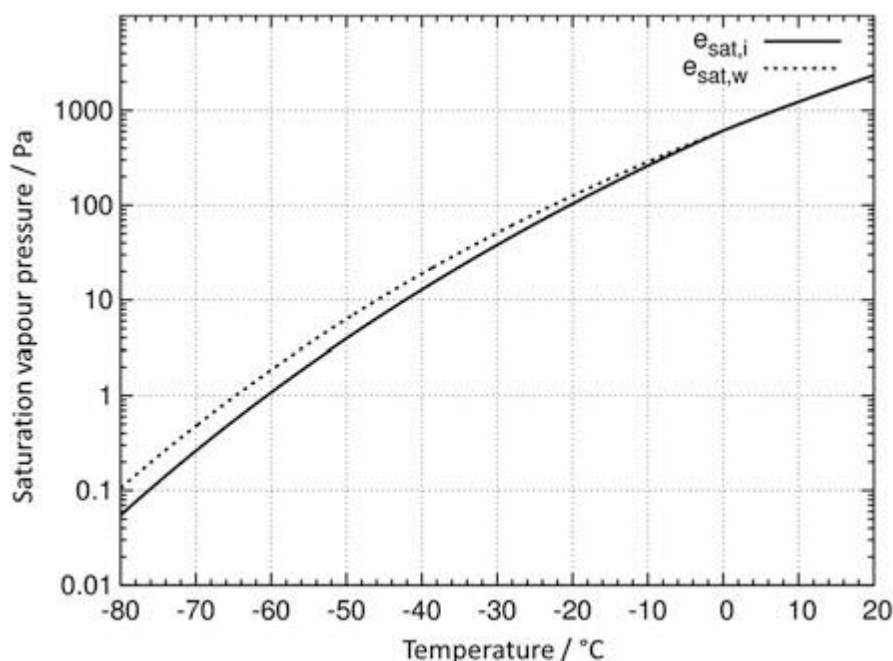
1.3 Ποιος είναι ο μηχανισμός του υπερκορεσμού;

Όταν μία μάζα αέρα ανέρχεται υψομετρικά, αρχίζει και ψύχεται επειδή μειώνεται η θερμοκρασία. Έτσι, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, μειώνεται και η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί υδρατμούς, δηλαδή, μειώνεται η μέγιστη χωρητικότητα του αέρα σε υδρατμούς. Αν θυμηθούμε την έκφραση της σχετικής υγρασίας δηλαδή, ότι είναι ο λόγος της συγκέντρωσης των υδρατμών προς την μέγιστη χωρητικότητα του αέρα σε υδρατμούς, τότε εφόσον μικραίνει η μέγιστη ποσότητα υδρατμών, το συνολικό κλάσμα αυξάνεται, δηλαδή, αυξάνεται η σχετική υγρασία. Στους νόμους της φυσικής, δεν υπάρχει κάτι που να εμποδίζει την συγκέντρωση των μορίων νερού πάνω από το όριο του κορεσμού. Εάν συμβεί αυτό, η κατάσταση ονομάζεται μετασταθής (metastable) και σημαίνει ότι αυτή η κατάσταση μπορεί να παραμείνει ως έχει για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα σε αντίθεση με την ασταθή κατάσταση όπου αμέσως ξεκινούν οι διεργασίες έτσι ώστε να οδηγηθεί το σύστημα σε δυναμική ισορροπία (κατάσταση κορεσμού).

Η διεργασία η οποία φέρνει το σύστημα σε δυναμική ισορροπία ονομάζεται συμπύκνωση και είναι η διαδικασία σχηματισμού σταγονιδίων νερού. Ωστόσο, χωρίς σωματίδια στον αέρα, τους λεγόμενους πυρήνες συμπύκνωσης, ο σχηματισμός σταγονιδίων θα συνέβαινε μόνο όταν η σχετική υγρασία έφτανε πολλές εκατοντάδες επί τοις εκατό. Συνήθως, δεν ανιχνεύονται τόσο υψηλές τιμές στην ατμόσφαιρα και αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχουν πολλά μικροσκοπικά σωματίδια τα οποία δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης. Αυτοί οι πυρήνες βοηθούν τα μόρια του νερού να ενωθούν μεταξύ τους και να σχηματίσουν σταγονίδια. Καθώς το υγρό

νερό δεν είναι ένα πολύ καλά οργανωμένο υλικό, οι προϋποθέσεις για ένα σωματίδιο να αποτελέσει πυρήνα συμπύκνωσης είναι γενικά λίγες. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει συνεχώς πληθώρα πυρήνων συμπύκνωσης στην ατμόσφαιρα για να σχηματίζονται σύννεφα σχεδόν αμέσως, εφόσον η σχετική υγρασία υπερβεί την τιμή αναφοράς 100%. Επομένως, ο υπερκορεσμός πρέπει να θεωρηθεί μία ασταθής κατάσταση στην ατμόσφαιρα επειδή η συμπύκνωση συμβαίνει σχεδόν αμέσως.

Το σχήμα 1.2 δείχνει ότι για να δημιουργηθούν συνθήκες κορεσμού ως προς τον πάγο χρειάζεται μικρότερη συγκέντρωση υδρατμών από ότι χρειάζεται για να δημιουργηθούν συνθήκες κορεσμού ως προς το νερό. Σημειώνεται ότι η μερική πίεση που υπάρχει στο διάγραμμα παραπέμπει σε συγκέντρωση υδρατμών. Επομένως, οι υδρατμοί μπορούν να συμπυκνωθούν σε παγοκρυστάλλους, ευκολότερα από ότι μπορούν να συμπυκνωθούν σε σταγονίδια νερού.



Σχήμα 1.2 Κορεσμός ως προς το νερό (dotted, $e_{sat,w}$) ή ως προς τον πάγο (solid, $e_{sat,i}$) (που υποδηλώνεται μέσω της μερικής πίεσης που ασκούν οι υδρατμοί σε κατάσταση κορεσμού) σε σχέση με την θερμοκρασία. Παρατηρείται: Η μεγάλη αύξηση της μερικής πίεσης ανάλογα με την θερμοκρασία, (σε ένα εύρος θερμοκρασίας -80 με 0 °C η μερική πίεση αυξάνεται κατά έναν πολλαπλασιαστή της τάξης των 10.000) και ότι ο κορεσμός ως προς το νερό υποδηλώνει ταυτόχρονα κορεσμό ως προς τον πάγο (Gierens et al., 2012).

Όμως, το φαινόμενο αυτό δεν συμβαίνει στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα με τον σχετικά εύκολο σχηματισμό σταγονιδίων νερού, ο σχηματισμός παγοκρυστάλλων στην ατμόσφαιρα είναι περίπλοκος και παρόλο που υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί σχηματισμού κρυστάλλων πάγου, όλοι πραγματοποιούνται σε συνθήκες σημαντικού υπερκορεσμού. Η πολυπλοκότητα αυτού του σχηματισμού βρίσκεται στην κρυσταλλική δομή του πάγου και συγκεκριμένα στην

σταθερότητα της δομής του η οποία δεν μπορεί να σχηματιστεί σε κάθε είδος σωματιδίου (ακόμα και αν είναι υδρόφιλο). Οι προϋποθέσεις για να αποτελέσει ένα σωματίδιο πυρήνα παγοκρυστάλλου, είναι τόσο αυστηρές που μόνο ένα στο ένα εκατομμύριο σωματίδια μπορεί να λειτουργήσει με αυτήν την ιδιότητα. Η σπανιότητα εύρεσης των πυρήνων αυτών εξηγεί γιατί οι παγοκρύσταλλοι δεν σχηματίζονται αμέσως από τους υδρατμούς μόλις η σχετική υγρασία ξεπεράσει το 100%. Επίσης, οι σταγόνες νερού δεν παγώνουν πάντα σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν στην ατμόσφαιρα, οπότε η παρουσία υπέρψυχρων υγρών νεφών στον ουρανό είναι ένα αρκετά συχνό φαινόμενο. Αυτές οι παγωμένες σταγόνες νερού είναι δυνητικά επικίνδυνες για την εναέρια κυκλοφορία, επειδή μπορεί να παγώσουν επάνω στα φτερά των αεροσκαφών.

Στην ανώτερη τροπόσφαιρα, οι θερμοκρασίες είναι τόσο χαμηλές που μία σταγόνα νερού θα πάγωνε αμέσως. Έτσι, σύννεφα τα οποία μεταφέρονται με ανοδικά ρεύματα σε αυτές τις περιοχές αποκτούν μια κορυφή από κρυστάλλους πάγου. Παρόλα αυτά, τα σύννεφα Cirrus (σύννεφα που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από παγοκρυστάλλους) σχηματίζονται χωρίς να υπάρχει κίνηση, από αερολύματα σε υγρή μορφή τα οποία αποτελούνται από υδατικά διαλύματα θεικών οξέων και άλλων ουσιών. Σε αντίθεση με το καθαρό νερό, τέτοιες σταγόνες διαλυμάτων δεν παγώνουν αμέσως σε θερμοκρασίες μικρότερες από μείον σαράντα βαθμούς κελσίου. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το πρόβλημα βρίσκεται στην κρυσταλλική δομή του παγοκρυστάλλου όπου χρειάζεται συγκεκριμένες προϋποθέσεις σχηματισμού. Η κρυσταλλική δομή δεν μπορεί να σχηματιστεί όταν υπάρχουν πολύ μεγάλα ξένα μόρια (το μόριο του θεικού οξέος - H_2SO_4). Μόνο η παρουσία τους αρκεί για να εμποδίσει τον σχηματισμό του κρυσταλλικού πλέγματος. Το πάγωμα του διαλύματος μπορεί να συμβεί μόνο όταν είναι αρκετά αραιωμένο. Για να επιτευχθεί αυτό το αραιώμα, οι σταγόνες του διαλύματος πρέπει να αναμειχθούν με σταγονίδια νερού από τον ατμοσφαιρικό αέρα και για να συμβεί αυτό πρέπει να υπάρχει μια τιμή συγκέντρωσης υδρατμών που να αντιστοιχεί στην τιμή σχετικής υγρασίας 145% ως προς τον πάγο (όμως, το αντίστοιχο ποσοστό σχετικής υγρασίας ως προς το νερό είναι λιγότερο από 100%).

Οπότε, καταλήγουμε στο γεγονός ότι ο κορεσμός ως προς τον πάγο δεν συνεπάγεται με σχηματισμό παγοκρυστάλλων. Αντίστροφα, για να υπάρξει σχηματισμός παγοκρυστάλλων τότε προϋποθέτονται πολύ μεγάλες τιμές σχετικής υγρασίας, δηλαδή, υπερκορεσμός. Έτσι, ο υπερκορεσμός σε πάγο μπορεί να θεωρηθεί μια μετασταθής κατάσταση (οι διεργασίες στην ατμόσφαιρα που επαναφέρουν τον υπερκορεσμό σε κορεσμό δεν ξεκινούν αμέσως). Οπότε, το φαινόμενο του υπερκορεσμού σε πάγο μπορεί να διαρκέσει στην ατμόσφαιρα για αρκετό χρονικό διάστημα (περισσότερο της μίας μέρας) και αέριες μάζες με υπερκορεσμένους υδρατμούς μπορεί να είναι αρκετά εκτεταμένες.

1.4 Μέγιστες τιμές σχετικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα

Είναι γεγονός ότι σε υπέρψυχρα σύννεφα από υδροσταγονίδια υπάρχει κορεσμός ως προς το νερό. Οι υψηλότερες τιμές υπερκορεσμού μπορεί να βρεθούν όταν το υπέρψυχρο σύννεφο αγγίζει το όριο της θερμοκρασίας στο οποίο είναι δυνατό να υπάρξει νερό σε υγρή μορφή ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Σε αυτές τις θερμοκρασίες το σημείο κορεσμού του νερού (σχετική υγρασία 100%) αντιστοιχεί σε ποσοστό σχετικής υγρασίας ως προς τον πάγο 145%. Σε ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο σχηματισμός του πάγου συνήθως συμβαίνει αφού η τιμή σχετικής υγρασίας ως προς τον πάγο υπερβεί την τιμή 145% αλλά πριν η αντίστοιχη σχετική υγρασία ως προς το νερό υπερβεί το 100%. Ο υπερκορεσμός κοντά στο όριο του κορεσμού συμβαίνει κατά την διάρκεια ισχυρών ανοδικών κινήσεων καθώς τα υδατικά διαλύματα σε μορφή σταγονιδίων αρχίζουν να παγώνουν. Πολύ υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας υπάρχουν όταν το πάγωμα σταματά εξαιτίας κάποιων συγκεκριμένων χημικών ουσιών ή εάν το πάγωμα είναι πολύ γρήγορο. Τέτοια παραδείγματα έχουν βρεθεί στην τροπική τροπόπαυση σε πολύ ψυχρό αέρα ($-86\text{ }^{\circ}\text{C}$, Jensen et al. (2005)), και στην Ανταρκτική κατά την διάρκεια του χειμώνα (Spichtinger et al., 2002). Οι υψηλότερες τιμές που μπορεί να ξεπερνούν κατά πολύ τα 1000% σχετίζονται με την δημιουργία φωτεινών νεφών τα οποία είναι σύννεφα που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους, βρίσκονται σε ύψη 80 – 85 Km και έχουν θερμοκρασία περίπου $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lubken et al., 2009). Εξαιρετικά γρήγορη ψύξη της τάξης των 20 βαθμών και παραπάνω μέσα σε ένα millisecond συμβαίνει στα φτερά των αεροσκαφών σε πολύ μεγάλα υψόμετρα. Αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε τιμές υγρασίας πάνω από 1000% αλλά για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Λόγω αυτού του φαινομένου μπορεί να σχηματιστούν και να γίνουν ορατά ίχνη αεροσκαφών (Gierens et al., 2009; Karcher et al., 2009), και να παραμείνουν ορατά εάν αυτό το φαινόμενο συμβεί μέσα σε υπερκορεσμένες περιοχές ως προς τον πάγο (Ice SuperSaturated Regions- ISSRs).

1.5 Τρόποι μέτρησης σχετικής υγρασίας

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την μέτρηση της υγρασίας του αέρα διακρίνονται σε μεθόδους: α) απορρόφησης των υδρατμών, β) συμπύκνωσης των υδρατμών, γ) υγροσκοπικές και δ) θερμοδυναμικές. Το σύνολο των ανωτέρω μεθόδων αποτελούν την υγρομετρία, ενώ τα χρησιμοποιούμενα όργανα για τον προσδιορισμό της υγρασίας του αέρα λέγονται υγρόμετρα. Αυτά διακρίνονται σε υγρόμετρα απλής ένδειξης και σε αυτογραφικά (υγρογράφοι). Από τις

υγρομετρικές παραμέτρους, η απόλυτη υγρασία μετράται με την μεταβολή του βάρους υγροσκοπικού σώματος, όταν διέλθει μέσα από γνωστός όγκος αέρα και κατακρατηθούν οι υδρατμοί. Η μέθοδος αυτή είναι ακριβής, επίπονη, δαπανηρή και απαιτεί πολύ χρόνο. Τα υγρόμετρα αυτού του τύπου λέγονται χημικά (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Οι μέθοδοι συμπίκνωσης των υδρατμών βασίζονται στο γεγονός, ότι αν η θερμοκρασία κάποιου ψυχόμενου σώματος γίνει ίση με την θερμοκρασία δρόσου του αέρα που το περιβάλλει, τότε στην επιφάνεια του σώματος εμφανίζονται λεπτά σωματίδια νερού (λόγω συμπίκνωσης). Στην αρχή αυτή βασίζεται η λειτουργία των συμπτυκνωτικών υγρομέτρων (Daniel Alluard). Η σχετική υγρασία μετρείται με το πιο απλό και εύχρηστο υγροσκοπικό υγρόμετρο τρίχας του Horace-Benedict de Saussure. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η δέσμη ανθρώπινων τριχών διαστέλλεται και επιμηκύνεται όταν αυξάνεται η σχετική υγρασία του αέρα, επειδή στο διάστημα αυτό μεταξύ των κυττάρων απορροφάται υδρατμός. Η επιμήκυνση των τριχών, κατάλληλα πολλαπλασιασμένη, μετρείται ή καταγράφεται. Η καταγραφή γίνεται σε ταινία που έχει προσαρμοσθεί, σε περιστρεφόμενο με ωρολογιακό μηχανισμό, κυλινδρικό τύμπανο. Το υγρόμετρο τρίχας δεν θεωρείται πολύ ακριβές γιατί η ποιότητα των τριχών μεταβάλλεται (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Οι υγρομετρικές παράμετροι της απόλυτης και σχετικής υγρασίας μπορούν να μετρηθούν θερμοδυναμικά με το ψυχρόμετρο του August. Αυτό αποτελείται από δύο όμοια υδραργυρικά θερμόμετρα, τοποθετημένα κατακόρυφα και παράλληλα, σε ένα μεταλλικό ή ξύλινο στήριγμα. Το δοχείο του ενός θερμομέτρου είναι καθαρό και εντελώς ξηρό (ξηρό θερμόμετρο) και παρέχει κανονικά την θερμοκρασία του αέρα (t_a). Το δοχείο του άλλου θερμομέτρου περιβάλλεται σφιχτά από λεπτό μεταξωτό ύφασμα που διατηρείται υγρό με την χρήση κατάλληλης θρυαλλίδας, της οποίας το άλλο άκρο καταλήγει σε δοχείο με αποσταγμένο νερό. Έτσι, το θερμόμετρο, αποκαλούμενο υγρό θερμόμετρο, δείχνει την θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου (t_w). Στην περίπτωση που το ψυχρόμετρο αερίζεται καλά, λαμβάνει χώρα εξάτμιση από την επιφάνεια του υγρού θερμομέτρου με αποτέλεσμα να δείχνει χαμηλότερη θερμοκρασία από το άλλο, ξηρό θερμόμετρο (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Η t_w σταθεροποιείται, όταν επιτευχθεί η σχετική θερμοδυναμική ισορροπία. Τότε η απόλυτη υγρασία εκφραζόμενη με την μερική πίεση των υδρατμών του δείγματος αέρα υπολογίζεται από την σχέση Renou:

$$e = e_{s(t_w)} - a * p(t_a - t_w)$$

Όπου:

e: Απόλυτη υγρασία

$e_{s(tw)}$: Μέγιστη τάση υδρατμών

α : Σταθερά, $\alpha=0,00079$ για $t > 0^\circ\text{C}$ και $\alpha= 0,00069$ για $t < 0^\circ\text{C}$

p : Ατμοσφαιρική πίεση

t_a : Ένδειξη ξηρού θερμομέτρου

t_w : Ένδειξη υγρού θερμομέτρου

- Εάν t_a είναι ίση με t_w τότε η σχετική υγρασία είναι 100%

Το ψυχρόμετρο August δεν παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια για $t_w < 0^\circ\text{C}$, δηλαδή στις χαμηλές θερμοκρασίες της ανώτερης ατμόσφαιρας και στα ψυχρά ηπειρωτικά κλίματα κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Γενικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι δεν υπάρχει απλό και εύχρηστο όργανο, που να μετράει με ακρίβεια την υγρασία του αέρα, σε όλες τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Απόστολος Φλόκας, 1992).

Εκτός από τα ψυχρόμετρα τύπου August, υπάρχουν και τα φορητά ψυχρόμετρα. Ο πιο εύχρηστος τύπος τέτοιων ψυχομέτρων είναι το ψυχρόμετρο με ανεμιστήρα, γνωστό με την ονομασία ψυχρόμετρο του Assmann. Το όργανο αυτό έχει τα δύο θερμομέτρα σταθερά τοποθετημένα μέσα σε δύο μεταλλικούς σωλήνες. Στην μία άκρη των σωλήνων βρίσκονται τα δοχεία των δύο θερμομέτρων, από τα οποία το ένα είναι ελεύθερο και το άλλο καλύπτεται με λεπτό ύφασμα. Στην άλλη άκρη των σωλήνων υπάρχει στερεωμένος ένας μηχανισμός μικρού ανεμιστήρα. Κατά την λειτουργία του ανεμιστήρα δημιουργείται ένα σταθερό ρεύμα μέσα στους μετάλλινους σωλήνες, όπου βρίσκονται τα θερμομέτρα. Για να γίνει η ανάγνωση των τιμών των δύο θερμομέτρων (ξηρό, υγρό), πραγματοποιούνται οι παρακάτω εργασίες:

1. Θέτουμε σε λειτουργία τον ανεμιστήρα και υγραίνουμε το ύφασμα που καλύπτει την λεκάνη του ενός θερμομέτρου.
2. Κρατούμε το όργανο κατακόρυφα, σε ύψος 1.5 μέτρο περίπου από το έδαφος, με τις λεκάνες των θερμομέτρων προς τα κάτω, και
3. Παίρνουμε τις τιμές t_a και t_w των δύο θερμομέτρων μετά από την σταθεροποίηση των ενδείξεων των θερμομέτρων (συνήθως, μετά από 1-2 λεπτά από την έναρξη λειτουργίας του ψυχομέτρου) (Απόστολος Φλόκας, 1992).

1.6 Ιστορία της μελέτης του υπερκορεσμού ως προς τον πάγο

Το γεγονός ότι το υγρό νερό μπορεί υπερψυχθεί ανακαλύφθηκε από τον D.Fahrenheit το 1721, πριν περίπου 300 χρόνια. Ανακάλυψε ότι μπορούσε να κρατήσει σταγόνες νερού σε υγρή

μορφή σε έναν κενό λαμπτήρα στους -9°C για αρκετές ώρες. Το υγρό μετατρέποταν σε πάγο μόνο όταν ανάδευε τους λαμπτήρες. Αυτή ήταν και η πρώτη παρατήρηση υγρού νερού σε μία μετασταθή κατάσταση. Εικασίες ότι οι υδρατμοί μπορούν να υπάρξουν σε μετασταθή κατάσταση, όπως το φαινόμενο του υπερκορεσμού ως προς τον πάγο, υπήρξαν την πρώτη δεκαετία του 20^{ου} αιώνα. Οι πρώτες παρατηρήσεις, έγιναν από τον A. Wegener κατά την διάρκεια της αποστολής Danmark στην περιοχή της Βορειοανατολικής Γροιλανδίας τα έτη 1906–1908. Τα πρώτα από τα πολλά ευρήματα για αυτό το φαινόμενο αποκτήθηκαν στις 26 Αυγούστου του 1906 στον μετεωρολογικό σταθμό Danmarkshavn χρησιμοποιώντας ένα υγρόμετρο τρίχας σε έναν επίγειο μετεωρολογικό κλωβό. Ο Wegener δεν αμφέβαλλε για τις παρατηρηθείσες τιμές αφού ήξερε πως υπήρχε και ο υπερκορεσμός ως προς το νερό, η οποία κατάσταση βρέθηκε στην ομίχλη από τον A. Wagner, το έτος 1908, χρησιμοποιώντας έναν αριθμό από υγρόμετρα στην περιοχή Hohen Sonnblick της Αυστρίας με υψόμετρο 3106 μέτρα. Ο Wegener (1914) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «είναι προφανές από αυτές τις τιμές ότι ο αέρας είναι κατά μέσο όρο σημαντικά υπερκορεσμένος ως προς τον πάγο στην ψυχρότερη εποχή, από τον Νοέμβριο μέχρι τον Μάρτιο»².

Γύρω στο 1940 έγινε μία επιστημονική συζήτηση που αφορούσε τον σχηματισμό παγοκρυστάλλων ψηλά στην ατμόσφαιρα. Ενώ ο A. Wegener και ο W. Findeisen νόμιζαν ότι ο πάγος συνήθως σχηματιζόταν με απευθείας εναπόθεση πάνω σε κατάλληλα στερεά σωματίδια, οι L. Krastanow και E. Wall εξέθεσαν τις αμφιβολίες τους και παρουσίασαν θερμοδυναμικές εξισώσεις αποδεικνύοντας ότι η παγωμένη φάση στην ατμόσφαιρα προκύπτει συνήθως από την υγρή φάση, από το πάγωμα υπέρψυχρων σταγόνων. Οι E. Gluckauf και H. K. Weickmann μάλλον ήταν οι πρώτοι που παρατήρησαν υπερκορεσμό ως προς τον πάγο στην περιοχή της τροπόσφαιρας. Το 1945, ο Gluckauf, με μετρήσεις από υγρόμετρα τρίχας αναφέρει πως παρατηρούνται συχνά καταστάσεις υπερκορεσμού ως προς πάγο στην ανώτερη τροπόσφαιρα στην περιοχή της Νότιας Αγγλίας. Ενώ ο Weickmann, ο οποίος πήρε μικροφωτογραφίες από κρυστάλλους πάγου σε ερευνητικές πτήσεις, κατέληξε στο ότι τα σύννεφα Cirrus σχηματίζονται κυρίως διαμέσου της υγρής φάσης και όχι με το που υπάρξουν οι συνθήκες υπερκορεσμού. Ακόμη, χαρακτήρισε την ανώτερη τροπόσφαιρα ως περιοχή υψηλού υπερκορεσμού ως προς τον πάγο παρόλο που γενικά έχει χαμηλές τιμές απόλυτης υγρασίας. Μερικά χρόνια αργότερα, το 1946-1948, οι B.M. Cwiling και V.J. Schaefer κατάφεραν να ψύξουν μικρές σταγόνες νερού, χωρίς να χάσουν την υγρή τους φάση, μέχρι το όριο των -40°C για το καθαρό νερό. Σε ακόμα μικρότερες θερμοκρασίες οι σταγόνες παγώνουν αμέσως.

² «Aus diesen Zahlen geht zur Evidenz hervor, dass zur kältesten Jahreszeit, nämlich in den Monaten November bis März, im Durchschnitt die Luft in Bezug auf Eis erheblich übersättigt Ist» (Wegener, 1914).

Φαίνεται ότι το θέμα του υπερκορεσμού ως προς τον πάγο ξεχνιέται μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, όπου το θέμα ερευνάται ξανά μέσα από μελέτες για την τροποποίηση του καιρού και συγκεκριμένα, σε μια έρευνα για τον σχηματισμό σύννεφων και βροχοπτώσεων σε καθαρό αέρα. Ο όρος «υπερκορεσμένη περιοχή ως προς τον πάγο» ή αλλιώς ISSR, επινοήθηκε από τους Detwiler και Pratt το 1984. Όμως έπρεπε να περάσουν 2 δεκαετίες ακόμα προκειμένου να γίνουν αποδεκτές στον επιστημονικό χώρο οι υπερκορεσμένες ως προς το πάγο περιοχές της ανώτερης τροπόσφαιρας. Στα τέλη του 1980 οι K. Sassen A. Heymsfield και οι συνεργάτες τους, πρότειναν ότι ο σχηματισμός των σύννεφων Cirrus, χωρίς το φαινόμενο της μεταφοράς, σε θερμοκρασίες μικρότερες των $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ συμβαίνουν κυρίως από το πάγωμα σταγόνων υδατικών διαλυμάτων, μία διεργασία που απαιτεί σημαντικά υψηλό υπερκορεσμό ως προς πάγο. Στα τέλη του 1990, ερευνητικά όργανα ακριβείας σε ερευνητικά αεροσκάφη τύπου Falcon της DLR και κανονικές μετρήσεις υγρασίας από εξοπλισμένα και επανδρωμένα αεροσκάφη (the MOZAIK² program) παρείχε στοιχεία ότι ο υπερκορεσμός σε πάγο συμβαίνει αρκετά συχνά στην άνω τροπόσφαιρα (Gierens et al., 1999, 2000). Θεωρητικές προσεγγίσεις από τους Khvorostyanov και Sassen, και αργότερα, από τους Jensen και λοιπούς συνεργάτες το 2005 (Jensen et al., 2005), έδειξαν ότι ο υπερκορεσμός ως προς πάγο είναι πιθανό να βρεθεί μέσα σε σύννεφα cirrus. Ακόμη, η συχνή παρατήρηση των ιχνών συμπύκνωσης από τα αεροσκάφη σε ένα καθαρό ουρανό μπορεί να εξηγηθεί μόνο λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες υπερκορεσμού ως προς πάγο. Τα στοιχεία για την ύπαρξη των ISSR επιβεβαιώθηκαν από πολλές άλλες πηγές δεδομένων κατά την πρώτη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα, συμπεριλαμβάνοντας δεδομένα από διάφορους δορυφόρους, βαθμονομημένα και διορθωμένα δεδομένα ραδιοβολίδων, καθώς και δεδομένα από εναέρια ερευνητικά προγράμματα. Αυτά τα δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό διάφορων ιδιοτήτων των ISSR.

Το τελευταίο σημαντικό βήμα για την γενική αποδοχή του φαινομένου αυτού ήταν η εφαρμογή των ISSR στο ολοκληρωμένο σύστημα προγνώσεων του ευρωπαϊκού κέντρου για μεσοπρόθεσμες μετεωρολογικές προβλέψεις τον Σεπτέμβριο του 2006 (Tompkins et al., 2007). Οπότε, χρειάστηκαν ακριβώς 100 χρόνια για να περάσουμε από τις πρώτες παρατηρήσεις του A.Wegener στην συνεισφορά των ISSRs στο πιο εξελιγμένο μοντέλο μετεωρολογικών προβλέψεων.

1.7 Πόσο σημαντικό είναι το φαινόμενο του υπερκορεσμού για την ατμόσφαιρα, τον καιρό και το κλίμα;

Για να διαπιστωθεί η σημαντικότητα ενός φαινομένου, πρέπει να αναρωτηθούμε τι θα γινόταν εάν δεν υπήρχε. Οπότε, τι θα γινόταν εάν ο υπερκορεσμός ήταν απαγορευμένος από τους φυσικούς νόμους και η μέγιστη σχετική υγρασία σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός ήταν 100%; Πρώτα από όλα θα ήταν δύσκολο έως αδύνατο να δημιουργηθεί πάγος αφού ο σχηματισμός του πάγου, ακόμα και σε ιδανικούς πυρήνες παγοκρυστάλλων, χρειάζεται μια μικρή τιμή υπερκορεσμού. Ο σχηματισμός υπέρψυχρου νερού θα ήταν αδύνατος επειδή ο κορεσμός ως προς το νερό συμβαίνει σε μεγαλύτερη συγκέντρωση υδρατμών από ότι κορεσμός ως προς τον πάγο. Εάν, για κάποιο λόγο, υπήρχε πάγος σε κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας με συνθήκες κορεσμού ως προς τον πάγο, οι παγοκρύσταλλοι δεν θα αναπτύσσονταν διότι κάθε μικρή διακύμανση της τιμής της υγρασίας θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια ενός μικρού μέρους του κρυστάλλου μέχρι την ολική εξάχνωση του. Οπότε, οι κρύσταλλοι πάγου δεν θα μπορούσαν να επιβιώσουν στην ατμόσφαιρα και όλα τα ψυχρά σύννεφα θα εξαφανίζονταν από τον ουρανό. Όμως, εάν ο υπερκορεσμός ως προς τον πάγο ήταν αδύνατος, τότε, ο υπερκορεσμός ως προς το νερό θα ήταν επίσης απαγορευμένος για τους ίδιους λόγους. Οπότε, θερμότερα σύννεφα (θερμοκρασία μεγαλύτερη από 0 °C) θα είχαν επίσης εξαφανιστεί από τον ουρανό. Ο υπερκορεσμός είναι προφανώς μία απαραίτητη συνθήκη για τον σχηματισμό σύννεφων, την ανάπτυξη κρυστάλλων πάγου και υδροσταγονιδίων και για την εκδήλωση βροχοπτώσεων μέσω της διαδικασίας Wegener - Bergeron - Findeisen ή αλλιώς το φαινόμενο της ψυχρής βροχής³.

Οπότε, εάν η συγκέντρωση των υδρατμών είναι μειωμένη τότε σχηματίζονται πολύ λιγότερα σύννεφα, συμβαίνουν λιγότερες βροχοπτώσεις και επομένως, δημιουργούνται φαινόμενα ξηρασίας και ότι συνεπάγεται από αυτό. Από την άλλη πλευρά, εάν αυξηθούν κατά πολύ οι υδρατμοί, που όπως ανέφερα στην αρχή είναι το κυριότερο θερμοκηπικό αέριο, τότε θα αυξάνεται ταυτόχρονα και η θερμοκρασία με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη και τα φυσικά επακόλουθα όπως το λιώσιμο των πάγων και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Όμως, συγκεκριμένα για την περιοχή της ανώτερης τροπόσφαιρας η μεταβολή των υδρατμών επηρεάζει ανάλογα την δημιουργία των σύννεφων *cirrus* ενώ με την σειρά τους τα νέφη αυτά έχουν δύο χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν: πρώτον, αποτρέπουν την έξοδο της

³ Εφόσον ο κορεσμός ως προς το νερό μέσα σε ένα υπέρψυχρο σύννεφο υποδεικνύει υπερκορεσμό ως προς τον πάγο, οι παγοκρύσταλλοι που με κάποιον τρόπο εισέρχονται στο σύννεφο αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς εις βάρος των σταγονιδίων του νερού τα οποία εξατμίζονται μόλις η σχετική υγρασία πέσει κάτω από το όριο του κορεσμού ως προς το νερό (δηλαδή βρισκόμαστε στο σημείο του σχήματος 1.2 όπου έχουμε υπερκορεσμό ως προς τον πάγο αλλά υποκορεσμό ως προς το νερό). Όταν το βάρος των παγοκρυστάλλων αυξηθεί αρκετά τότε πέφτουν από το σύννεφο και εάν συναντήσουν κάποιο θερμό στρώμα αέρα τότε μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής.

ακτινοβολίας που εκπέμπει η Γη με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση της μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου (το φαινόμενο αυτό θα συζητηθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο) και δεύτερον, έχουν την δυνατότητα εκδήλωσης βροχοπτώσεων μέσω του φαινομένου της ψυχρής βροχής.

Περισσότερα στοιχεία για τα υποκεφάλαια 1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.7 υπάρχουν στη έρευνα που διεξάχθηκε από τους Gierens et al. (2012), Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends, chapter 9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ο 11-ΕΤΗΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην δομή και την σημασία του Ήλιου για την Γη και εισάγεται η έννοια του ηλιακού κύκλου. Στο πλαίσιο της μελέτης του ηλιακού κύκλου αναφέρεται η συνολική δραστηριότητα του Ήλιου και οι διεργασίες από τις οποίες απαρτίζεται, η ιστορία καταγραφής του, ο τρόπος με τον οποίο ποσοτικοποιείται και καθίσταται επεξεργάσιμος ως πληροφορία και τέλος επισημαίνεται η μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα του.

2.1 Ο Ήλιος ως άστρο

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Είναι σχεδόν μια τέλεια σφαίρα με διάμετρο $1,4 \times 10^6$ Km (109 φορές μεγαλύτερη από της Γης), και η μάζα του (2×10^{30} Kg) αποτελεί το 99.86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Η φωτεινότητά του είναι τέτοια, που λόγω της έντονης διάχυσης του φωτός, κατά την διάρκεια της ημέρας δεν επιτρέπει σε άλλα ουράνια σώματα να εμφανίζονται (με εξαίρεση τη Σελήνη και σπανιότερα την Αφροδίτη). Ο Ήλιος είναι το κοντινότερο στην Γη άστρο, σε απόσταση 149×10^6 Km (1 αστρονομική μονάδα-AM). Ο Ήλιος είναι ένας κίτρινος αστέρας νάνος που βρίσκεται στην κύρια ακολουθία, με φασματικό τύπο G2V και θερμοκρασίας 5770 K. Ο Ήλιος ακολουθεί μία τροχιά μέσα στον Γαλαξία σε μία απόσταση 25.000 με 28.000 έτη φωτός από το κέντρο του, ολοκληρώνοντας μία περιφορά σε περίπου 226×10^6 έτη (Κοσμικό έτος).

πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/Ήλιος>

2.1.1 Γενικά φυσικά χαρακτηριστικά

Ο Ήλιος είναι μια αεριώδης σφαίρα που συγκρατείται λόγω της δικής του βαρύτητας και συντηρείται από την καύση των πυρηνικών αποθεμάτων της. Όπως είναι σήμερα γνωστό από την μελέτη των εξωτερικών στρωμάτων του, λίγο πριν αρχίσουν στο εσωτερικό του οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις καύσεις του υδρογόνου, είχε χημική σύσταση: υδρογόνο 72%, ήλιο

26% και 2% διάφορα άλλα στοιχεία (μέταλλα). Έχοντας υπολογίσει ότι η σημερινή περιεκτικότητα του πυρήνα του σε υδρογόνο είναι μόνο 36%, και γνωρίζοντας τους ρυθμούς καύσης του υδρογόνου, συμπεραίνεται ότι η ηλικία του Ήλιου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $4,5 \times 10^9$ έτη. Με βάση αυτά τα δεδομένα έχει υπολογιστεί ότι κάθε δευτερόλεπτο στην καρδιά του Ήλιου καίγονται 700×10^6 τόνοι υδρογόνου, παράγοντας 695×10^6 τόνους αέριου ηλίου. Το υπόλοιπο της μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια σύμφωνα με την σχέση του Αϊνστάιν: $E = mc^2$ (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

2.1.2 Ροή ακτινοβολίας από τον Ήλιο

Έχει υπολογιστεί πως κάθε τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα προς τις ηλιακές ακτίνες, στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, δέχεται ανά δευτερόλεπτο ροή ηλιακής ενέργειας ίσο με $1,36 \times 10^3 \text{ Watt/m}^2$ (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Αυτή η ροή ακτινοβολίας ονομάζεται ηλιακή σταθερά, μετριέται με ακρίβεια με ειδικά όργανα και μας παρέχει ένα μέσο υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας. Ουσιαστικά, αφού υπολογίζεται στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, αντιπροσωπεύει τη βολομετρική λαμπρότητα του Ήλιου. Παρά το όνομα της, η ηλιακή σταθερά, δεν είναι «σταθερά» αλλά υπόκειται σε περιοδικές διακυμάνσεις, εφόσον ακριβείς μετρήσεις που έγιναν από την NASA με τον δορυφόρο της Αποστολής ηλιακού μεγίστου (Solar Maximum Mission, 1980) σε ύψος 660 Km από τη Γη, απέδειξαν ότι μεταξύ των ετών 1980 και 1986 σημειώθηκε μια ελάττωση της λαμπρότητας του Ήλιου κατά 0,1% πριν αρχίσει να αυξάνει ξανά. Μετά τις προηγούμενες μετρήσεις, οι αστρονόμοι τείνουν να πιστέψουν ότι ο Ήλιος είναι ένα μεταβλητό αστέρι. Αν όμως ληφθούν υπόψη οι ρυθμοί καύσης του υδρογόνου στον πυρήνα του, είμαστε βέβαιοι ότι η λαμπρότητα του Ήλιου δεν πρόκειται να μεταβληθεί τα επόμενα 1.5 δισεκατομμύρια χρόνια. Μετά την πάροδο αυτής της μεγάλης περιόδου, ο Ήλιος θα περάσει μια μεταβατική περίοδο μερικών δισεκατομμυρίων ετών καταναλώνοντας σχετικά ήρεμα το υδρογόνο του πυρήνα έως ότου να μεταβληθεί διαστελλόμενος σε έναν ερυθρό γίγαντα. Τελικά, σήμερα πιστεύεται ότι μέχρι να τελειώσει ο Ήλιος τη ζωή του σαν λευκός νάνος θα έχουν περάσει τουλάχιστον 10 δισεκατομμύρια χρόνια από την στιγμή της δημιουργίας του. Όντως, με γνωστή και ορισμένη την ηλιακή σταθερά S και την αστρονομική μονάδα (1 astronomical unit- AU) η φωτεινότητα του ήλιου ισούται με $3,82 \times 10^{33} \text{ erg/s}$. Από αυτήν την ισχύ η Γη δέχεται μόνο το ένα δισεκατομμυριοστό, υπό μορφή ηλιακού φωτός που επανεκπέμπεται, όμως, στο διάστημα με την μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ευτυχώς για εμάς, υπάρχει ένα ενεργειακό ισοζύγιο που

διατηρεί την ζωή στην Γη και δεν την μεταβάλλει σε έναν αφιλόξενο για τον άνθρωπο πλανήτη, όπως είναι τα υπόλοιπα μέλη του ηλιακού συστήματος (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

2.2 Η σημασία του Ηλίου για τη Γη

Γενικά, η συμβολή της ηλιακής ενέργειας, στα χαρακτηριστικά του πλανήτη μας είναι τεράστια και μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται στις επιδράσεις στο κλίμα και το περιβάλλον και η άλλη στις επιδράσεις στην βιολογία.

2.2.1 Επιδράσεις στο γήινο κλίμα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η γη αυξομειώνεται με βάση τον ηλιακό κύκλο. Έτσι, είναι εύλογο αυτή η διακύμανση να επηρεάζει κάποιους κλιματικούς παράγοντες στην Γη όπως είναι η θερμοκρασία (η θερμοκρασία του πλανήτη χωρίς την εισερχόμενη ενέργεια του Ηλίου θα ήταν -218°C), το ετήσιο πάχος των δακτυλίων των δέντρων, τις κοινές βροχοπτώσεις καθώς και το ύψος της στάθμης λιμνών και ποταμών (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012). Επιπροσθέτως, σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται εάν και κατά πόσο ο ηλιακός κύκλος επηρεάζει την ποσότητα των υδρατμών στην ανώτερη τροπόσφαιρα και κατ' επέκταση την δημιουργία σύννεφων Cirrus, την αύξηση της θερμοκρασίας μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου (κεφάλαιο 3) και την αύξηση βροχοπτώσεων μέσω ενός διαφορετικού μηχανισμού που ονομάζεται φαινόμενο ψυχρής βροχής (κεφάλαιο 1).

Ακόμη, μέσω του ηλιακού ανέμου ο Ήλιος είναι υπεύθυνος για ένα φαινόμενο εξαιρετικής ομορφιάς, το βόρειο σέλας. Σέλας ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο εμφανίζονται στον ουρανό κινούμενες πολύχρωμες ταινίες κεντραρισμένες πάνω από τους μαγνητικούς πόλους της Γης. Η ταινία αυτή περιβάλλεται από μία ζώνη απαλής αίγλης, που ονομάζεται διάχυτο σέλας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στους δύο πόλους της Γης αλλά και σε άλλους πλανήτες, όπως ο Δίας, και δημιουργείται όταν σωματίδια μεγάλης ταχύτητας συγκρουστούν με άτομα οξυγόνου και αζώτου της γήινης ατμόσφαιρας. Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από τον ηλιακό άνεμο και συγκρούονται με την ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης, αλλά λόγω της ύπαρξης μαγνητικού πεδίου, αποκλίνουν προς τους πόλους. Τότε προκαλούνται φαινόμενα φθορισμού με αποτέλεσμα να εκπέμπεται ακτινοβολία στα οπτικά, ραδιοφωνικά, υπέρυθρα και υπεριώδη μήκη κύματος, καθώς και στην περιοχή των ακτινών X (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).



Σχήμα 2.1 Στιγμιότυπο από βίντεο του σέλαος όπως φαίνεται από τον διεθνή διαστημικό σταθμό. Σεπτέμβριος 2011.

Πηγή : http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20110917-aurora-space.html

2.2.2 Επιδράσεις στην γήινη βιολογία

Η σημασία του Ήλιου στην εξέλιξη και την διατήρηση της ζωής στην Γη είναι καίρια, καθώς με τη θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών. Όπως όλοι γνωρίζουμε τα φυτά, έχοντας ως υλικά το φως από τον ήλιο, το νερό από το έδαφος και το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, και μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης αναπτύσσονται και εμπλουτίζουν την ατμόσφαιρα με οξυγόνο. Ο ηλιακός κύκλος φαίνεται να παίζει και εδώ τον ρόλο του καθώς βρέθηκε ότι κατά την διάρκεια των περιόδων μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας τα δέντρα μεγαλώνουν πιο γρήγορα, δηλαδή δημιουργούν πιο φαρδύς δακτυλίους ανά έτος. Φαίνεται λογικό καθώς σε αυτές τις περιόδους υπάρχει έντονη υπεριώδης ακτινοβολία και άρα περισσότερη «τροφή» για τα δέντρα (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Τέλος, δεν θα μπορούσε να παραληφθεί το γεγονός πως η αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα, δηλαδή η αυξημένη υπεριώδης ακτινοβολία, οδηγεί σε αρνητικές επιπτώσεις για την ανθρώπινη υγεία όπως είναι τα εγκαύματα, ο καρκίνος και η γήρανση του δέρματος και οι βλάβες στους ιστούς των οφθαλμών και το ανοσολογικό σύστημα.

Πηγή: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1304-positive-and-negative-effects-of-uv>

2.3 Η ηλιακή δραστηριότητα

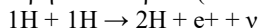
2.3.1 Δομή του Ηλίου

Προκειμένου να κατανοηθούν οι διεργασίες που συμβαίνουν στον Ήλιο θα πρέπει να αναγνωριστούν οι περιοχές από τις οποίες απαρτίζεται και να αντιστοιχιστεί κάθε φαινόμενο σε κάθε περιοχή. Αρχικά, στο κέντρο του Ήλιου υπάρχει ο πυρήνας του. Ως πυρήνα του Ήλιου θεωρείται η κεντρική περιοχή του, με ακτίνα περίπου 25% της ηλιακής, που περιέχει το 10% περίπου της μάζας και στην οποία η θερμοκρασία είναι πάρα πολύ υψηλή, έτσι ώστε μέσω της σύντηξης του υδρογόνου σε ήλιο να παραχθεί το σύνολο της ενέργειας του μέσω της αντίδρασης πρωτονίου-πρωτονίου⁴. Η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή φτάνει τους $1,5 \times 10^6$ K, η πίεση τις $1,3 \times 10^9$ atm, ενώ η πυκνότητα περίπου τα 156 gr/cm^3 . Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ύλη στον πυρήνα του Ηλίου, που αποτελεί το 90% της μάζας, βρίσκεται υπό μορφή ατομικών πυρήνων και ηλεκτρονίων που αποχωρίστηκαν από αυτούς. Η ενέργεια σε αυτές τις περιοχές ακτινοβολείται υπό μορφή φωτονίων υψηλής ενέργειας, ακτινών γ και ακτινών χ . Γενικά, σημαντική πηγή πληροφοριών για ότι συμβαίνει ακριβώς στον πυρήνα του Ήλιου αποτελούν τα νετρίνα που απελευθερώνονται κατά την αντίδραση πρωτονίου - πρωτονίου (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

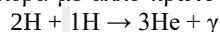
Η αμέσως επόμενη περιοχή του πυρήνα είναι η ζώνη ακτινοβολίας και απλώνεται μέχρι το 85% της ηλιακής ακτίνας. Οι θερμοκρασίες του χώρου αυτού κυμαίνονται μεταξύ 8×10^6 K και 5×10^5 K ανάλογα το βάθος, ενώ η ενέργεια διαμέσου αυτού του στρώματος διαδίδεται με έναν χαρακτηριστικό τρόπο που τον ονομάζουμε «διάδοση της ενέργειας με ακτινοβολία». Αυτό σημαίνει ότι η ακτινοβολία που παράγεται στις περιοχές του πυρήνα, καθώς προσπαθεί να βγει προς τις εξωτερικές στιβάδες του Ήλιου, αρχίζει να απορροφάται από τα πυκνά στρώματα της ζώνης ακτινοβολίας και στην συνέχεια επανεκπέμπεται. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει ξανά και ξανά σχεδόν σε κάθε εκατοστό βάθους, μέχρι την στιγμή που η ενέργεια του πυρήνα θα φτάσει στην επόμενη περιοχή, την ζώνη μεταφοράς. Όπως είναι γνωστό σήμερα, με τον προηγούμενος αναφερθέντα τρόπο η ενέργεια του πυρήνα, που παράγεται εκείνη την στιγμή, θα κάνει 8.000 έως 80.000 χρόνια μέχρι να ξεφύγει από την ζώνη ακτινοβολίας (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

⁴ Ο κύκλος πρωτονίου πρωτονίου αποτελείται από 3 στάδια:

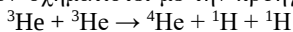
A) Αρχικά δυο πρωτόνια σχηματίζουν έναν πυρήνα δευτερίου (ισότοπο του υδρογόνου) παράγοντας ένα ποζιτρόνιο και ένα νετρίνο



B) Στη συνέχεια ο πυρήνας του δευτερίου αντιδρά με άλλο πρωτόνιο σχηματίζοντας ένα ακόμη βαρύτερο πυρήνα, το ήλιο-3 εκπέμποντας ταυτόχρονα ένα φωτόνιο



Γ) Και τέλος δυο πυρήνες ήλιου-3 που έχουν σχηματιστεί με την προηγούμενη διαδικασία συντήκονται σχηματίζοντας ένα πυρήνα ήλιου-4 και δυο πρωτόνια.



Η επόμενη περιοχή λέγεται ζώνη μεταφοράς. Ως ζώνη μεταφοράς θεωρείται η περιοχή που εκτείνεται πέρα της ζώνης ακτινοβολίας μέχρι την επιφάνεια του ορατού Ήλιου. Η θερμοκρασία της περιοχής αυτής κυμαίνεται μεταξύ 5×10^5 K και $6,6 \times 10^3$ K αναλόγως του βάθους, ενώ η ενέργεια διαδίδεται διαμέσου αυτής της περιοχής με μεταφορά. Αυτό σημαίνει ότι θερμές και ρευστές μάζες από τα κατώτερα στρώματα αυτής της περιοχής κινούνται προς την επιφάνεια του Ήλιου και από κει αφού ψυχθούν αποβάλλοντας την ενέργεια τους, ξανακυλούν προς το εσωτερικό, αναθερμαίνονται και ξαναρχίζουν την ανοδική πορεία τους προς την φωτόσφαιρα επαναλαμβάνοντας αδιάκοπα το ίδιο φαινόμενο. Με τον τρόπο αυτόν, ενέργεια από το θερμότερο εσωτερικό του Ήλιου μεταφέρεται προς τις εξωτερικές και ψυχρότερες ηλιακές περιοχές. Η ύπαρξη της περιοχής της ζώνης μεταφοράς, διαπιστώνεται μέσω της μελέτης των φωτοσφαιρικών κόκκων που δεν είναι κάτι άλλο από τις κορυφές αυτών των ρευμάτων μεταφοράς μάζας (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Η τελευταία περιοχή ονομάζεται φωτόσφαιρα. Αποτελεί μια λεπτή περιοχή των τελευταίων 500 χιλιομέτρων της ζώνης μεταφοράς και είναι η περιοχή όπου οι τιμές της αδιαφάνειας είναι μικρότερες και έτσι η ακτινοβολία μπορεί να την διαπεράσει και να ξεχυθεί στον μεσοπλανητικό χώρο. Συνεπώς, η φωτόσφαιρα είναι η στιβάδα εκείνη από την οποία εκπέμπονται τα φωτόνια του συνεχούς ηλιακού φάσματος. Η θερμοκρασία αυτής της περιοχής κυμαίνεται από 4.300 K μέχρι 6.600 K αναλόγως του βάθους και είναι η πηγή ολόκληρης της ηλιακής ακτινοβολίας, που διαμορφώνει την εικόνα αυτού που ονομάζεται ορατό φωτεινό δίσκο του Ήλιου. Δηλαδή από την φωτόσφαιρα αναδύεται το σύνολο σχεδόν της ορατής ακτινοβολίας που παράγεται στον πυρήνα του Ήλιου και μας δίνει την αίσθηση του φωτεινού δίσκου που εμφανίζεται στο ορατό φως. Επιπλέον, το φως αυτό φθάνει σχεδόν αμείωτο στον γήινο παρατηρητή γιατί η πυκνότητα της υπόλοιπης ατμόσφαιρας του Ήλιου είναι πολύ μικρή και έτσι το ποσοστό του φωτός που απορροφά πρακτικά είναι αμελητέο. Το πάχος της φωτόσφαιρας είναι πολύ μικρό σε σχέση με την ηλιακή ακτίνα ($<0,1\%$) και έτσι η φωτόσφαιρα συνήθως θεωρείται ως η επιφάνεια του Ήλιου. Η ηλιακή φωτόσφαιρα μελετάται με άμεσες παρατηρήσεις από τη Γη και το διάστημα (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Επιπροσθέτως, όπως η επιφάνεια της Γης περιβάλλεται από ένα αέριο στρώμα, την γήινη ατμόσφαιρα, χωρισμένο σε ζώνες, το ίδιο συμβαίνει και στον ήλιο και λέγεται ηλιακή ατμόσφαιρα. Η πρώτη ζώνη ονομάζεται χρωμόσφαιρα και φτάνει μέχρι τα όρια των 12.000 χιλιομέτρων πάνω από την φωτόσφαιρα ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται συναρτήσει του ύψους, από τους 4.300 K μέχρι τους 10.000 K. Μετά την χρωμόσφαιρα διακρίνεται μια περιοχή της ηλιακής ατμόσφαιρας, η μεταβατική ζώνη, πάχους περίπου 500 χιλιομέτρων στην οποία υπάρχει μία παράξενη αύξηση της θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους και φτάνει απότομα σε μερικές

δεκάδες χιλιάδες βαθμούς Κ. Στην συνέχεια, ακριβώς μετά την μεταβατική ζώνη, αρχίζει να σχηματίζεται μία άλως λευκού γενικά χρώματος, που αποτελεί το τελευταίο στρώμα της ηλιακής ατμόσφαιρας, το στέμμα. Το στέμμα αποτελείται από υψηλής ενέργειας σωματίδια, μαγνητικά πεδία και μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως δεν υπάρχουν εξωτερικά όρια του στέμματος καθώς η περιοχή αυτή, με την μορφή μιας συνεχούς ροής σωματιδίων, που ονομάζεται ηλιακός άνεμος, επεκτείνεται μέχρι τα τελευταία όρια του πλανητικού μας συστήματος. Πάντως, οι τελευταίες παρατηρήσεις αναφέρουν πως το στέμμα εκτείνεται μέχρι την ηλιόπαυση όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου εξισώνεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μεσοαστρικού χώρου. Συνήθως όμως, ως στέμμα ορίζεται το υλικό που περιβάλλει την χρωμόσφαιρα και εκτείνεται μέχρι 10 ηλιακές ακτίνες (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Τα φαινόμενα που παρατηρούνται πάνω στην φωτόσφαιρα αλλά και στην ηλιακή ατμόσφαιρα συνιστούν αυτό που αποκαλείται ήρεμος Ήλιος. Πέραν από τα φαινόμενα του ήρεμου Ήλιου, το άστρο αυτό συνταράσσεται και από πιο βίαια, περιοδικά ή έκτακτα φυσικά φαινόμενα τα οποία του προσδίδουν μία πιο εκρηκτική πλευρά. Το σύνολο αυτών των φαινομένων που δημιουργούνται στην φωτόσφαιρα και την ηλιακή ατμόσφαιρα ονομάζεται ηλιακή δραστηριότητα (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

2.3.2 Εκρηκτικά φαινόμενα

Τα σημεία εκδήλωσης της ηλιακής δραστηριότητας ονομάζονται κέντρα δράσης και παρουσιάζονται αποκλειστικά σε δύο ζώνες ηλιογραφικών πλατών 5° έως 40° βόρεια και νότια του ηλιακού ισημερινού. Κάθε ένα από αυτά τα φαινόμενα θεωρείται αποτέλεσμα κάποιου άλλου, και συνοδεύεται από την ύπαρξη ισχυρότατων μαγνητικών πεδίων. Όπως έχει παρατηρηθεί, σε περίοδο μέγιστου της ηλιακής δραστηριότητας, τα κέντρα δράσης είναι δυνατόν να καλύπτουν το 20%-30% του ηλιακού δίσκου. Παρά την φαινομενικά «έκτακτη» εμφάνιση των κέντρων δράσης, μακροχρόνιες παρατηρήσεις της έντασης, του αριθμού, αλλά και της μορφής της ηλιακής δραστηριότητας, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα φαινόμενα αυτά είναι περιοδικά και τα περισσότερα συμπληρώνουν έναν πλήρη κύκλο ζωής κάθε 11 χρόνια. Η περίοδος αυτή ονομάζεται κύκλος ηλιακής δράσης ή ηλιακός κύκλος. Γενικά τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται σε περιοχές της ηλιακής φωτόσφαιρας αλλά και σε όλες τις περιοχές της ηλιακής ατμόσφαιρας (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

2.3.2.1 Φωτόσφαιρα

Ξεκινώντας από την περιοχή της φωτόσφαιρας, εάν μελετηθεί μέσω των ακτινοβολιών που εκπέμπει στα ορατά μήκη κύματος, θα παρατηρηθεί ένα κέντρο δράσης να εμφανίζεται σαν μία μικρή λαμπρή περιοχή, η οποία, λόγω του φαινομένου της αμαύρωσης χείλους⁵, φαίνεται καλύτερα όταν εμφανίζεται στα άκρα του ηλιακού δίσκου και ονομάζεται πυρσός (facula). Οι πυρσοί είναι λαμπροί φωτοσφαιρικοί κόκκοι αρκετά μεγάλων διαστάσεων και με μέσο χρόνο ζωής 15 ημερών, οι οποίοι σταδιακά αποκτούν ένα περίπου μακρόστενο σχήμα, έχοντας το δυτικό τους άκρο προσανατολισμένο έτσι, ώστε να πλησιάζει τον ισημερινό περισσότερο από όσο το αντίστοιχο ανατολικό τους άκρο. Αυτό το φαινόμενο συνοδεύεται από υψηλό μαγνητικό πεδίο που προσεγγίζει τα 800 Gauss. Εάν παρατηρήσουμε την εξέλιξη αυτού του φαινομένου μπορούμε να δούμε ότι στην περιοχή του δυτικού άκρου το μακρόστενο πλέον πυρσού εμφανίζονται κάποιες σκοτεινές περιοχές (διαμέτρου 1 – 5'' τόξου) που ονομάζονται πόροι (pores). Οι πόροι αυτοί έχουν την δυνατότητα να εξελιχθούν σε κηλίδες (sunspots) οι οποίες είναι ευρύτεροι σκοτεινοί σχηματισμοί. Όμως, η ύπαρξη πυρσών και πόρων δεν συνεπάγεται την δημιουργία κηλίδων όπως επίσης και η ύπαρξη πυρσών δεν σημαίνει απαραίτητα την δημιουργία πόρων (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Μελετώντας με λεπτομέρεια την δομή μίας κηλίδας, μπορεί να διακριθεί μια κεντρική περιοχή, πολύ σκοτεινή και ψυχρότερη κατά 2.000 K από την ηλιακή φωτόσφαιρα, την οποία ονομάζουμε σκιά της κηλίδας (umbra). Μέσα στην σκιά δεν μπορούν να διακριθούν περισσότερες λεπτομέρειες. Γύρω από την κεντρική αυτή σκοτεινή περιοχή, εντοπίζεται μία λιγότερη σκοτεινή ζώνη, η παρασκιά (penumbra) που όπως διαπιστώνεται, χαράσσεται από ένα δίκτυο φωτεινών και σκοτεινών νημάτων (filaments), τα οποία φαίνονται διατεταγμένα ακτινικά ως προς το υποθετικό κέντρο της σκιάς. Ο σπουδαίος Αμερικανός αστρονόμος George Ellery Hale (1868-1938) το 1908 ανακάλυψε πως οι κηλίδες παρουσιάζουν έντονο μαγνητικό πεδίο (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Λίγες μέρες μετά την εμφάνιση της πρώτης κηλίδας στο δυτικό άκρο του πυρσού (δυτική κηλίδα), αρχίζει να σχηματίζεται μια νέα στο ανατολικό του άκρο (ανατολική κηλίδα). Οι δύο αυτές κηλίδες, καθώς ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του από τα ανατολικά προς τα δυτικά, φαίνονται σαν να κινούνται στον ηλιακό δίσκο με την δυτική κηλίδα να προηγείται και να ακολουθείται από την ανατολική κηλίδα. Επομένως, η δυτική κηλίδα ονομάζεται ηγούμενη και η ανατολική επόμενη. Οι δύο αυτές κηλίδες αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα ενώ τα

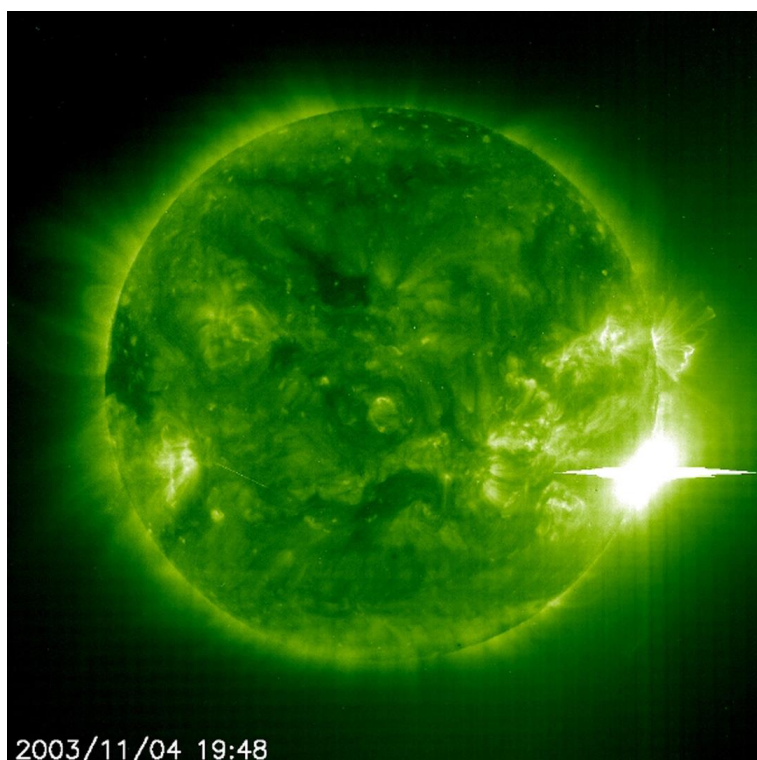
⁵ Εάν παρατηρηθεί με κατάλληλα όργανα η λαμπρότητα των διάφορων περιοχών του ορατού ηλιακού δίσκου, θα διαπιστωθεί ότι μειώνεται βαθμιαία από το κέντρο προς το χείλος του. Αυτό το φαινόμενο καλείται αμαύρωση χείλους και χαρακτηρίζει τον ήρεμο ήλιο.

μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται στην περιοχή των δύο αυτών κηλίδων έχουν αντίθετη πολικότητα. Όπως αναφέραμε, ο ρυθμός εμφάνισης των κηλίδων ακολουθεί το 11-ετή ηλιακό κύκλο ενώ οι κηλίδες έχουν χρόνο ζωής μικρότερο από 11 ημέρες και μέσο μήκος περίπου 10^4 Km (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

2.3.2.2 Χρωμόσφαιρα

Φτάνοντας στην ηλιακή χρωμόσφαιρα, εάν παρατηρηθούν φασματοηλιογραφήματα μπορεί να διαπιστωθεί ότι λίγο μετά την εμφάνιση ενός φωτοσφαιρικού πυρσού σχηματίζονται στην χρωμόσφαιρα λαμπρές περιοχές, τις οποίες ονομάζονται λαμπρές εκτάσεις (plages) ή χρωμοσφαιρικούς πυρσούς. Όπως υποδηλώνουν και τα ονόματα τους, τόσο οι φωτοσφαιρικοί όσο και οι χρωμοσφαιρικοί πυρσοί είναι εκδηλώσεις του ίδιου φαινομένου, αλλά σε διαφορετικές περιοχές της ηλιακής ατμόσφαιρας. Εξετάζοντας προσεκτικά τις ηλιακές περιοχές μέσα και γύρω από αυτούς τους σχηματισμούς, παρατηρούνται δέσμες σκοτεινών γραμμών να τους χωρίζουν σε δύο περιοχές αντίθετης μαγνητικής πολικότητας. Οι δέσμες αυτές ονομάζονται νήματα (filaments). Τα νήματα, όταν σχηματίζονται στο χείλος του φαινομένου δίσκου της χρωμόσφαιρας, προβάλλονται πάνω στον σκοτεινό ουρανό σαν καμπύλοι πίδακες από φλόγες που χάνονται βαθιά μέσα στο στέμμα. Τα νήματα υπό αυτήν την μορφή ονομάζονται προεξοχές (prominences). Οι προεξοχές μπορεί να έχουν χρόνο ζωής μερικών μηνών, μήκος περίπου 200.000 Km και πάχος 7.000 Km και να χαρακτηρίζονται ήρεμες ή να μεταβάλλονται γρήγορα και βίαια με χρόνο ζωής από μερικά λεπτά έως λίγες ώρες. Σήμερα, θεωρείται πως οι προεξοχές δημιουργούνται από στεμματικό υλικό το οποίο συμπυκνώνεται και σταθεροποιείται σε θέσεις που καθορίζονται από την μορφή του μαγνητικού πεδίου (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Ένα άλλο φαινόμενο που αν και έχει την βάση του στην φωτόσφαιρα, πραγματοποιείται στα στρώματα της χρωμόσφαιρας, είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (flares). Οι ηλιακές εκλάμψεις σχετίζονται άμεσα με τις ηλιακές κηλίδες. Μόλις σχηματοποιηθεί ένα ζευγάρι κηλίδων πάνω στην ηλιακή φωτόσφαιρα και για όσο χρόνο διατηρείται στην ζωή, παρατηρείται μία έκρηξη, δηλαδή απότομη απελευθέρωση υλικού και ενέργειας σε όλα τα μήκη κύματος από τις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο κηλίδες. Άμεσο αποτέλεσμα αυτής της βίαιης έκρηξης είναι η αύξηση της λαμπρότητας του ηλίου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται έκλαμψη και μπορεί να κρατήσει από 20 λεπτά έως και 3 ώρες. Ως αίτιο δημιουργίας των εκλάμψεων θεωρείται η αστάθεια του μαγνητικού πεδίου στις περιοχές όπου εμφανίζονται. Ακόμη, οι εκλάμψεις μέσω μιας σειράς διεργασιών προκαλούν έντονες αυξήσεις στην ένταση της ραδιοφωνικής ακτινοβολίας του Ήλιου που καλούνται ραδιοεξάρσεις (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).



Σχήμα 2.2 Μία ισχυρή έκλαμψη που απθανاتیστηκε στις 4 Νοεμβρίου το 2003 στο υπεριώδες φως.

Πηγή: <https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-solar-flare> από ESA & NASA/SOHO

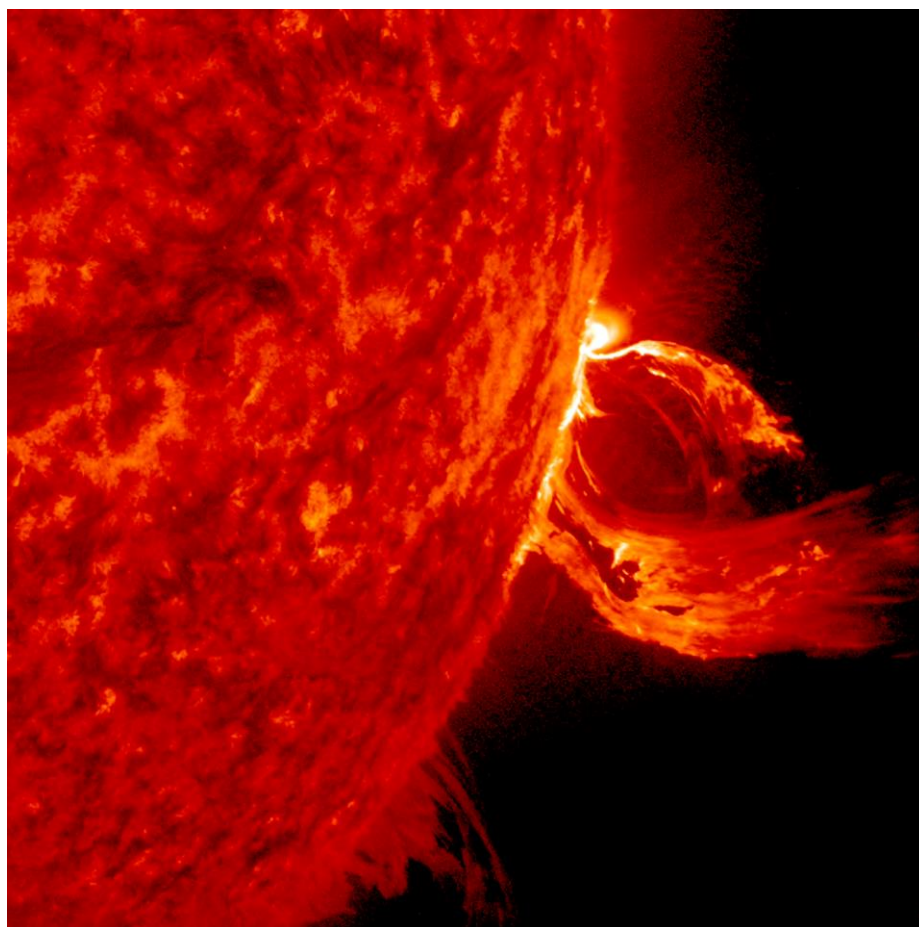
2.3.2.3 Ηλιακό στέμμα

Όπως έχει αποδειχθεί, η ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζει την δομή και την μορφή του ηλιακού στέμματος. Έτσι, κατά το μέγιστο του ηλιακού κύκλου οι περιοχές δράσης στο στέμμα εμφανίζονται στο λευκό φως σαν περιοχές μεγάλης πυκνότητας και θερμοκρασίας. Εξάλλου, κατά την περίοδο του ελάχιστου της ηλιακής δραστηριότητας η έκταση του στέμματος περιορίζεται, δηλαδή δεν αγκαλιάζει πλέον σφαιρικά τον ήλιο, αλλά παρουσιάζει μια σημαντική πλάτυνση στην περιοχή του ηλιακού ισημερινού. Εκτός όμως των προηγούμενων φαινομένων σε περιοχές του στέμματος όπου υπάρχει ασθενές μαγνητικό πεδίο εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές που ονομάζονται στεμματικές οπές (coronal holes) (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).

Τέλος, υπάρχουν και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας που ίσως να είναι και το πιο βίαιο – θεαματικό από όλα τα ηλιακά φαινόμενα. Τα φαινόμενα των ηλιακών εκλάμψεων ή των μεγάλων ηλιακών προεξοχών που αναφέραμε προηγουμένως, συνοδεύονται μερικές φορές από Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs, Coronal Mass Ejections), γνωστές και ως «στεμματικά παροδικά φαινόμενα» (coronal transients). Αυτές είναι τεράστιοι βρόχοι

στεμματικού υλικού (αποτελούμενου κυρίως από ιόντα υδρογόνου, σε μικρότερο ποσοστό ηλίου και σε μικρές ποσότητες βαρύτερων στοιχείων) που ταξιδεύουν προς τα έξω, μακριά από τον ήλιο, με ταχύτητες πάνω από 1 εκατομμύριο την ώρα και ενέργειες δεκαπλάσιες της ενέργειας της ηλιακής εκλάμψεως ή προεξοχής που τις συνοδεύει. Κάποιες μεγάλες εκτοξεύσεις μπορούν να προωθήσουν προς το διάστημα εκατοντάδες εκατομμύρια τόνους ύλης με ταχύτητα περίπου 1,5 εκατομμύριο χιλιόμετρα την ώρα.

πηγή: https://el.wikipedia.org/wiki/Αστρικό_στέμμα



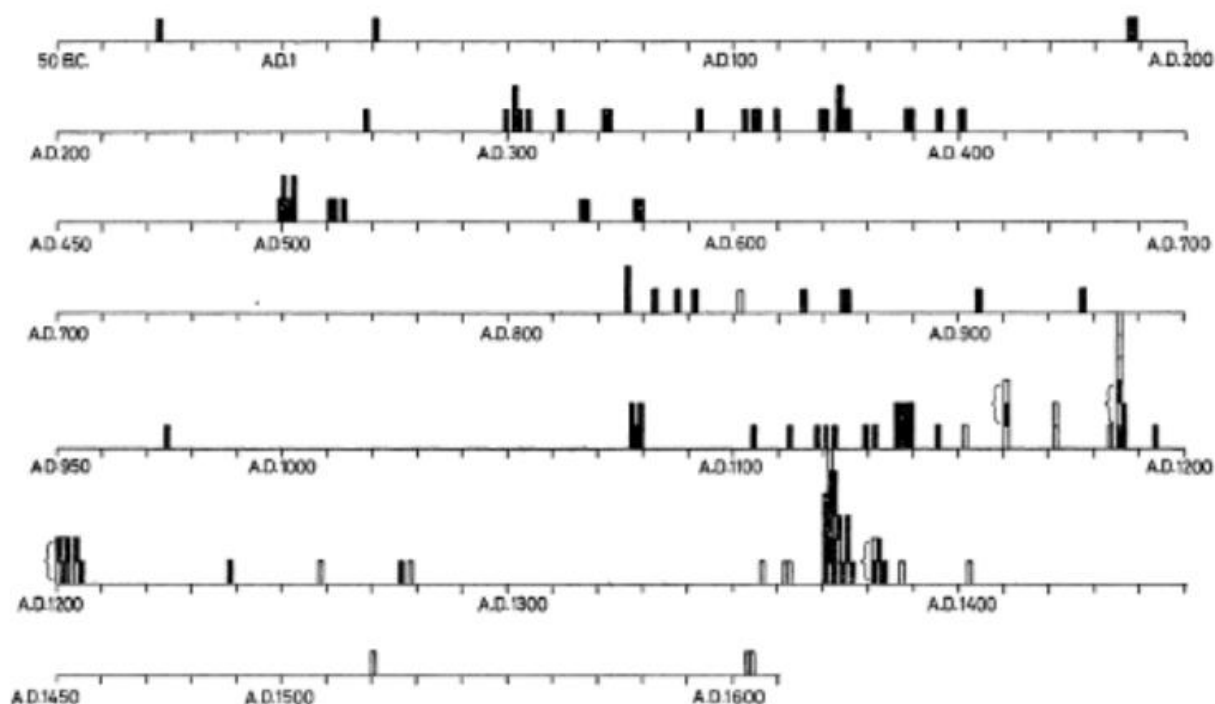
Σχήμα 2.3 Εκτεταμένη στεμματική εκτίναξη στα πλάγια του ηλιακού δίσκου δίνοντάς μια υπέροχη εικόνα προφίλ (17 έως 18 Ιουν 2015). Ενώ κάποια από την ποσότητα του πλάσματος πέφτει ξανά στον ήλιο, ένα μεγάλο σύννεφο σωματιδίων ξεφεύγει στο διάστημα. Η εικόνα είναι στο υπεριώδες φως.

Πηγή: <http://www.nasa.gov/image-feature/goddard/sdo/potw635-cme-blow-out>

2.4 Ιστορία καταγραφής ηλιακών κηλίδων

2.4.1 Πρώιμες αναφορές

Οι πρώτες αναφορές σε ηλιακές κηλίδες υπήρξαν στα μέσα του τέταρτου αιώνα προ Χριστού από τον Θεόφραστο, μαθητή του Αριστοτέλη. Όμως, όπως αναφέρουν οι Bray και Loughhead (1965) για τις πρώτες συστηματικές παρατηρήσεις των ηλιακών κηλίδων θα πρέπει να γίνει ένα ταξίδι στην κίνα. Κατά την περίοδο 28 π.Χ. - 1638 μ.Χ. υπάρχουν 112 περιγραφές από σημαντικού μεγέθους ηλιακές κηλίδες σε διάφορες επίσημες ιστορικές παρατηρήσεις χωρίς να συμπεριληφθούν αναφορές από λιγότερο αξιόπιστες πηγές. Άλλες αναφορές σε παραπλήσια χρονικά έχουν βρεθεί σε Ιαπωνία και Κορέα. Αντίθετα, στην δυτική βιβλιογραφία της ίδιας περιόδου, οι αναφορές παρατηρήσεων ηλιακών κηλίδων με γυμνό μάτι είναι πολύ σπάνιες και αποσπασματικές. Λέγεται ότι αυτό οφείλεται στον σεβασμό για την διδασκαλία του Αριστοτέλη, ο οποίος υποστήριζε ότι ο ήλιος είναι ένα τέλειο σώμα χωρίς ψεγάδια (κηλίδες). Μια γνώμη η οποία όντως έγινε μέρος της χριστιανικής ορθόδοξης θεολογίας κατά την διάρκεια του μεσαίωνα. Η πρώτη αναφορά σε ηλιακή κηλίδα μετά τον Θεόφραστο ήταν στο έργο «Einhard's life of carlomagne» περιγράφοντας μία κηλίδα το έτος 807 μ.Χ. αλλά παρερμηνεύοντας την ως διάβαση του πλανήτη Ερμή. Ο Abul- fadl ja'far ibn al-muktafi (906-977 μ.χ.) αναφέρει ότι ο φιλόσοφος al kindi παρατήρησε μία κηλίδα τον Μάιο του 840 μ.χ. και την παρερμήνευσε επίσης με μία διάβαση της Αφροδίτης. Μέσα από την ρώσικη ιστορία του 14^{ου} αιώνα υπάρχουν περιγραφές ηλιακών κηλίδων στα έτη 1365 και 1371 μ.Χ. μέσα από την θαμπάδα του καπνού από δασικές πυρκαγιές. Άλλες παρατηρήσεις χρονολογούνται από το 1200 μ.χ. (από τον Ibn Rushd) και το 1450 μ.Χ. (από τον Guido Carrara και τον γιο του Giovanni). Παρόλα αυτά, η αντίληψη της τελειότητας του ήλιου κράτησε έως την αυγή της εποχής του τηλεσκοπίου. Ακόμα και ο Johan Kepler (1571-1630 μ.χ.) παρερμήνευσε μία ηλιακή κηλίδα στις 18 Μαΐου το 1607 με μία ακόμα διάβαση του Ερμή (Bray και Loughhead, 1965).



Σχήμα 2.4 Παρατηρήσεις ηλιακών κηλίδων πριν την εποχή του τηλεσκοπίου κατά την ανατολή. Κάθε στήλη αναπαριστά μία μοναδική παρατήρηση. Οι γεμισμένες στήλες είναι από την Κίνα ενώ οι άδειες από την Ιαπωνία ή την Κορέα (Clark and Stephenson, 1978).

2.4.2 Εισαγωγή του τηλεσκοπίου

Οι παρερμηνεύσεις αυτές σταμάτησαν το 1611 την χρονιά όπου το τηλεσκόπιο προστέθηκε στα όργανα παρατήρησης. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η ανάπτυξη της ηλιακής φυσικής αλλά και του γενικότερου τομέα της αστροφυσικής από τέσσερις επιστήμονες, τον Johann Goldsmid (1587-1616) στην Ολλανδία, το Galileo Galilei (1564 – 1642) στην Ιταλία, τον Christopher Scheiner (1573 – 1650) στην Γερμανία και τον Thomas Harriot (1560 – 1621) στην Αγγλία. Γενικά δεν είναι γνωστό ποιος από αυτούς ήταν ο πρώτος που έκανε παρατηρήσεις με το τηλεσκόπιο, αλλά ο πρώτος που δημοσίευσε πληροφορίες ήταν σίγουρα ο Ολλανδός (Bray και Loughhead, 1965).

2.4.3 Η ανακάλυψη του φαινομένου Wilson

Το 1769, κατά τη διάρκεια του δεύτερου καταγεγραμμένου ηλιακού κύκλου στην ιστορία, ένας Σκωτσέζος αστρονόμος, ο Alexander Wilson, που εργαζόταν στο αστεροσκοπείο Macfarlane, παρατήρησε ότι το σχήμα των ηλιακών κηλίδων γινόταν αισθητά πιο πεπλατυσμένο καθώς πλησίαζαν στο άκρο του ηλιακού δίσκου, λόγω της ηλιακής περιστροφής. Αυτές οι

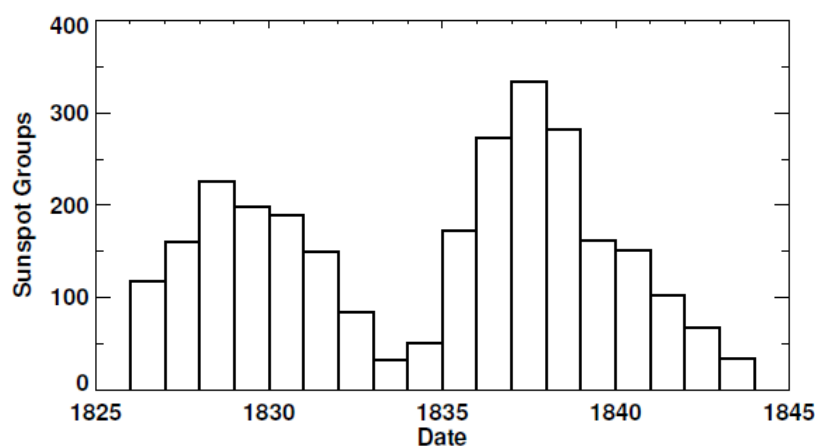
παρατηρήσεις έδειξαν ότι οι ηλιακές κηλίδες ήταν χαρακτηριστικές επιφάνειες για το ήλιο, σε αντίθεση με μικρούς πλανήτες ή άλλα αντικείμενα που περνούσαν από μπροστά του. Επιπλέον, παρατήρησε αυτό που ονομάζεται φαινόμενο Wilson. Το 1769 έπεσε στην αντίληψη του μία πολύ μεγάλη ηλιακή κηλίδα η οποία κατευθυνόταν στο δυτικό ημισφαίριο του ηλιακού δίσκου. Στην αρχή η παρασκία της κηλίδας είχε ένα ομοιόμορφο κυκλικό σχήμα ενώ όσο πλησίαζε στο άκρο τότε συμπιεζόταν και στην συνέχεια εξαφανιζόταν τελείως. Επιπλέον, όταν η κηλίδα ξαναεμφανιζόταν από το αντίθετο άκρο μερικές εβδομάδες μετά παρακολουθούσε ξανά το ίδιο φαινόμενο, αυτή την φορά αντίστροφα. Για να εξηγήσει αυτή την συμπεριφορά υπέθεσε ότι οι κηλίδες πρόκειται για εσοχές στην επιφάνεια του ήλιου οι οποίες σχηματίζονται από την απώλεια φωτεινού υλικού το οποίο πίστευε ότι κάλυπτε το μαύρο εσωτερικό του Ήλιου. Όμως, οι Bray and Loughhead (1965) υποστήριξαν ότι το φαινόμενο Wilson οφείλεται στην υψηλότερη διαφάνεια που έχει το υλικό της κηλίδας σε σχέση με την υπόλοιπη φωτόσφαιρα.

2.4.4 Η ανάπτυξη της θεωρίας για τον ηλιακό κύκλο

Παρόλο που ο Christian Horrebow αναφέρει την πιθανή περιοδική μεταβλητότητα της ηλιακής δραστηριότητας το έτος 1876 (Hathaway, 2015) η θεωρία του ηλιακού κύκλου αναπτύχθηκε από τον Heinrich Schwabe (1780-1875) από το Dessau της Γερμανίας. Σε αυτή την χρονιά ο Heinrich Schwabe ανέφερε στο *Astronomische Nachrichten* ότι οι παρατηρήσεις του για τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων και των ημερών όπου δεν υπήρχαν ηλιακές κηλίδες για μία περίοδο 18 χρόνων υποδεικνύουν την παρουσία ενός ηλιακού κύκλου δραστηριότητας με περιοδικότητα περίπου 10 χρόνια (Schwabe, 1844).

Η ιστορία του όπως αναφέρεται από τους Bray and Loughhead (1965) είναι η εξής: Σπούδασε στο πανεπιστήμιο του Βερολίνου και επέστρεψε στο Dessau για να ξεκινήσει δουλειά ως φαρμακοποιός. Η αρχική του δουλειά δεν του έδωσε χρόνο για διασκέδαση, αλλά το 1806 προμηθεύτηκε ένα μικρό τηλεσκόπιο από το Μόναχο και ξεκίνησε να παρατηρεί τον ήλιο. Ο πρωταρχικός του στόχος ήταν να ανακαλύψει έναν πλανήτη στο εσωτερικό της τροχιάς του Ερμή. Έτσι, πιστεύοντας ότι ένα τέτοιο ουράνιο σώμα θα πρόδιδε την παρουσία του περνώντας μπροστά από τον ηλιακό δίσκο, κατέγραψε προσεκτικά την δραστηριότητα των κηλίδων για 43 χρόνια. Οι πρώτες του ανακοινώσεις για έναν 10-ετή ηλιακό κύκλο έγιναν το 1843 αλλά δυστυχώς δεν βρήκαν απήχηση. Παρόλα αυτά ο Schwabe συνέχισε την παρατήρηση του και τελικά, το 1851 δημοσιεύτηκε από τον Humboldt, στον τρίτο τόμο της διάσημης διατριβής του, *Kosmos*, ένας πίνακας με πλήρη επίδειξη της περιοδικότητας των ηλιακών κηλίδων. Έτσι ο κόσμος ξαφνικά γνώρισε ένα φαινόμενο το οποίο ξέφευγε από την προσοχή των παρατηρητών

τηλεσκοπίου για 200 χρόνια. Τελικά, το 1857 ο Schwabe βραβεύτηκε με χρυσό μετάλλιο από την Royal Astronomical Society για τα επιτεύγματα του.



Σχήμα 2.5 Παρατηρήσεις ομάδων ηλιακών κηλίδων για κάθε έτος από το 1825 έως το 1845. Αυτά τα δεδομένα οδήγησαν τον Heinrich Schwabe (1844) στην ανακάλυψη του ηλιακού κύκλου.

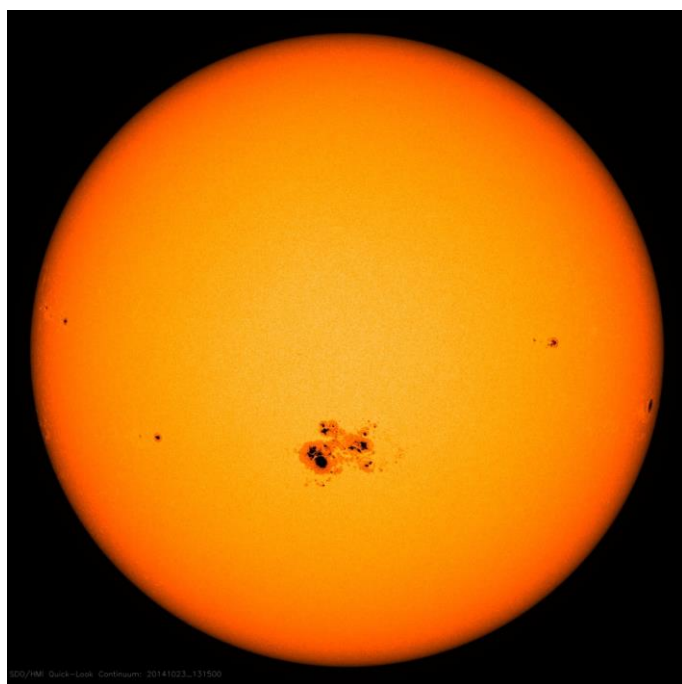
Στην συνέχεια της οδύσσειας για την τελειοποίηση της θεωρίας του ηλιακού κύκλου, ο Richard Christopher Carrington (1826-1875) συνέχισε την παρατήρηση κάνοντας την ανακάλυψη ότι το μέσο ηλιογραφικό πλάτος των ηλιακών κηλίδων μειώνεται σταθερά από την αρχή μέχρι το τέλος του ηλιακού κύκλου. Μετέπειτα, ο Rudolf Wolf (1816-1893) βασιζόμενος στην παρατηρήσεις προηγούμενων αστρονόμων κατέληξε στο ότι ο ηλιακός κύκλος αποτελείται από 11 χρόνια και ποσοτικοποίησε την ηλιακή δραστηριότητα χρησιμοποιώντας τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων. Η διαφοροποίηση του ηλιογραφικού πλάτος που ανακαλύφθηκε από τον Carrington, στην συνέχεια εξετάστηκε από τον Gustav Sporer (1822-1896) με αρχικό στόχο να προσδιορίσει τον νόμο της περιστροφής του Ήλιου. Με την βοήθεια της κυβέρνησης δημιούργησε έναν μικρό ηλιακό παρατηρητήριο στο Anclam της Pomerania και έκανε διάφορες παρατηρήσεις έως το τέλος του 1873. Μετέπειτα, συνέχισε την δουλειά του στο Potsdam Astrophysical Observatory το οποίο είναι ευρέως γνωστό για τις έρευνες γύρω από τα μαγνητικά πεδία των ηλιακών κηλίδων (Bray και Loughhead, 1965).

2.5 Ο ηλιακός κύκλος

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο ηλιακός κύκλος εκφράζει μια σειρά φαινομένων που έχουν περίοδο 11 χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, ο κύκλος αναφέρεται στην διαφοροποίηση των αριθμών κηλίδων με περίοδο 11 χρόνια ενώ αυτή η περιοδικότητα ακολουθείται και από την περιοδικότητα των φαινομένων της ηλιακής δραστηριότητας όπως για παράδειγμα είναι οι

ηλιακές προεξοχές, οι ηλιακές εκλάμψεις, και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Όλα τα φαινόμενα αυτά μαζί καθορίζουν την ροή του ηλιακού ανέμου.

Τυπικά σε έναν ηλιακό κύκλο πρώτα υπάρχει το ηλιακό ελάχιστο, ακολουθούν 11 χρόνια με αύξηση της έντασης των φαινομένων έως το ηλιακό μέγιστο σημείο και μετά άλλα 11 χρόνια με μείωση της έντασης έως το αρχικό σημείο, το ηλιακό ελάχιστο. Κάτι όμως που προκαλεί ενδιαφέρον είναι ότι μετά το μέγιστο κάθε 11-ετούς κύκλου, η πολικότητα αυτού του γιγάντιου μαγνήτη αντιστρέφεται, έτσι ώστε ο βόρειος πόλος του να γίνεται νότιος και ο νότιος βόρειος. Συνεπώς, ο ηλιακός κύκλος, όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο έχει περίοδο 22 ετών, εφόσον τόσο χρόνο χρειάζεται ο Ήλιος για να επανέλθει στην ίδια πολική μαγνητική συμπεριφορά. Με λίγα λόγια, ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας μεταβλητός μαγνητικός αστέρας με περίοδο 22 ετών (Δανέζης και Θεοδοσίου, 2012).



Σχήμα 2.6 Μια γιγαντιαία ηλιακή κηλίδα σχεδόν 80.000 μίλια σε μήκος κάτω από το κέντρο του ηλιακού δίσκου σε αυτή την εικόνα από δυναμικό ηλιακό παρατηρητήριο (Solar Dynamic Observatory) της NASA στις 23 Οκτωβρίου 2014. Αυτή η ενεργή περιοχή, που ονομάζεται AR2192, είναι η μεγαλύτερη ενεργή περιοχή του τωρινού ηλιακού κύκλου.

Πηγή: <http://www.nasa.gov/content/goddard/largest-sunspot-of-solar-cycle>

2.6 Δεδομένα ηλιακού κύκλου - solar flux 10.7 cm

Το σύνολο των δεδομένων του ηλιακού κύκλου, τα οποία συγκρίνουμε με τα δεδομένα της υγρασίας στην συνέχεια της εργασίας, καλείται ηλιακή ροή (solar flux). Η ηλιακή

ροή είναι η εκπομπή της ηλιακής ακτινοβολίας στο μήκος κύματος των 2800 MHz (10.7 cm) και αποτελεί έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη του ηλιακού κύκλου (Tapping and Charrois, 1994). Αυτή η μέτρηση της ηλιακής δραστηριότητας έχει κάποια πλεονεκτήματα έναντι των άλλων δεικτών (π.χ. ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων και οι περιοχές όπου βρίσκονται) όπως το ότι είναι απόλυτα αντικειμενική και μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε ημερήσια βάση μέσω του προγράμματος Canadian Solar Radio Monitoring Programme από το 1946, παίρνονται διάφορες μετρήσεις μέσα στην διάρκεια της μέρας ενώ μεριμνάται έτσι ώστε να αποφευχθεί η παρουσία τιμών επηρεασμένες από την ηλιακή εκρηκτική δραστηριότητα (Hathaway, 2015). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για σημειακές μετρήσεις της πυκνότητας της ηλιακής ροής στο μήκος κύματος που αναφέρθηκε (10.7 cm) και πραγματοποιούνται τρεις φορές την ημέρα (συνήθως στις ώρες 17:00, 20:00 και 23:00 UTC). Αυτές οι τιμές ή μόνο η τιμή των 20:00 UTC χρησιμοποιούνται ως μέση τιμή ηλιακής ροής για εκείνη την μέρα (Tapping and Charrois, 1994).

Οι παρατηρήσεις ξεκίνησαν από το 1946 στην περιοχή της Ottawa του Καναδά και συνέχισαν στην ίδια περιοχή μέχρι το 1990 όπου ένας νέος μετρητής ροής εγκαταστάθηκε στην περιοχή Penticton επίσης του Καναδά και λειτουργούσαν ταυτόχρονα για έξι μήνες έως ότου ο μετρητής της Ottawa μεταφερθεί στο Penticton για να λειτουργήσει ως εφεδρικό. Οι μετρήσεις παρέχονται καθημερινά ενώ αρχειοθετείται το πλήρες σύνολο δεδομένων (Hathaway, 2015)

2.7 Μεταβλητότητα του ηλιακού κύκλου

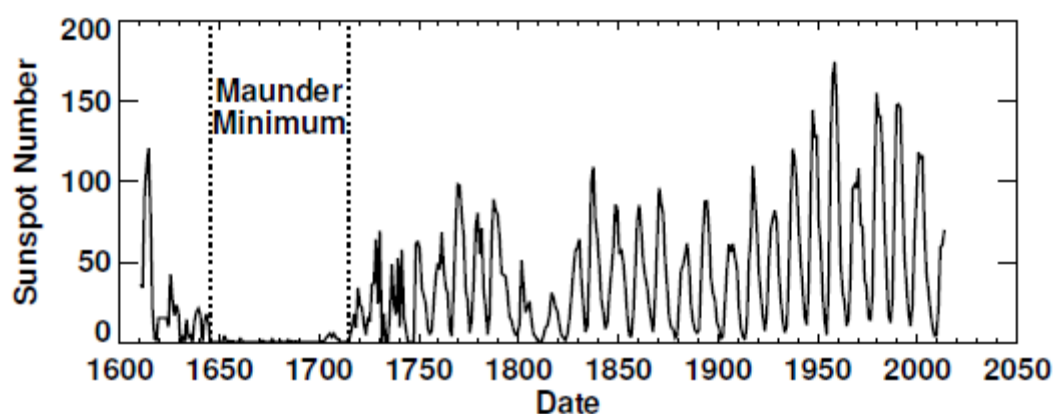
Πέρα από την περιοδική μεταβολή της ηλιακής δραστηριότητας που αντιπροσωπεύει ο ηλιακός κύκλος υπάρχουν και άλλες μεταβολές που χωρίζονται σε μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες και αφορούν την μεταβλητότητα του ηλιακού κύκλου.

2.7.1 Μακροπρόθεσμη μεταβλητότητα

Οι συστηματικές μεταβολές μεταξύ των ηλιακών κύκλων θα μπορούσαν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες έτσι ώστε τα μαθηματικά μοντέλα να μπορούν να βοηθήσουν στην

πρόβλεψη μελλοντικών κύκλων. Στο σύνολο των ηλιακών κύκλων έχουν υπάρξει αρκετά παραδείγματα μακροπρόθεσμης μεταβλητότητας.

Αρχικά, υπάρχει το ονομαζόμενο Ελάχιστο του Maunder στο οποίο πρώτα ο Maunder (1890) αναφερόμενος στο έργο του Sporer είπε, ότι για μία περίοδο 70 χρόνων η φυσιολογική πορεία του ηλιακού κύκλου είχε διακοπεί και ο Eddy (1976) πρόσθεσε και άλλα στοιχεία που απέδειχναν την χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα εκείνης της περιόδου και αναφέρθηκε σε αυτή ως Maunder Minimum. Οι Beer et al. (1998) έδωσαν σαν πιθανή εξήγηση ότι ο μαγνητικός κύκλος ενεργούσε αλλά ήταν πολύ ασθενής έτσι ώστε να παράγει τα έντονα μαγνητικά πεδία που συνοδεύουν τις ηλιακές κηλίδες. Επιπλέον οι Ribes και Nesme-Ribes (1993) ανακάλυψαν ότι οι ηλιακές κηλίδες που παρατηρήθηκαν στο δεύτερο μισό του Maunder Minimum βρίσκονταν σε χαμηλά ηλιακά πλάτη και κυρίως στο Νότιο ημισφαίριο που υποδεικνύουν αδύναμα μαγνητικά πεδία.



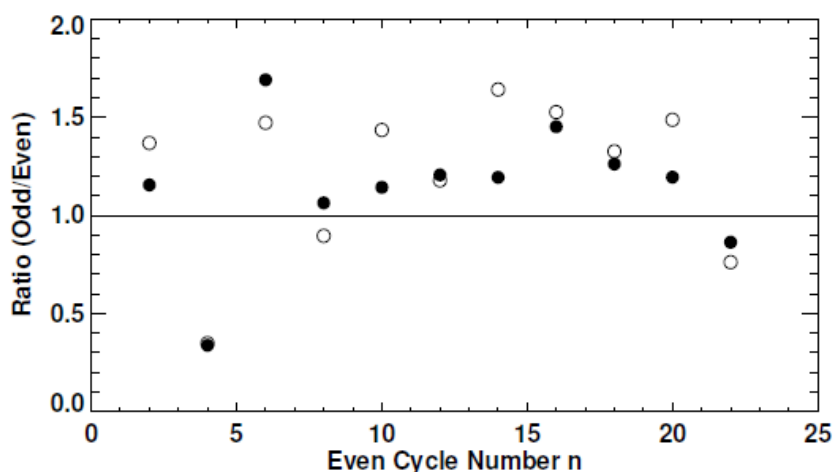
Σχήμα 2.7 Το Ελάχιστο του Maunder. Στο διάγραμμα φαίνονται οι ετήσιοι μέσοι ημερήσιων δεδομένων ενός δείκτη της ηλιακής δραστηριότητας που ονομάζεται Group Sunspot Numbers σε συνάρτηση με τον χρόνο (Hathaway, 2015).

Μια άλλη περίπτωση μακροπρόθεσμης μεταβλητότητας είναι η συνεχής αύξηση στα πλάτη των ηλιακών κύκλων από του Ελάχιστο του Maunder. Συγκεκριμένα ο Wilson, 1988 ανέφερε πως υπήρξε μια συνεχής και σταθερή αύξηση των πλατών των μέτρων της ηλιακής δραστηριότητας ξεκινώντας από το τέλος του Ελαχίστου του Maunder. Επίσης, οι Hathaway et al. (2002) βρήκαν έναν συντελεστή συσχέτισης 0.7 μεταξύ ηλιακού κύκλου και του αντίστοιχου αριθμού του. Οι μελέτες των Solanski et al. (2004) με ραδιοϊσότοπα δείχνουν επίσης την τάση αυτή και υποδεικνύουν πολλές θετικές και αρνητικές τάσεις σε μία περίοδο 11 χιλιάδων ετών. Παρόλα αυτά, οι πρόσφατες επανεξετάσεις του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Svalgaard,

2012), υποδεικνύουν ελάχιστη ή και καθόλου διαφοροποίηση του πλάτους των ηλιακών κύκλων από το Ελάχιστο του Maunder.

Επίσης, υπήρξε μία κυκλική μεταβολή στα πλάτη των ηλιακών κύκλων σε ένα χρονικό διάστημα 80-90 χρόνων γνωστή ως «Gleissberg cycle». Ο Gleissberg (1939) ανέφερε πως υπήρξε μία περιοδικότητα 7-8 μικρών κύκλων στα πλάτη των ηλιακών κύκλων από το 1750 έως το 1928. Όμως, ενώ οι Garcia και Mouradian (1998) υποδεικνύουν πως ένας τρίτος κύκλος Gleissberg μπορεί να βρεθεί στα δεδομένα των ηλιακών κηλίδων άλλοι (Hathaway et al., 1999) προτείνουν πως η περίοδος αλλάζει ή ότι συνίσταται από δύο διαφορετικούς κύκλους (Rozelot, 1994; Ogurtsov et al., 2002) ένας με περίοδο των 90-100 χρόνων και άλλος ένας με περίοδο 50-60 χρόνων).

Επιπροσθέτως, οι Gnevyshev and Ohl (1948) βρήκαν ότι αν οι ηλιακοί κύκλοι σχηματίσουν ζευγάρια (ένας κύκλος με άρτιο αριθμό και ο επόμενος του με περιττό αριθμό) τότε το άθροισμα των αριθμών των ηλιακών κηλίδων στον περιττό κύκλο είναι μεγαλύτερος από τον άρτιο κύκλο. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως Gnevyshev–Ohl Rule ή Even–Odd Effect. Με την εξαίρεση των κύκλων 4-5, αυτή η σχέση κράτησε έως ότου ο κύκλος 23 έδειξε ότι και οι κύκλοι 22-23 είναι επίσης εξαίρεση. Τέλος εάν συγκρίνουμε τα πλάτη των κύκλων 8-9 τότε και αυτή η περίπτωση αποτελεί εξαίρεση. Αυτός ο κανόνας ισχύει και για άλλους δείκτες ηλιακού κύκλου όπως το μέγεθος της περιοχής που καταλαμβάνουν οι ηλιακές κηλίδες.



Σχήμα 2.8 Ο νόμος του Gnevyshev. Οι γεμάτοι με χρώμα κύκλοι αντιπροσωπεύουν την αναλογία του αθροίσματος των αριθμών των κηλίδων σε έναν περιττό αριθμό ηλιακού κύκλου προς το άθροισμα των ηλιακών κηλίδων του προηγούμενου άρτιου αριθμού ηλιακού κύκλου. Οι άδεια κύκλοι αντιπροσωπεύουν την αναλογία του πλάτους του περιττού αριθμού ηλιακού κύκλου προς το αντίστοιχο πλάτος του προηγούμενου άρτιου αριθμού ηλιακού κύκλου (Hathaway, 2015).

Επιπλέον, η διαμόρφωση της ροής των κοσμικών ακτινών από τον ηλιακό κύκλο αφήνει το ίχνος του στις συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων του ^{14}C και ^{10}Be στους δακτυλίους των

δέντρων και στους πυρήνες πάγου αντίστοιχα. Η σύνδεση μεταξύ ηλιακής δραστηριότητας και συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων περιπλέκεται από την μεταφορά και αποθήκευση αυτών των ραδιενεργών ισοτόπων (Usoskin, 2013). Αυτές οι αναδιαμορφώσεις της ηλιακής δραστηριότητας αποκαλύπτουν μεγάλα ελάχιστα όπως το Maunder Minimum όπως και μεγάλα μέγιστα παρόμοιο με αυτό του τελευταίου μισού του 20^{ου} αιώνα ενώ παράλληλα υποδεικνύουν ότι ο Ήλιος ξοδεύει περίπου το 1/6 της ζωής του στην φάση του μεγάλου ελάχιστου και περίπου το 1/10 στην φάση του μεγάλου μεγίστου (Hathaway, 2015).

Η τελευταία μακροπρόθεσμη μεταβολή λέγεται κύκλος του Suess. Σύμφωνα με αυτή σε πολλές μελέτες ηλιακής δραστηριότητας με ραδιοχρονολογήσεις άνθρακα εμφανίζεται μία σαφώς καθορισμένη περιοδικότητα 210 ετών με όνομα Suess cycle ή de Vries cycle (Suess, 1980). Αν και οι μεταβολές των υπολογιζόμενων ποσοστών παραγωγής των ισοτόπων ^{14}C και ^{10}Be είναι καλά συσχετισμένες μεταξύ τους (Vonmoos et al., 2006) αλλά και με το συνολικό αρχείο δεδομένων των κηλίδων για 400 χρόνια (Berggren et al., 2009) υπάρχουν λίγες αποδείξεις για τον κύκλο του Suess στα αρχεία των ηλιακών κηλίδων (Ma and Vaquero, 2009).

2.7.2 Βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα

Βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα αποτελούν οι σημαντικές διακυμάνσεις στην ηλιακή δραστηριότητα με περίοδο μικρότερη από αυτήν του ηλιακού κύκλου. Ένα περιοδικό σήμα 154 ημερών βρέθηκε στην περιοχή των ακτινών γ, προερχόμενο από ηλιακές εκλάμψεις, από τον Rieger et al. (1984) κατά την Αποστολή Ηλιακού Μεγίστου (Solar Maximum Mission – SMM) κατά την περίοδο μεταξύ 02/1980 – 08/1983. Αυτό το σήμα βρέθηκε επίσης από τους Bai και Cliver (1990) σε εκλάμψεις πρωτονίων για την προηγούμενη περίοδο καθώς και για την περίοδο μεταξύ 01/1958 και 12/1971. Επίσης οι Ballester et al. (2002) βρήκαν ότι το προηγούμενο σήμα παρατηρήθηκε και στο παρατηρητήριο Mt. Wilson μεταξύ των ετών 1980 και 1983. Τέλος, ο Lean (1990) ανέλυσε το σήμα στην περιοχή των ηλιακών κηλίδων και βρήκε ότι συμβαίνει σε μορφή επεισοδίων γύρω από τις εποχές των ηλιακών μεγίστων και ότι παράλληλα αλλάζει και η συχνότητα.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα είναι αυτή των δύο περίπου χρόνων (Benevolenskaya, 1995; Mursula et al., 2003). Αυτή η περιοδικότητα φαίνεται έντονα στο μέγιστο του κύκλου με την μορφή ενός διπλού μεγίστου. Οι Wang and Sheeley Jr (2003) βρήκαν ότι η μαγνητική ροπή του ηλιακού δίπολου και η ανοιχτή μαγνητική ροή παρουσιάζουν πολλαπλά μέγιστα με ημι-περιοδικότητες περίπου 1,3 χρόνων, τα οποία αποδίδονται στις τυχαίες διεργασίες που δημιουργούν τις ενεργές περιοχές του Ήλιου οι οποίες καταστρέφονται μετά από

περίπου έναν χρόνο από τις δυναμικές διεργασίες της διαφορικής περιστροφής και της μεσημβρινής ροής.

Περισσότερα στοιχεία για τα υποκεφάλαια 2.4.4, 2.6, 2.7 υπάρχουν στην εργασία του David H. Hathaway, *The Solar Cycle*, 2015.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου και πληροφορίες γύρω από αυτό όπως ποιος είναι ο μηχανισμός του, που λαμβάνει χώρα, ποιες είναι οι επιπτώσεις του στην Γη και τον άνθρωπο, ποια είναι η κατάλληλη αντιμετώπιση του, και τέλος ποια είναι η σύνδεση του με τους υδρατμούς.

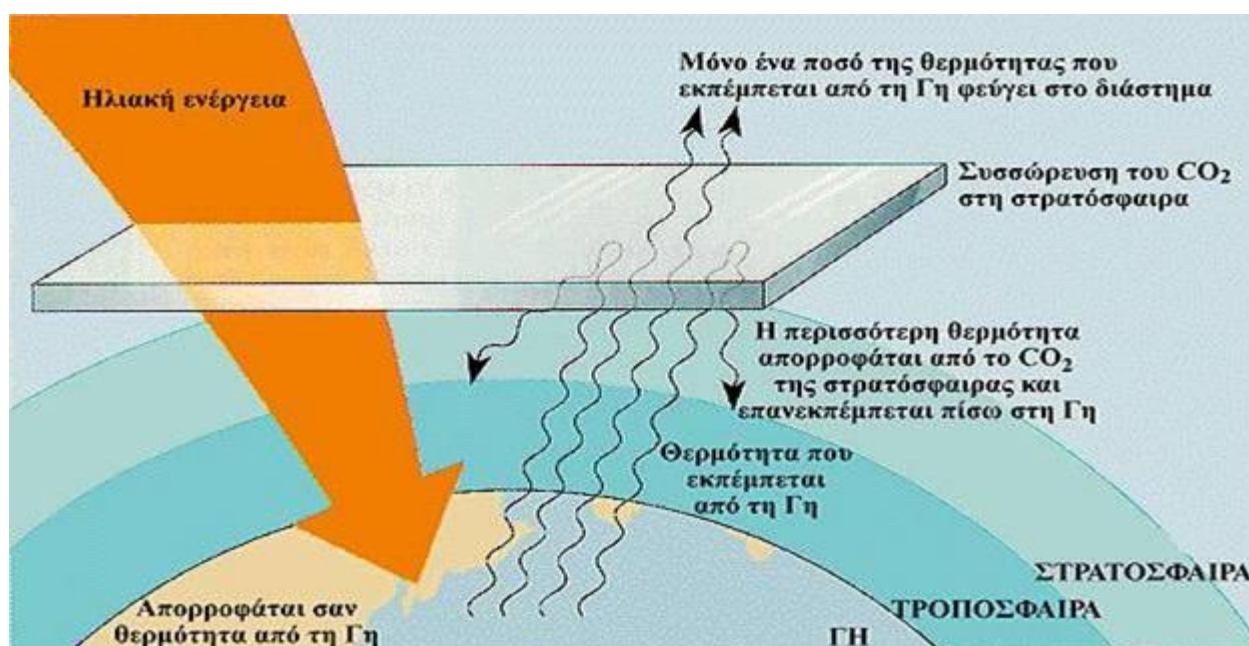
3.1 Το ισοζύγιο ενέργειας

Φαινόμενο του θερμοκηπίου, ονομάζεται η φυσική ατμοσφαιρική διαδικασία χάρη στην οποία διαμορφώνονται οι κατάλληλες συνθήκες που καθιστούν τον πλανήτη μας φιλόξενο για τη ζωή. Γενικά, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τα ατμοσφαιρικά αέρια που το καθορίζουν, διατηρούν τη θερμοκρασία του πλανήτη μας σε ανεκτά επίπεδα για την επιβίωση και την ανάπτυξη των έμβιων όντων (πηγή: <https://www.meteo.gr/meteoplus/pdf/thermokipio.pdf>). Πιο συγκεκριμένα η Γη δέχεται συνολικά ηλιακή ακτινοβολία, που αντιστοιχεί σε ροή περίπου 1.966 W/m^2 , στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας. Ένα μέρος αυτής απορροφάται από το σύστημα Γη - ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο διάστημα. Περίπου το 30% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται, σε ποσοστό 6% από την ατμόσφαιρα, 3% από τα νέφη και 4% από την επιφάνεια της Γης. Το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, κατά 32% από την ατμόσφαιρα (συμπεριλαμβανομένου και του στρατοσφαιρικού στρώματος του όζοντος), κατά 3% από τα νέφη και κατά το μεγαλύτερο ποσοστό (51%) από την επιφάνεια και τους ωκεανούς. Λόγω της θερμοκρασίας της, η Γη εκπέμπει επίσης υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία αντιστοιχεί σε μεγάλα μήκη κύματος, σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία, που είναι μικρού μήκους κύματος. Η ατμόσφαιρα της Γης διαθέτει μεγάλη αδιαφάνεια στην γήινη ακτινοβολία, έχει δηλαδή την ικανότητα να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της, ποσοστό περίπου 71%. Η ίδια η ατμόσφαιρα επανεκπέμπει με την σειρά της θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, μέρος της οποίας απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, η οποία θερμαίνεται ακόμη περισσότερο. Η γήινη ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται, με τον τρόπο αυτό, ως μία δεύτερη - μαζί με τον Ήλιο - πηγή θερμότητας. Αποτέλεσμα του συνολικού φαινομένου είναι η αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας, γεγονός που καθιστά τη Γη κατοικήσιμη. Χωρίς το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, η θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας θα ήταν σε παγκόσμια και ετήσια βάση περίπου -18°C .

πηγή: https://el.wikipedia.org/wiki/φαινόμενο_του_θερμοκηπίου

Τα αέρια της ατμόσφαιρας που προκαλούν αυτήν την συμπεριφορά ονομάζονται θερμοκηπικά αέρια, με βασικότερα τους υδρατμούς, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το όζον (O_3) και τους χλωροφθοράνθρακες (HFCs). Καθώς αυτή η διαδικασία εμφανίζει σημαντική ομοιότητα με τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου, της αποδόθηκε και το όνομα φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στη σημερινή εποχή το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί μια παρεξηγημένη έννοια, καθώς οι περισσότεροι το συνδέουν με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή. Στην πραγματικότητα το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια ευεργετική φυσική διαδικασία. Υπεύθυνη για την παγκόσμια θέρμανση είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα, εξαιτίας της οποίας αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων και ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα, ενισχύοντας κατ' επέκταση σημαντικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου από τον άνθρωπο, ονομάζεται ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου.

πηγή: <https://www.meteo.gr/meteoplus/pdf/thermokipio.pdf>



Σχήμα 3.1 Φαινόμενο θερμοκηπίου. Φαίνεται η αντανάκλαση της ακτινοβολίας από τη Γη προς το διάστημα και η κατακράτηση - επανεκπομπή της ακτινοβολίας από CO_2 (ο μηχανισμός είναι ίδιος για τα υπόλοιπα θερμοκηπικά αέρια).

Πηγή: <http://www1.aegean.gr/gympeir/thermokipio.htm>

3.2 Επιπτώσεις του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου.

3.2.1 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα γνωστά ως GCM (General Circulation Models), τα οποία επεξεργάζονται όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες για να προβλεθούν οι μελλοντικές κλιματικές αλλαγές, δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία της Γης θα αυξάνεται κατά μέσο όρο 0,3 °C ανά δεκαετία για τα επόμενα 100 χρόνια. Αν συμβεί όμως μια τέτοια αύξηση, που φαινομενικά είναι μικρή, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές κλιματικές αλλαγές με απρόβλεπτες συνέπειες. Ένα σημαντικό θέμα είναι η επίδραση που θα έχει η αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο της θάλασσας. Αναμένεται άνοδος που θα οφείλεται στην θερμική διαστολή των ωκεανών και στο λιώσιμο των πάγων των οροσειρών και, σε μικρότερο ποσοστό, σε λιώσιμο των πάγων της Γροιλανδίας. Παράλληλα η κατανομή και η συχνότητα των βροχοπτώσεων θα μεταβληθούν. Θα αυξηθούν οι πλημμύρες, οι καταιγίδες και γενικά οι ακραίες καιρικές συνθήκες θα είναι συχνότερες και εντονότερες.

πηγή: http://www.doyk.gr/vivliothiki/pdf/perivallon/fainomeno_thermokipiou.pdf

3.2.2 Επιπτώσεις στην υγεία

Οι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν την αύξηση της μόλυνσης στην ατμόσφαιρα, ενώ δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση ασθενειών, που η παρουσία τους ευνοείται μόνο σε θερμές περιοχές. Εάν οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέψουν σε οργανισμούς όπως τα κουνούπια και άλλα έντομα να εγκατασταθούν και σε άλλες περιοχές τότε εξαπλώνονται ασθένειες όπως η ελονοσία, ο κίτρινος πυρετός και η εγκεφαλίτιδα.

Το όζον στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας απορροφά την επικίνδυνη ακτινοβολία για τους ζωντανούς οργανισμούς αλλά η αύξηση της συγκέντρωσής του στις κατώτερες περιοχές της ατμόσφαιρας είναι παθογόνος. Το όζον επιδρά αρνητικά στους ιστούς των πνευμόνων και δημιουργεί προβλήματα σε άτομα με άσθμα και άλλες ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Ακόμα και σε υγιή άτομα η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος προκαλεί πόνους στο στήθος, ναυτία και πνευμονική συμφόρηση.

πηγή: http://www.doyk.gr/vivliothiki/pdf/perivallon/fainomeno_thermokipiou.pdf

3.3 Αντιμετώπιση του ανθρωπογενούς φαινομένου του θερμοκηπίου

Γενικά, η βάση της λύσης στο ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου βρίσκεται στην μείωση εκπομπής των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα. Απαιτείται ανάπτυξη τεχνολογιών και μέσων μεταφοράς που θα βασίζονται λιγότερο ή θα είναι ανεξάρτητα από καύσιμα υλικά. Οι ήπιες ή ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, κυματική) μπορεί να βοηθήσουν στην κατεύθυνση αυτή. Οι επιπτώσεις από το ανθρωπογενές φαινόμενο του Θερμοκηπίου δεν περιορίζονται στα σύνορα κρατών, αλλά αποτελούν παγκόσμια προβλήματα και απαιτείται διεθνής συνεργασία και χάραξη κοινής πολιτικής από όλα τα κράτη. Το πρώτο βήμα έγινε το 1992 με τη διάσκεψη του Ρίο, όπου 167 χώρες υπέγραψαν κοινό πρωτόκολλο για τον έλεγχο εκπομπής του CO₂. Πάντως σήμερα με τη συνεχιζόμενη αύξηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα η συμφωνία του Ρίο είναι ανεπαρκής. Οι χώρες που είναι κυρίως υπεύθυνες για το πρόβλημα είναι οι βιομηχανικές καθώς από αυτές προέρχεται περίπου το 75% των συνολικών εκπομπών του CO₂ οπότε από αυτές θα πρέπει να ξεκινήσουν οι διαδικασίες για την ελάττωση τους.

πηγή: http://www.doyk.gr/vivliothiki/pdf/perivallon/fainomeno_thermokiipiou.pdf

3.4 Ο ρόλος των υδρατμών της ανώτερης τροπόσφαιρας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι υδρατμοί στο σύνολο της ατμόσφαιρας είναι το πιο σημαντικό από τα θερμοκηπικά αέρια καθώς προκαλεί τα δύο τρίτα του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου. Όμως, συγκεκριμένα στην περιοχή της ανώτερης τροπόσφαιρας, οι υδρατμοί σχηματίζουν νέφη που αποτελούνται στο σύνολο τους από παγοκρυστάλλους και ονομάζονται σύννεφα Cirrus. Αυτά τα σύννεφα, αντίθετα με αυτά που υπάρχουν σε χαμηλά υψόμετρα και ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, λειτουργούν όπως τα υπόλοιπα θερμοκηπικά αέρια και παγιδεύουν την εξερχόμενη από τη Γη υπέρυθη ακτινοβολία, την επανεκπέμπουν στην επιφάνεια και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας. Συμπερασματικά, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υδρατμούς στην ανώτερη τροπόσφαιρα τόσο αυξάνονται τα σύννεφα Cirrus και η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης, σε μικρή όμως κλίμακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Περίληψη

Χρησιμοποιούνται 30 χρόνια διαβαθμονομημένων δεδομένων HIRS (High Resolution Infrared Radiation Sounder – Υψηλής Ανάλυσης Όργανο Μέτρησης Υπέρυθρης Ακτινοβολίας) για να δημιουργηθεί μια σειρά δεδομένων βάθους 30 χρόνων για την υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας ως προς τον πάγο (UTHi-Upper Tropospheric Humidity with respect to ice). Εφόσον οι απαιτούμενες φωτεινές θερμοκρασίες (κανάλια 6 και 12 – T_6 και T_{12}) είναι διαβαθμονομημένες σε διαφορετικές εκδοχές των αισθητήρων HIRS (ο T_6 στα όργανα HIRS τέταρτης έκδοσης-HIRS/4 και ο T_{12} στα όργανα HIRS δεύτερης έκδοσης-HIRS/2) είναι αναγκαίο να μετατρέψουμε τις φωτεινές θερμοκρασίες του καναλιού 6 σε ισοδύναμες τιμές διαβαθμονομημένες ως προς τον HIRS/2. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Χρησιμοποιώντας τους νέους συντελεστές παλινδρόμησης παράγουμε καθημερινά δεδομένα UTHi, με τα κανάλια T_{12} και T_6 , για κάθε δορυφόρο της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) και της METOP-A (Meteorological Operational Satellite Programme) που περιέχουν τα όργανα HIRS. Από αυτά μπορούν να υπολογιστούν ημερήσιοι και μηνιαίοι μέσοι σε ανάλυση $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ για την ζώνη των μέσων γεωγραφικών πλατών ($30-60^\circ$) του βορείου ημισφαίριου. Ως πρώτη εφαρμογή υπολογίζουμε τους μέσους των τιμών UTHi ανά δεκαετία και τις φωτεινές θερμοκρασίες για τις δεκαετίες 1980-1989 και 2000-2009. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η υγρασία αυξήθηκε από την δεκαετία του 1980 έως την δεκαετία του 2000 και ότι αυτή η αύξηση είναι στατιστικά σημαντική σε μεγάλης έκτασης περιοχές μέσα στην ζώνη των βόρειων-μέσων γεωγραφικών πλατών. Ο κύριος λόγος για αυτό το αποτέλεσμα και την στατιστική του σημαντικότητα είναι η αντίστοιχη αύξηση της T_{12} . Οι διαφορές των μέσων φωτεινών θερμοκρασιών είναι λιγότερο σημαντικές.

4.1 Γενικές πληροφορίες

Η ανίχνευση της αλλαγής του κλίματος συχνά παρεμποδίζεται από την μικρή αναλογία σήματος/θόρυβο σε χρονοσειρές κλιματικών δεδομένων. Το σήμα, που συχνά είναι μία μικρή τάση, μπορεί να επικαλυφθεί από ένα μίγμα ταλαντωτικών σημάτων (περιοδικά, σχεδόν-περιοδικά, και μη-περιοδικά), στιγμιαία σήματα (π.χ. που προκαλούνται από εκρήξεις ηφαιστειών) και τυχαίο θόρυβο (π.χ. που προκαλείται από μη συστηματικά σφάλματα μέτρησης,

Zerefos et al., 2012). Γενικά, για την εφαρμογή εξελιγμένων μαθηματικών φίλτρων απαιτούνται μεγάλες χρονοσειρές δεδομένων (βάθους δεκαετιών) έτσι ώστε η τάση να μπορεί όχι μόνο να εντοπιστεί αλλά και να δοθεί με κάποια στατιστική εμπιστευτικότητα (Weatherhead et al., 1998).

Στον τομέα της παγκόσμιας ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων υπάρχει μόνο μία πηγή που παρέχει χρονοσειρές μεγάλου διαστήματος, οι δορυφόροι της NOAA που φέρουν τα ραδιόμετρα HIRS. Οι δορυφόροι Meteosat παρέχουν χρονοσειρές παρόμοιου μεγέθους αλλά χωρίς παγκόσμια κάλυψη. Επίσης, οι ευρωπαϊκοί δορυφόροι METOP χρησιμοποιούν τα όργανα HIRS των οποίων τα δεδομένα έχουν έκταση πάνω από 30 χρόνια. Δυστυχώς με την πάροδο του χρόνου υπήρξαν αλλαγές στα όργανα αυτά (όπως στις συχνότητες καναλιών, στις λειτουργίες των φίλτρων, το στιγμιαίο γεωμετρικό οπτικό πεδίο – Instantaneous Geometric Point of View- IGFOV μειώθηκε από τα 20 στα 10 Km, γενικότερα από την έκδοση 2 πέρασαν στην τρέχουσα έκδοση 4) με αποτέλεσμα τα δεδομένα από διαφορετικούς δορυφόρους να μην μπορούν να συνδυαστούν άμεσα και να σχηματίσουν μια ενιαία χρονοσειρά. Οπότε, ήταν απαραίτητο να εισαχθούν μετρήσεις από διαφορετικούς δορυφόρους σε μία κοινή βάση δεδομένων. Αυτό γίνεται τα τελευταία χρόνια για τα κανάλια μεγάλου μήκους κύματος των οργάνων HIRS (Shi et al., 2008; Shi and Bates, 2011; Shi, 2013; Chen et al., 2013) έτσι ώστε οι ερευνητές να μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαβαθμονομημένα δεδομένα ως προς έναν δορυφόρο, βάθους τριάντα και περισσότερων χρόνων.

Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον βρίσκεται στο να ανιχνευθούν μακροπρόθεσμες αλλαγές στην υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Jackson και Bates (2001) βασιζόμενοι στο θεμελιώδες έργο των Soden και Bretherton (1993). Ο υπολογισμός της υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας, UTH, προέρχεται από μετρήσεις φωτεινών θερμοκρασιών στα κανάλια 12 (οι κυματάρια είναι 1480 cm⁻¹ για HIRS/2 και 1530 cm⁻¹ για HIRS/4) και 6 (οι κυματάρια είναι κοινοί για HIRS/2 και HIRS/4 και είναι ίσοι με 733 cm⁻¹) με την χρήση του εξής τύπου:

$$\diamond \text{ UTH} = \frac{\exp(\alpha + bT_{12})}{a' + b'T_6}$$

Όπου:

- α, b, a', b' : Συντελεστές παλινδρόμησης καθορισμένοι από τους Jackson και Bates (2001)

Σε αυτήν την εξίσωση ο παράγοντας T_{12} αποτελεί μέτρηση της συγκέντρωσης των υδρατμών της ελεύθερης τροπόσφαιρας (η τροπόσφαιρα πάνω από το οριακό στρώμα που περιέχει τους ρύπους) ενώ ο παράγοντας T_6 αποτελεί την αντίστοιχη μέτρηση θερμοκρασίας. Η εξίσωση αυτή συνδυάζει τους συνηθισμένους παράγοντες για τον προσδιορισμό της σχετικής υγρασίας. Οι συντελεστές έχουν καθοριστεί για την σχετική υγρασία ως προς το νερό, UTH_w , αλλά και ως προς τον πάγο, UTH_i . Είναι προφανές ότι μία τιμή $UTH_i > 100\%$ υποδηλώνει υπερκορεσμό ως προς πάγο. Καθώς η βαρύνουσα συναρτήσεις του καναλιού 12 των οργάνων HIRS επηρεάζονται πολύ από ένα χαμηλό υψομετρικά στρώμα μεταξύ 300 και 500 hPa, τότε η UTH θα πρέπει να ερμηνευθεί ως ένα είδος μέσης σχετικής υγρασίας πάνω από αυτό το στρώμα ενώ η σχετική υγρασία ως προς τον πάγο ξεπερνά το 100% μόνο όταν το μεγαλύτερο μέρος αυτού του στρώματος είναι υπερκορεσμένο, κάτι που συμβαίνει σπάνια. Μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό στρωμάτων υπερκορεσμένων σε πάγο μπορούν να φτάσουν σε ύψος 3 χιλιομέτρων και κάτω (thickness statistics in Spichtinger et al., 2003a; Treffeisen et al., 2007; Rädel and Shine, 2007; Dickson et al., 2010).

Οι Jason και Bates (2001) καθόρισαν τους συντελεστές παλινδρόμησης για τα όργανα δεύτερης έκδοσης (HIRS/2) στον δορυφόρο NOAA-7, αλλά η πρόσφατη διαβαθμονόμηση των καναλιών των οργάνων HIRS έγιναν ως προς την έκδοση HIRS/4 του δορυφόρου METOP-A. Έτσι, είτε θα πρέπει να καθοριστούν νέοι συντελεστές παλινδρόμησης για τις φωτεινές θερμοκρασίες από τα όργανα HIRS/4 είτε εναλλακτικά, θα πρέπει να καθοριστεί μία μέθοδος έτσι ώστε να υπολογιστούν οι φωτεινές θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στην έκδοση HIRS/2 χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από τα όργανα έκδοσης HIRS/4. Από τις δύο μεθόδους η δεύτερη είναι και η απλούστερη οπότε και ακολουθείται. Ευτυχώς, μία διαβαθμονομημένη σειρά δεδομένων $T_{12/2}$ (κανάλι 12 έκδοση HIRS/2) είχε προετοιμαστεί από τους Shi και Bates (2011) έτσι ώστε να συγκεντρωθούμε στο κανάλι 6 του οποίου τα δεδομένα λαμβάνονται από την έρευνα των Shi et al. (2008). Συγκρίσεις στις φωτεινές θερμοκρασίες του δορυφόρου NOAA-14 με τον NOAA-15 (μεταφορά από έκδοση HIRS/2 σε HIRS/3) και από NOAA-17 σε METOP-A (μεταφορά από έκδοση HIRS/3 σε HIRS/4) έδειξαν πως οι τιμές του καναλιού T_6 είναι παρόμοιες ανά διαφορετικές εκδοχές των οργάνων οπότε μία πολύ απλή λύση θα ήταν να αγνοηθούν αυτές τις διαφορές και να γίνει η υπόθεση ότι $\hat{T}_{6/2}^6 = T_{6/4}$. Αυτή η προσέγγιση θα μείωνε τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (rms) κατά 0.05% (περίπου 0.125 K). Όμως, παρόλο που το σφάλμα αυτό είναι αρκετά μικρό αποφασίστηκε να ληφθούν υπόψη οι διαφορές και να μειωθεί περαιτέρω πραγματοποιώντας την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

⁶ Το σύμβολο $\hat{}$ πάνω από το T δηλώνει ότι η τιμές $\hat{T}_{6/2}$ είναι οι εκτιμώμενες τιμές του καναλιού 6 διαβαθμονομημένες ως προς HIRS/2.

Στην συνέχεια αναπτύσσουμε την παλινδρόμηση της $T_{6/2}$ στην $T_{6/4}$ και πραγματοποιούνται απλοί ποιοτικοί έλεγχοι. Χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο μπορεί να παραχθεί μία νέα σειρά δεδομένων (UTHi) που μοιάζει με την αντίστοιχη σειρά των διαβαθμονομημένων φωτεινών θερμοκρασιών όσον αφορά την δομή τους (ταξινόμηση ως προς τον δορυφόρο και την ημερομηνία). Πρέπει να αναφερθεί ότι μπορεί να παραχθεί μία νέα σειρά δεδομένων σχετικής υγρασίας ως προς το νερό αλλά δεν έχει συμβεί ακόμα. Τέλος, επειδή το ενδιαφέρον κινείται γύρω από τον υπερκορεσμό σε πάγο (Gierens et al., 2004, 2012) το εύρος των δεδομένων έχει περιοριστεί σε ένα γεωγραφικό πλάτος από 30° έως 60° Βόρεια, καθώς δεδομένα από άλλους δορυφόρους έδειξαν ότι στο προαναφερθέν στρώμα 300-500 hPa μέσα στην τροποσφαιρική ζώνη των τροπικών πλατών δεν βρέθηκε σχεδόν καθόλου υπερκορεσμός σε πάγο (Spichtinger et al., 2003b; Gettelman et al., 2006).

4.2 Τεχνική εφαρμογή

Η παλινδρόμηση της $T_{6/2}$ στην $T_{6/4}$ αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας όλα τα ημερήσια στοιχεία ολόκληρων ετών του δορυφόρου NOAA-12 (1992-1996). Χρησιμοποιείται αυτός ο δορυφόρος επειδή οι μετρήσεις του καναλιού 12 της δεύτερης έκδοσης των αισθητήρων HIRS/2 (από τους Shi και Bates, 2011) είναι διαβαθμονομημένες ως προς τον δορυφόρο NOAA-12, οπότε θα ήταν χρήσιμο να διαβαθμονομήσουμε και το κανάλι 6 ως προς τον ίδιο δορυφόρο. Μερικά χρόνια πριν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων του καναλιού 12 για την διαβαθμονόμηση τους, ο βασικός δορυφόρος είχε καθοριστεί λόγω διάφορων παραγόντων. Πρώτον, ο δορυφόρος χρειάζεται έναν επαρκή χρόνο παρατήρησης, κατά προτίμηση τουλάχιστον 5 χρόνια. Δεύτερον, οι διαβαθμονομημένες τιμές θα πρέπει να είναι κοντά σε αυτές που προέρχονται από τον βασικό δορυφόρο που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενη έρευνα από τους Jackson και Bates (2001) για ευκολότερες συγκρίσεις. Και τρίτον, οι αλλαγές στην τροχιά του δορυφόρου θα πρέπει να είναι σχετικά μικρές συγκρινόμενες με άλλες τροχιές δορυφόρων που περιέχουν την δεύτερη έκδοση των αισθητήρων HIRS. Τελικά, ο δορυφόρος που πληρούσε αυτές τις συνθήκες και που επιλέχθηκε ως ο βασικός δορυφόρος στην έρευνα που διεξάχθηκε από τους Shi και Bates (2001) ήταν ο NOAA-12.

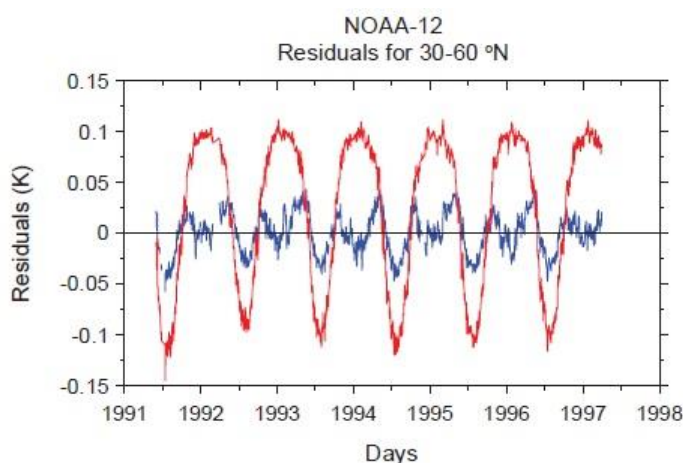
Η σειρά δεδομένων περιέχει τις τιμές των φωτεινών θερμοκρασιών του καναλιού 6 διαβαθμονομημένες ως προς την τέταρτη έκδοση των οργάνων HIRS, $T_{6/4}$, και παράλληλα περιέχει τις αρχικές, ακατέργαστες τιμές που μετρήθηκαν από τον δορυφόρο NOAA-12 με την δεύτερη έκδοση των οργάνων HIRS, δηλαδή $T_{6/2}$. Το σχήμα 4.1 από τον Shi (2013) υποδηλώνει ότι η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης είναι επαρκής έτσι ώστε να μπορεί να ειπωθεί ότι:

- $\hat{T}_{\frac{\epsilon}{2}}(\lambda, \beta, d) = I + S T_{\frac{\epsilon}{4}}(\lambda, \beta, d),$
- $\varepsilon(\lambda, \beta, d) = T_{\frac{\epsilon}{2}}(\lambda, \beta, d) - \hat{T}_{\frac{\epsilon}{2}}(\lambda, \beta, d).$

Υπενθυμίζεται ότι το σύμβολο $\hat{}$ πάνω από το T χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν οι εκτιμώμενες διαβαθμονομημένες φωτεινές θερμοκρασίες από τις τιμές που μετρούνται μέσω των οργάνων. Οι παράγοντες λ και β αντιστοιχούν στις γεωγραφικές συντεταγμένες πλάτους και μήκους ενώ το d εκφράζει την ημέρα του χρόνου (1-365 ή 366). Οι παράγοντες I και S αποτελούν την τιμή του y για $x=0$ (intercept) και την κλίση (slope) της παλινδρόμησης αντίστοιχα. Ο παράγοντας ε είναι το υπόλοιπο που εκφράζει την διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής $T_{6/2}$ και τις εκτιμώμενης τιμής $\hat{T}_{6/2}$ το οποίο έχει μέση τιμή ίση με μηδέν και δεν εμφανίζει καμία συγκεκριμένη δομή αφότου εφαρμοστεί η μέθοδος της παλινδρόμησης. Παρόλο που μπορεί να βρεθεί σήμα που προέρχεται από τις ετήσιες μεταβολές της διαφοράς $T_{6/2} - T_{6/4}$ στα υπόλοιπα, επειδή η διαφορά $T_{6/2} - \hat{T}_{6/2}$ είναι μόνο το ένα τρίτο της διαφοράς $T_{6/2} - T_{6/4}$ αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί μια πολύπλοκη μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης. Το σχήμα 4.1 δείχνει ότι τα απομείναντα σφάλματα είναι συνήθως μικρότερα από 50 mK. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από τον θόρυβο του καναλιού 6 που ισούται με $0.24 \text{ mW (m}^2 \text{ sr cm}^{-1})^{-1}$ (ίσο με 0.54 mK, NOAA και NASA-GSFC, 2008).

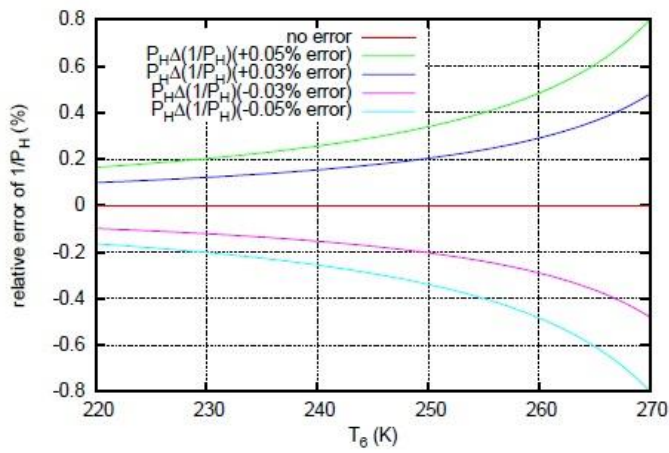
Χρησιμοποιώντας πάνω από 36 εκατομμύρια καταγραφές προσδιορίζονται οι συντελεστές παλινδρόμησης:

- $I = 2.57981$
- $S = 0.98978$



Σχήμα 4.1 Οι μέσες τιμές των υπολοίπων $T_{6/2} - \hat{T}_{6/2}$ (μπλε καμπύλη) και $T_{6/2} - T_{6/4}$ (κόκκινη καμπύλη) για την ζώνη γεωγραφικών πλατών 30°-60° Β για κάθε μέρα καταγραφών του δορυφόρου NOAA-12.

Επειδή τα υπόλοιπα $T_{6/2} - T_{6/2}$ είναι συνήθως τρεις φορές μικρότερα από ότι η διαφορά $T_{6/2} - T_{6/4}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, το σφάλμα που προκαλείται από τον προσδιορισμό της UTHi (δια μέσου του παράγοντα $1/P_H$) είναι μικρότερο με την χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης από ότι θα ήταν εάν αγνοούσαμε τελείως την διαφορά $T_{6/2} - T_{6/4}$. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ίσο με 0,03%. Το σχήμα 4.2 δείχνει αυτήν την συμβολή στην συνολική αβεβαιότητα. Πρέπει να αναφερθεί πως η αβεβαιότητα των μετρήσεων $T_{6/4}$ δεν λαμβάνεται υπόψη στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Σχετικά σφάλματα που προέρχονται από τον παράγοντα $1/P_H$, δηλαδή τον παρανομαστή της σχέσης υπολογισμού της UTHi, εξαιτίας των σφαλμάτων στις εκτιμώμενες φωτεινές θερμοκρασίες του καναλιού 6. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά τις πραγματικές τιμές (0% σφάλμα), ενώ οι άλλες γραμμές δείχνουν τα σχετικά σφάλματα του παράγοντα $1/P_H$ για σφάλμα $\pm 0.05\%$ (εξωτερικές γραμμές με πράσινο και ανοιχτό μπλε) και για σφάλμα $\pm 0.03\%$ (μπλε και μωβ γραμμές) στις εκτιμώμενες τιμές T_6 . Τα σχετικά σφάλματα προκύπτουν από τον τύπο:

$$\triangleright P_H \Delta (1/P_H) = - \left(\frac{b' T_6}{a' + b' T_6} \right) * \left(\frac{\Delta T_6}{T_6} \right)$$

Στην αρχική μέθοδο τους οι Jackson και Bates (2001) αφαίρεσαν όλες τις μετρήσεις όπου ισχύει $T_{6/2} - T_{4/2} < 20K$, και οι Gierens et al. (2004) ακολούθησαν την ίδια διαδικασία. Γενικά, η σχέση μεταξύ των μετρήσεων των φωτεινών θερμοκρασιών σε διαφορετικές εκδόσεις HIRS διαφέρει πολύ περισσότερο για το κανάλι 4 παρά για το κανάλι 6 (σχήμα 4.1 από την Shi, 2013). Γενικά, η ετήσια μεταβολή της διαφοράς $T_{4/2} - T_{4/4}$ είναι πιο έντονη από την αντίστοιχη διαφορά στο κανάλι 6. Οπότε, αποφασίστηκε να μην εφαρμοστεί η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης για το κανάλι 4. Αντί αυτού πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία των Jackson και Bates (2000) για την έκδοση 4 των οργάνων HIRS (απομάκρυνση των μετρήσεων όπου ισχύει $T_{6/4} - T_{4/4} < 20K$) και επιπλέον υπολογίζεται η UTHw και αφαιρούνται όλες οι μετρήσεις όπου ισχύει $UTHw > 100\%$. Η τελευταία συνθήκη αφορά ένα πολύ μικρό ποσοστό των συνολικών μετρήσεων, περίπου $10^{-2}\%$.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ισχύουν ότι, η ανάλυση είναι περιορισμένη σε μία ζώνη γεωγραφικού πλάτους έξω από την τροπική ζώνη, 30°- 60° B, (όπου σίγουρα αναμένεται μια ποσότητα υπερκορεσμού σε πάγο), όλες οι φωτεινές θερμοκρασίες είναι σε συνθήκες άνευ σύννεφων και όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την έρευνα είναι διορθωμένα ως προς την γωνία καταγραφής τους (Jackson and Bates, 2001). Τέλος, από το συνολικό εύρος των 50° που καταγράφουν τα όργανα HIRS χρησιμοποιείται μόνο το κεντρικό μέρος των 33°.

Για τους ενδιαφερόμενους, στον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας είτε ως προς το νερό είτε ως προς τον πάγο, η εξίσωση μπορεί να αναδιατυπωθεί έτσι ώστε η $T_{6/4}$ να εμφανίζεται απευθείας:

$$\diamond \quad U_{TH} = \frac{\exp(a + bT_{12/2})}{a' + b'(I + S T_{6/4})} = \frac{\exp(a + bT_{12/2})}{a'' + b''T_{6/4}}$$

Όπου:

- $a'' : a' + b' I$
- $b'' : b' S$

Οι όροι a' και b' λαμβάνονται από την εργασία των Jackson και Bates (2001) ενώ οι όροι I και S αναφέρονται παραπάνω.

Περισσότερα στοιχεία υπάρχουν στην έρευνα που διεξάχθηκε από τους Gierens et al. (2014).

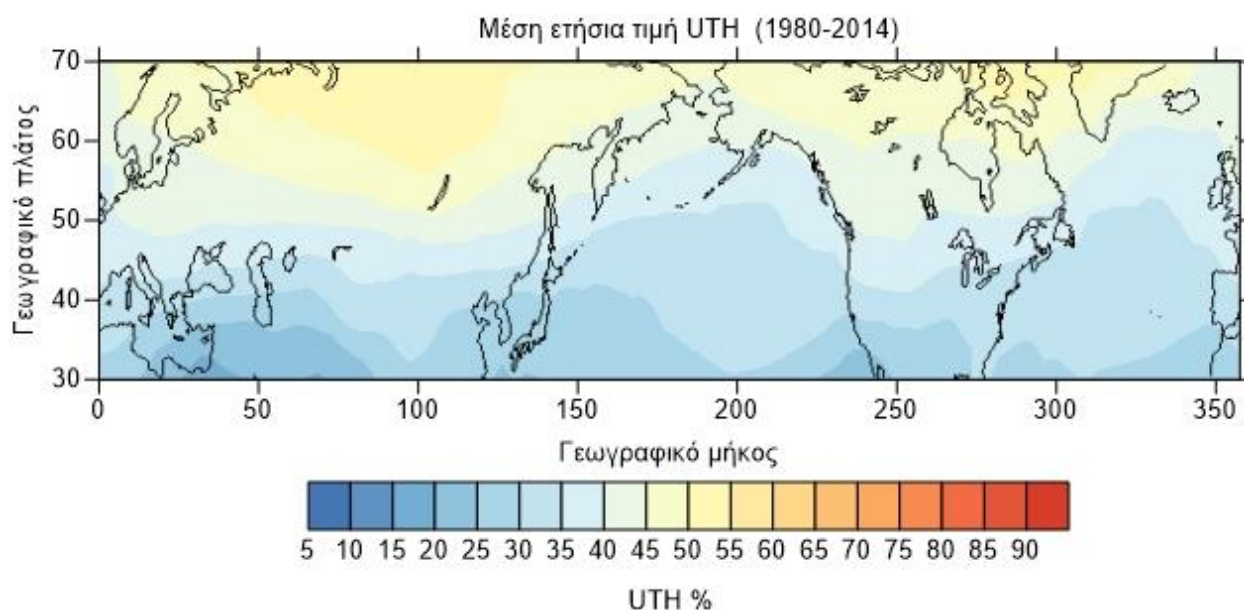
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη και μελετάται η εποχική διακύμανση της. Επίσης, αναλύεται η πιθανή επίδραση της ενδεκαετούς ηλιακής δραστηριότητας στις διακυμάνσεις της ανώτερης υγρασίας και ερευνάται η συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων και η στατιστική σημαντικότητα σε επίπεδα εμπιστοσύνης 95% και 99%.

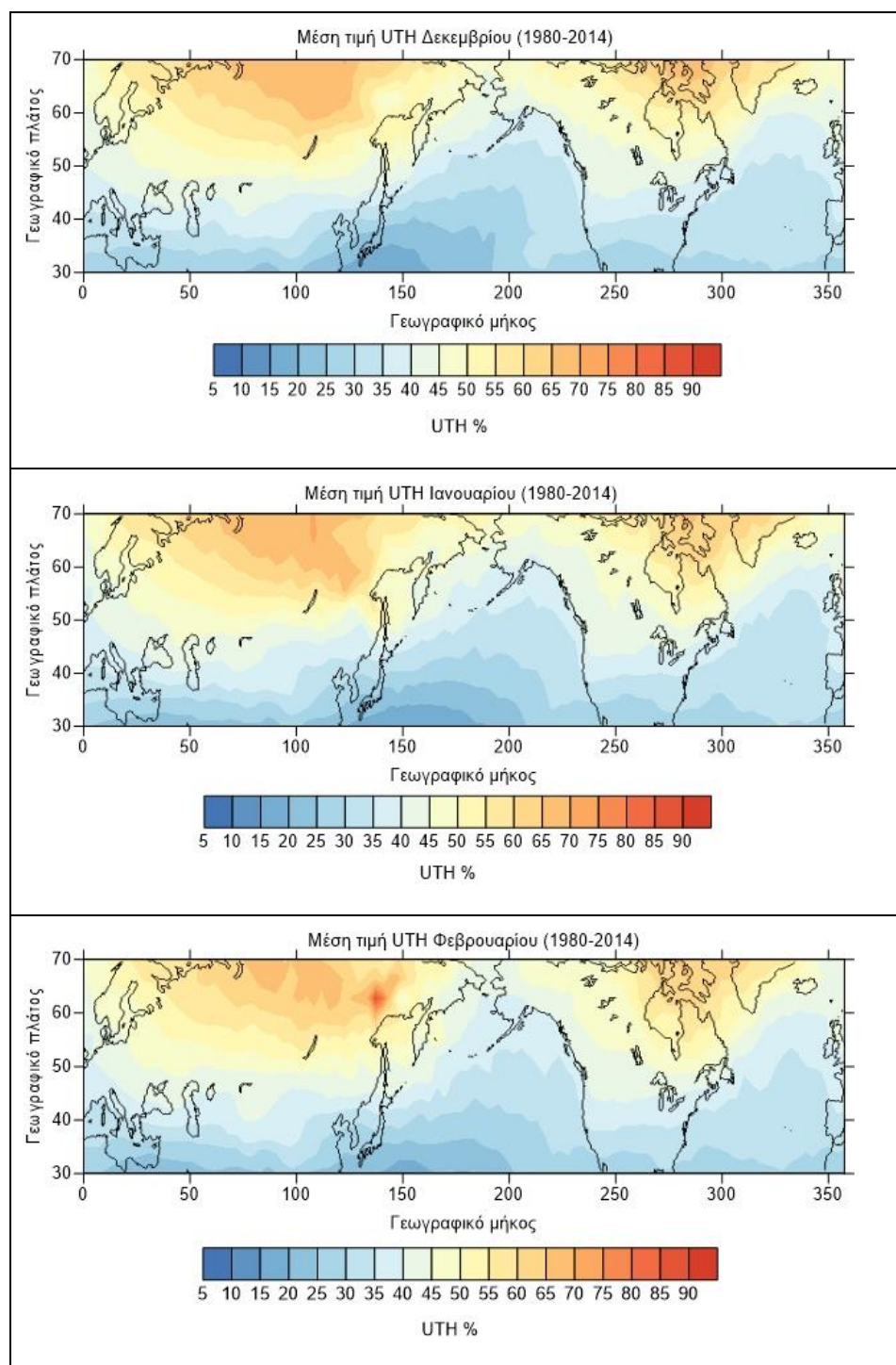
5.1 Κλιματολογία της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα

Στα ακόλουθα σχήματα, παρουσιάζονται οι χάρτες των μέσων τιμών σχετικής υγρασίας για τα γεωγραφικά πλάτη 30°-70° Βόρεια για την περίοδο 35 χρόνων από το 1980 έως το 2014. Όπως είναι λογικό, οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη κοντά στον ισημερινό ενώ οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη κοντά στις πολικές περιοχές. Εφόσον μιλάμε για σχετική υγρασία, αυτές οι διαφορές στις παρατηρήσεις οφείλονται σε μεγάλο βαθμό από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ υποπολικών και υποτροπικών περιοχών καθώς, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία επηρεάζει το κλάσμα της σχετικής υγρασίας αυξομειώνοντας την μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να κατακρατηθεί από μία μάζα αέρα.



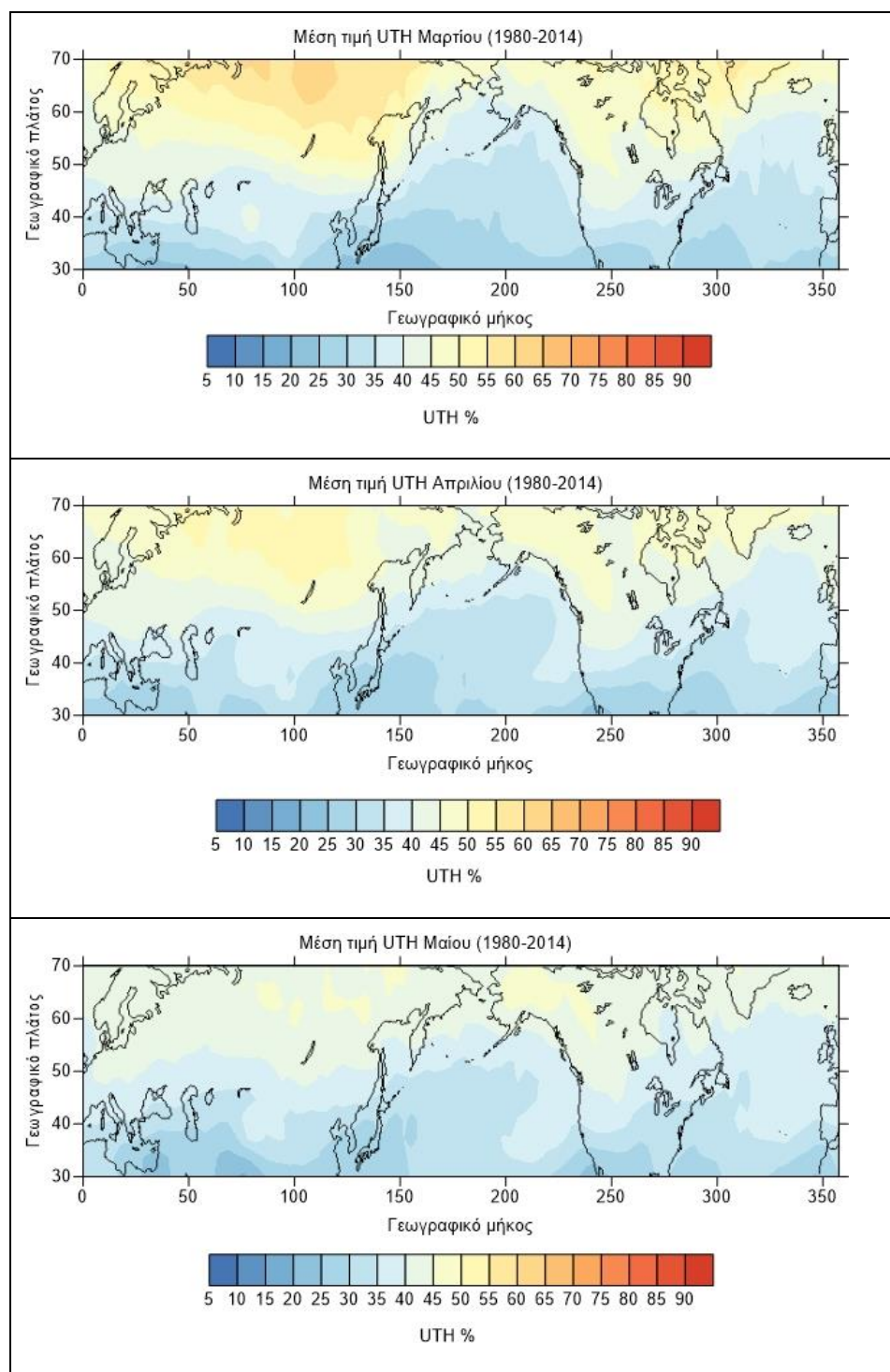
Σχήμα 5.1 Χάρτης μέσης υγρασίας της περιόδου 1980-2014

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται 3 επιμέρους χάρτες που αφορούν την μέση σχετική υγρασία της χειμερινής περιόδου Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου από το 1980 έως το 2014. Σε αυτούς τους χάρτες παρατηρούνται και οι μέγιστες τιμές σχετικής υγρασίας για το εύρος ζώνης που μελετάμε. Εμφανίζονται δύο κέντρα μέγιστων τιμών τα οποία παρατηρούνται στην Σιβηρία και τον Καναδά και αγγίζουν το 89% τον Φεβρουάριο (Σιβηρία), ενώ οι ελάχιστες τιμές σχηματίζουν ένα κέντρο στην νότια Ιαπωνία και αγγίζουν το 16% κατά την περίοδο του Δεκεμβρίου - Ιανουαρίου.



Σχήμα 5.2 Χάρτες μέσης υγρασίας του χειμώνα για την περίοδο 1980-2014

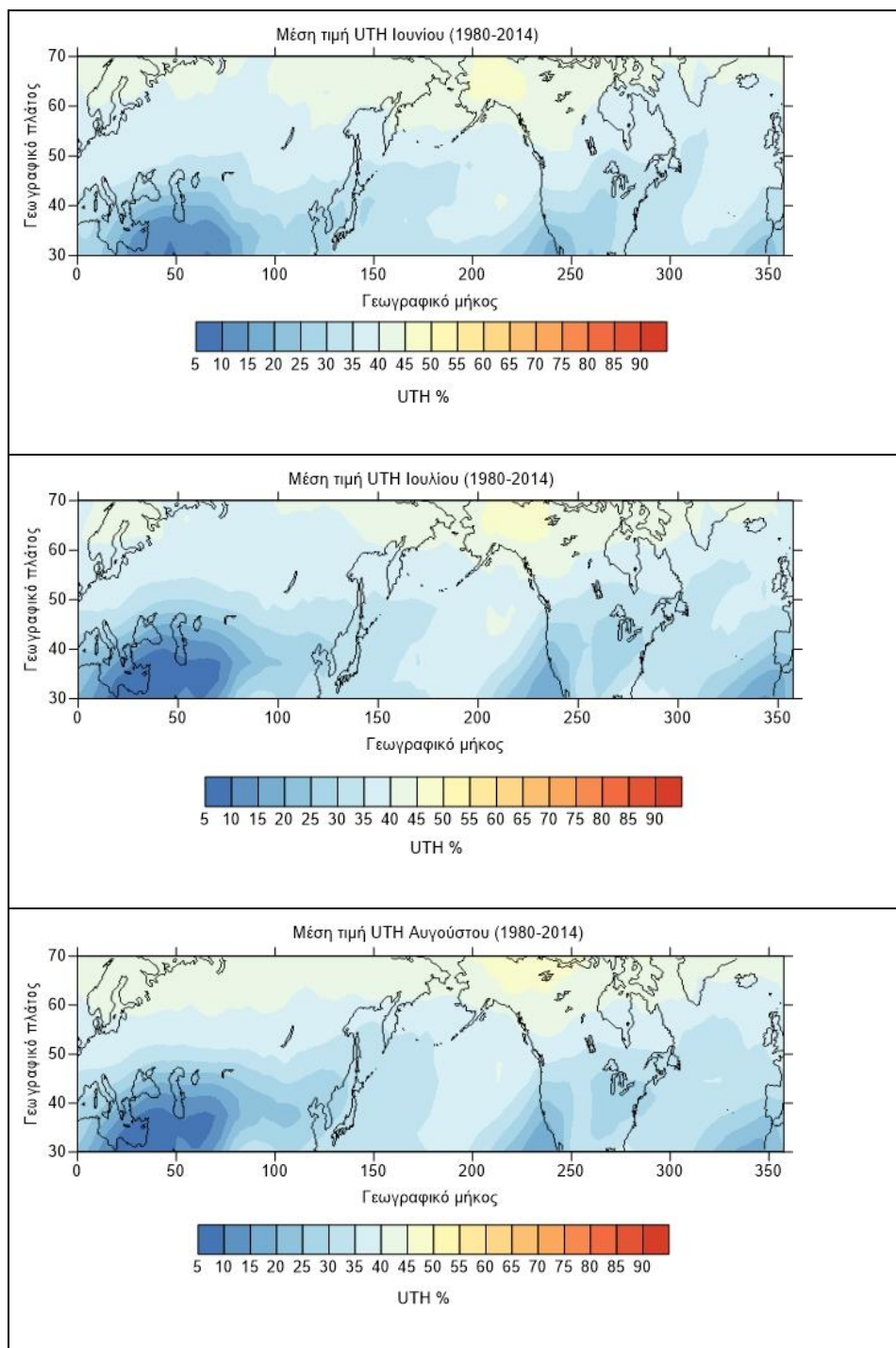
Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι τρεις επιμέρους χάρτες που αφορούν την μέση σχετική υγρασία της εαρινής περιόδου Μαρτίου-Απριλίου-Μαΐου από το 1980 έως το 2014. Τα κέντρα των μέγιστων τιμών παρατηρούνται επίσης στην Σιβηρία και τον Καναδά με μικρότερες βέβαια τιμές από την χειμερινή περίοδο, που αγγίζουν το 64% τον Μάρτιο (Σιβηρία) ενώ οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στην Κίνα και αγγίζουν το 19% κατά την περίοδο του Μαΐου.



Σχήμα 5.3: Χάρτες μέσης υγρασίας της άνοιξης για την περίοδο 1980-2014

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι τρεις επόμενοι χάρτες που αφορούν την μέση σχετική υγρασία της περιόδου Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου από το 1980 έως το 2014. Σε αυτούς τους χάρτες παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας για το εύρος ζώνης που μελετάμε. Αυτή την φορά έχουμε μόνο ένα κέντρο μέγιστων τιμών που παρατηρείται στον Καναδά ενώ οι τιμές αγγίζουν το 48% τον Αύγουστο αλλά και τον Ιούνιο. Για τις ελάχιστες τιμές σχηματίζονται τρία κέντρα στις χώρες ανατολικά της Μεσογείου, στον ανατολικό ειρηνικό

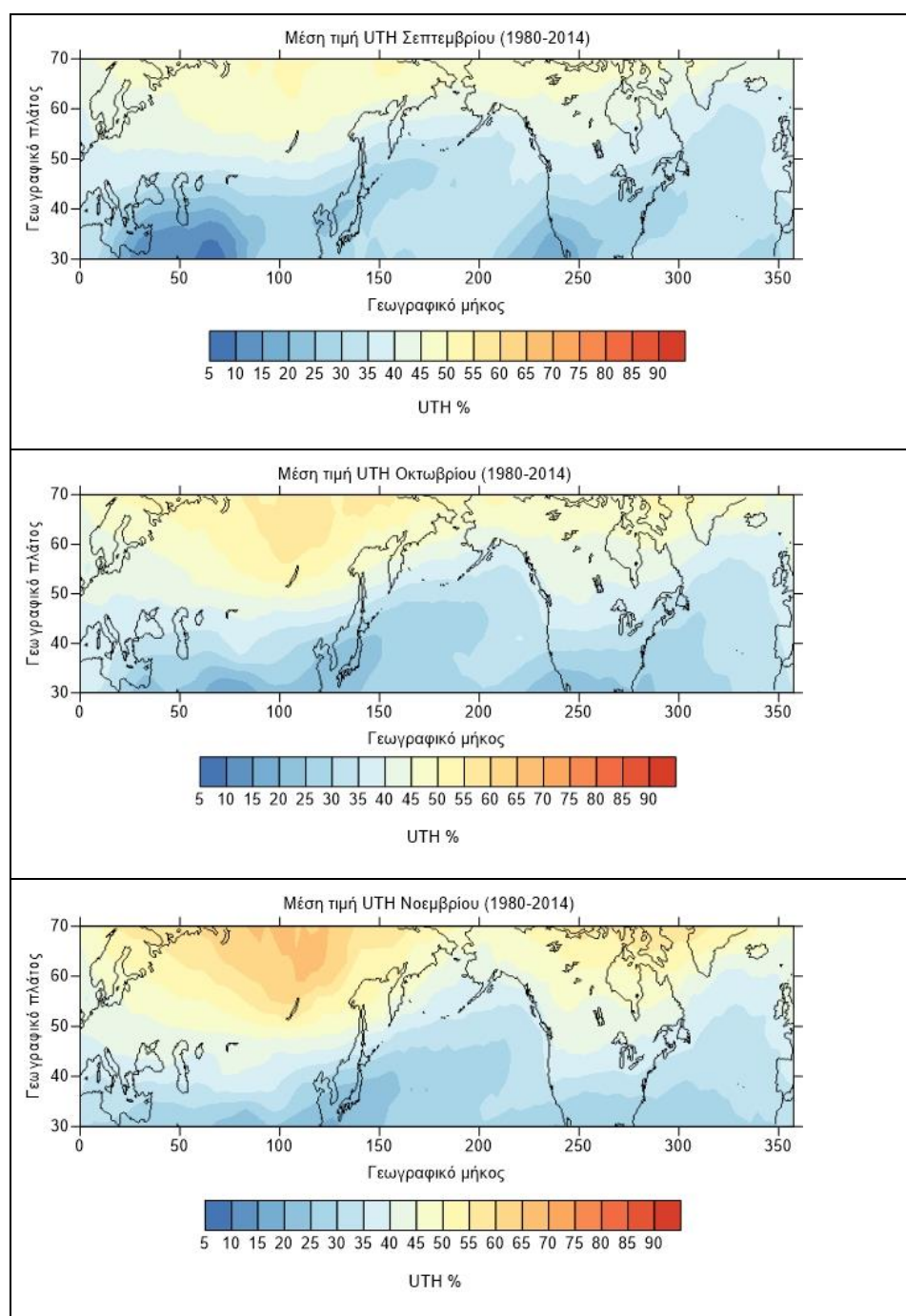
και τον ανατολικό ατλαντικό ενώ αγγίζουν το 5% κατά την περίοδο του Ιουλίου στις περιοχές ανατολικά της Μεσογείου.



Σχήμα 5.4 Χάρτες μέσης υγρασίας του καλοκαιριού για την περίοδο 1980-2014

Τέλος στο σχήμα 5.5 σχήμα για την χωρική κατανομή της σχετικής υγρασίας παρουσιάζονται οι τρεις χάρτες της περιόδου Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου-Νοεμβρίου από το 1980 έως το 2014. Σε αυτούς τους χάρτες παρατηρείται μία μέση κατάσταση υγρασίας παρόμοια με

αυτήν της άνοιξης. Σε αυτήν την περίοδο παρατηρούνται και πάλι τα δύο κέντρα μέγιστων τιμών στην Σιβηρία και τον Καναδά και οι τιμές αγγίζουν το 69% τον Νοέμβρη. Για τις χαμηλότερες τιμές σχηματίζονται δύο κέντρα στις χώρες ανατολικά της Μεσογείου και στον ανατολικό ειρηνικό κατά τον Σεπτέμβρη που στην συνέχεια σπάνε και σχηματίζεται το κέντρο που εμφανίζεται και στον δεύτερο χάρτη της χειμερινής περιόδου στην Νότια Ιαπωνία. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται τον Σεπτέμβρη στις περιοχές της ανατολικής Μεσογείου και αγγίζουν το 8%.

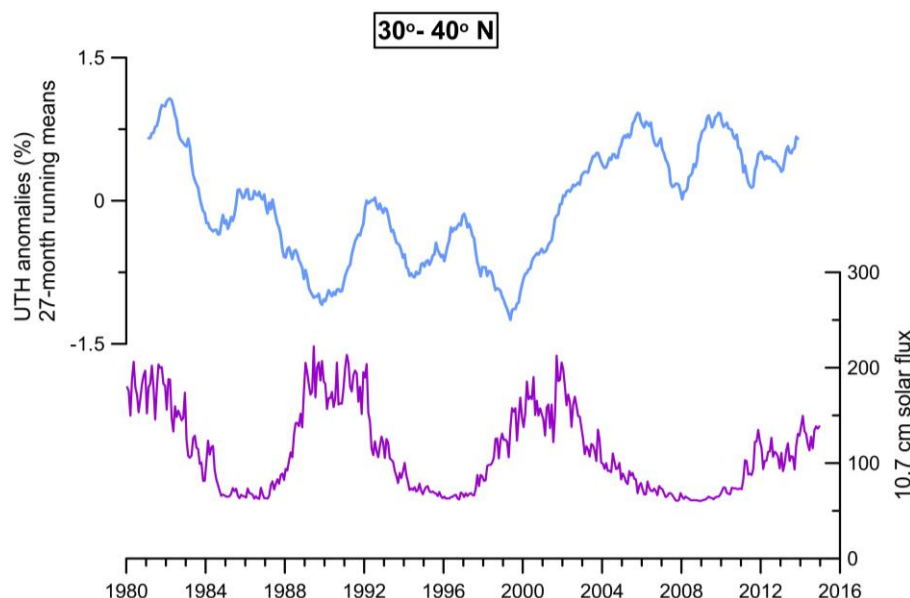


Σχήμα 5.5 Χάρτες μέσης υγρασίας του φθινοπώρου για την περίοδο 1980-2014

5.2 Η επίδραση της ηλιακής ροής στην υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας

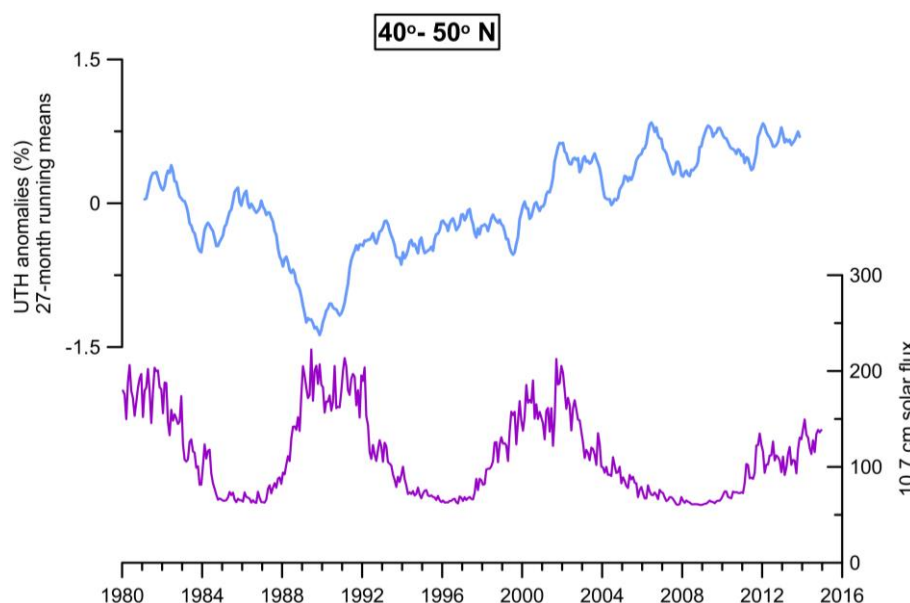
Αρχικά, γίνεται σύγκριση των γραφημάτων των ανωμαλιών (διαφορές από την μέση μηνιαία τιμή) της υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας και της ηλιακής ροής ($10^{-22} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) για διαστήματα των 10° γεωγραφικού πλάτους από τις 30° έως τις 70° (γεωγραφικό πλάτος) καθώς και για τις συνολικές ζώνες των 30° - 60° και των 30° - 70° . Με αυτόν τον τρόπο μελετάμε, εκτός από τον αν υπάρχει κάποια γενική εξάρτηση των υδρατμών στην ανώτερη τροπόσφαιρα από τον ηλιακό κύκλο, με ποιο βαθμό εκφράζεται αυτή η εξάρτηση για την κάθε ζώνη ξεχωριστά. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί πως για τις ανωμαλίες της UTH έχει εφαρμοστεί το φίλτρο 27 month running mean έτσι ώστε να απαλλαγούμε από τις ετήσιες και διετείς περιοδικές μεταβολές της υγρασίας.

Αρχικά, στο σχήμα 5.6 συγκρίνονται τα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH σε ποσοστά για τις 30° - 40° και του ηλιακού κύκλου για το διάστημα από τον Ιανουάριο του 1980 έως τον Δεκέμβριο του 2014. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι υπάρχει μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ υδρατμών και ηλιακού κύκλου καθώς περίπου στην χρονιά 1985 όπου φτάνουμε στο ελάχιστο του ηλιακού κύκλου οι ανωμαλίες της UTH ξεκινούν να αυξάνουν μέχρι να φτάσουμε κοντά στο 1988 όπου ο ηλιακός κύκλος προσπερνά το ελάχιστο και ταυτόχρονα οι ανωμαλίες ξεκινούν την κάθοδο τους. Περίπου το 1989 ο ηλιακός κύκλος φτάνει στο μέγιστο και οι ανωμαλίες φτάνουν τις ελάχιστες τιμές τους. Όμως, το 1991 οι ανωμαλίες αρχίζουν να αυξάνονται κάτι που δεν συμβαίνει με τις αντίστοιχες τιμές την ηλιακής ροής που θα παραμείνουν στο μέγιστο σημείο έως το 1992. Το ίδιο φαινόμενο φαίνεται να ισχύει και για την χρονιά 2000 όπου η ηλιακή ροή βρίσκεται στο μέγιστο και οι ανωμαλίες της UTH στο ελάχιστο ενώ και πάλι οι ανωμαλίες ξεκινούν να αυξάνονται και πάλι χωρίς να έχει ολοκληρωθεί το ηλιακό μέγιστο. Μέχρι το τέλος του 2014 υπάρχει μία αρκετά καλή αρνητική συσχέτιση. Επίσης, είναι εμφανής η παρουσία μίας δεύτερης περιοδικής μεταβολής που φαίνεται να συμβαίνει κάθε 4 χρόνια περίπου.



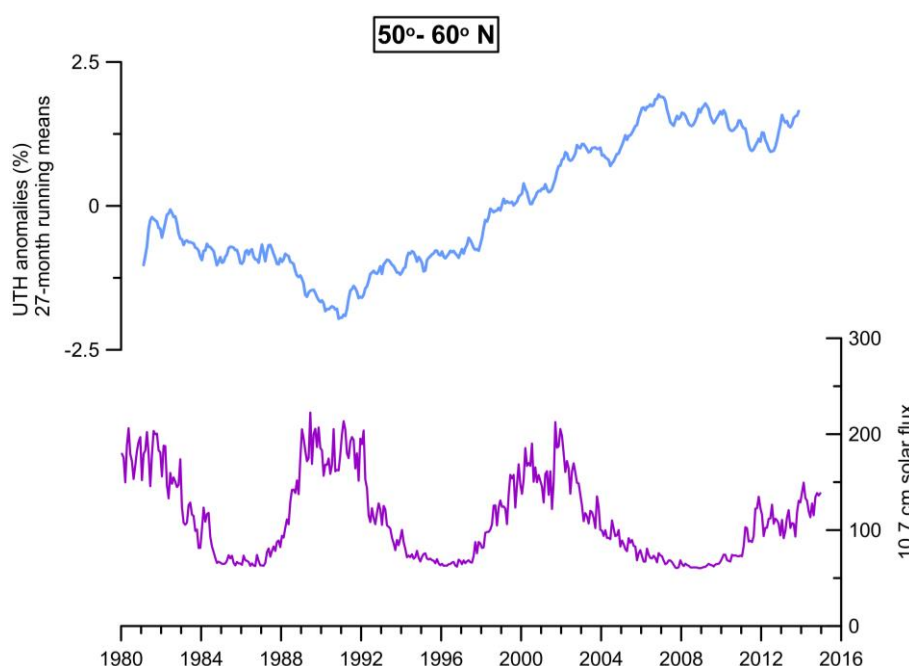
Σχήμα 5.6 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 30°-40° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

Στο επόμενο σχήμα 5.7 συγκρίνονται τα αντίστοιχα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH και του ηλιακού κύκλου για τις 40°-50° για το ίδιο διάστημα από το 1980 έως το 2014. Υπάρχουν αρκετές ομοιότητες με το προηγούμενο σχήμα 5.6 δηλαδή φαίνεται και εδώ μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ υδρατμών και ηλιακού κύκλου στις ίδιες χρονιές αλλά σε μικρότερο βαθμό. Σε συμφωνία με το 5.6 επίσης παρατηρείται άνοδος της περιεκτικότητας των υδρατμών χωρίς να έχει ολοκληρωθεί το ηλιακό μέγιστο για τις χρονιές 1991-1992 και 2001-2002. Επίσης, και εδώ είναι εμφανής η παρουσία μίας δεύτερης περιοδικής μεταβολής κάθε 4 χρόνια.



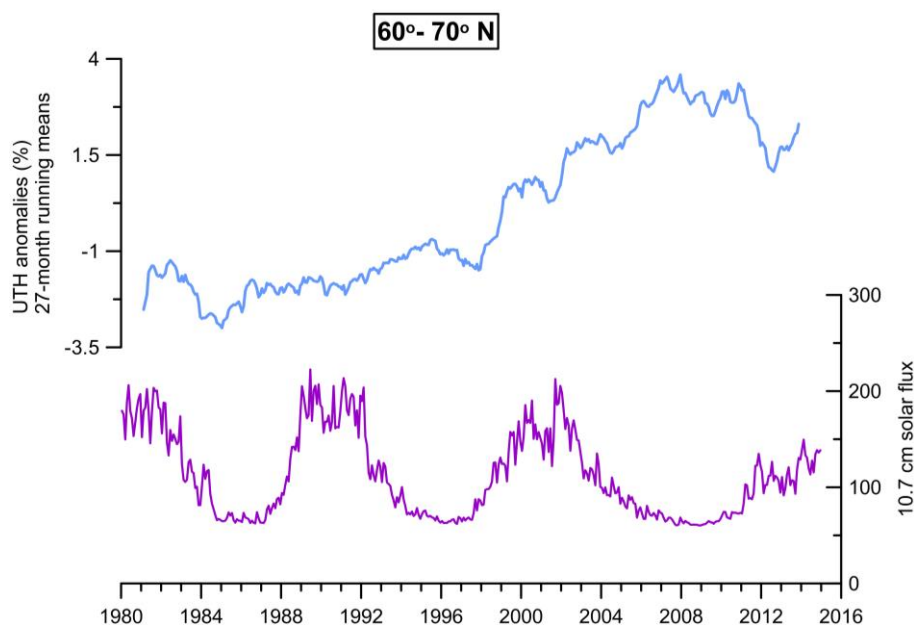
Σχήμα 5.7 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 40°-50° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

Στο επόμενο σχήμα 5.8 συγκρίνονται τα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH και του ηλιακού κύκλου για τις 50°-60° για το γνωστό πλέον χρονικό διάστημα. Η αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων για αυτήν την ζώνη χαρακτηρίζεται αρκετά ασθενέστερα σε σύγκριση με τα προηγούμενα σχήματα με εξαίρεση ίσως το ηλιακό ελάχιστο και το αντίστοιχο μέγιστο των υδρατμών γύρω στο 1989-1992 όπου και πάλι το μέγιστο των υδρατμών «σπάει» γρηγορότερα από ότι το ηλιακό ελάχιστο. Η παρουσία της δεύτερης περιοδικής μεταβολής των 4 χρόνων χαρακτηρίζεται και αυτή αρκετά ασθενής αλλά παρατηρήσιμη.



Σχήμα 5.8 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 50°-60° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

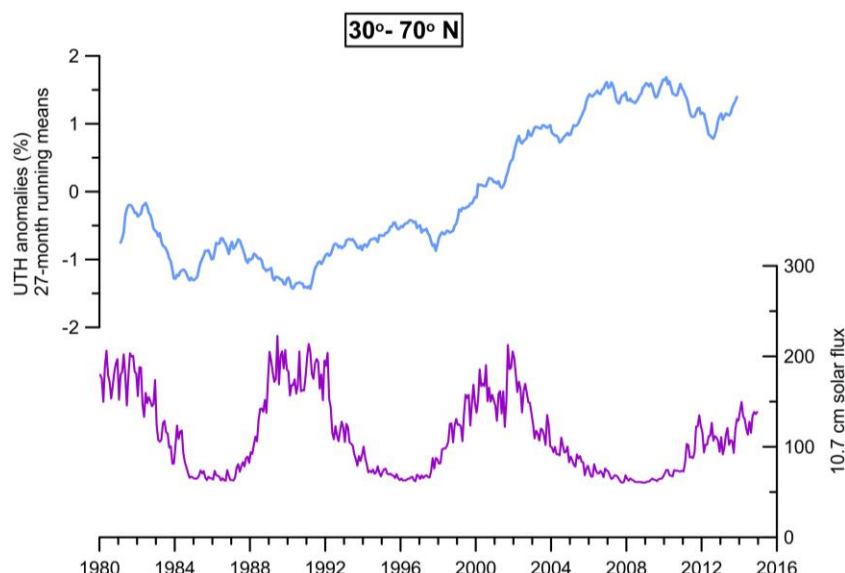
Στο σχήμα 5.9 συγκρίνονται τα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH και του ηλιακού κύκλου για τις 60°-70° για το γνωστό χρονικό διάστημα. Η αρνητική συσχέτιση είναι πολύ ασθενής και σχεδόν μηδενική. Συνολικά, η καμπύλη των ανωμαλιών UTH φαίνεται να έχει ανοδική πορεία για όλο το χρονικό φάσμα ενώ η αρνητική συσχέτιση ίσως να παρατηρείται την χρονιά 1984 όπου φαίνεται πρώτα το ηλιακό ελάχιστο και η άνοδος των ανωμαλιών, καθώς και το 2002 όπου φαίνεται η ολοκλήρωση του ηλιακού μεγίστου και η εκκίνηση της ανόδου της καμπύλης των ανωμαλιών. Τέλος, φαίνεται πολύ ασθενέστερα και η περιοδική μεταβολή των 4 περίπου χρόνων που αναφέρθηκε νωρίτερα.



Σχήμα 5.9 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 60°-70° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

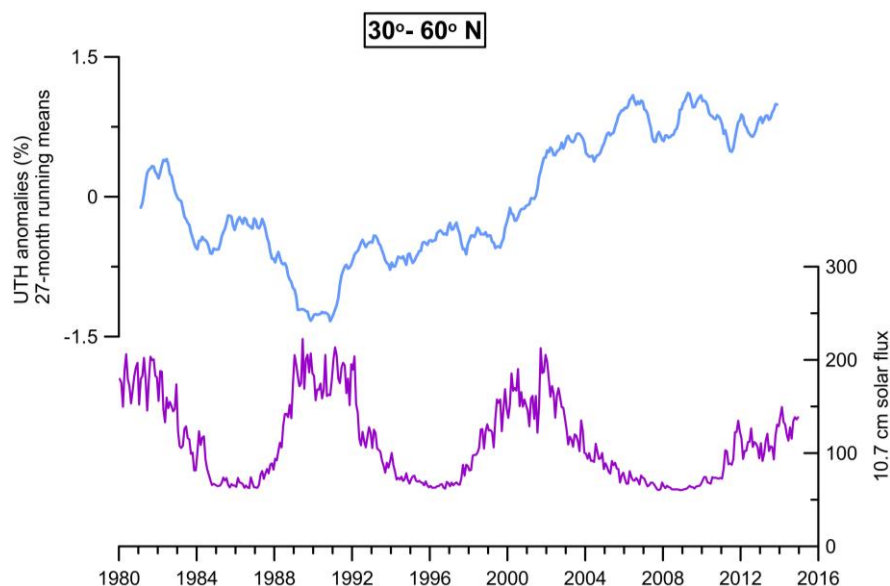
Συνολικά, οι αρνητικές συσχετίσεις των παραμέτρων για τις ζώνες των 30°-40°, 40°-50°, 50°-60° παρουσιάζουν ομοιότητες μεταξύ τους ενώ είναι πολύ πιο ισχυρές από την αρνητική συσχέτιση στην ζώνη 60°-70°. Δηλαδή, η ασθενής αρνητική συσχέτιση μεταξύ ηλιακού κύκλου και ανωμαλιών UTH της ζώνης 60°-70° φαίνεται να μην αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα της συνολικής ζώνης 30°-70°. Για αυτόν τον λόγο, εκτός από την μελέτη της συνολικής ζώνης έγινε και η αντίστοιχη μελέτη για την ζώνη 30°-60°.

Στο σχήμα 5.10 συγκρίνονται τα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH και του ηλιακού κύκλου για την συνολική ζώνη 30°-70° για το γνωστό χρονικό διάστημα. Συνολικά, φαίνεται ότι υπάρχει αρνητική συσχέτιση και πιο συγκεκριμένα στις αντίθετες μεταβάσεις από τα ελάχιστα στα μέγιστα και το ανάποδο, που αναφέρθηκαν νωρίτερα, για τα έτη 1985, 1989, 1992. Στην χρονιά 2002 παρατηρείται και πάλι να «σπάει» το ελάχιστο της υγρασίας πολύ πριν ολοκληρωθεί το ηλιακό μέγιστο. Μέχρι το τέλος της χρονοσειράς η αρνητική συσχέτιση φαίνεται να συνεχίζεται σε καλό βαθμό ενώ φαίνεται και πάλι η περιοδική μεταβολή των 4 περίπου χρόνων.



Σχήμα 5.10 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 30°-70° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

Τέλος, στο σχήμα 5.11 συγκρίνονται τα γραφήματα των ανωμαλιών της UTH και του ηλιακού κύκλου για την ζώνη 30°-60° για το ίδιο χρονικό διάστημα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, φαίνεται ότι υπάρχει μία αρκετά καλή αρνητική συσχέτιση και που φαίνεται έντονα στις χρονιές 1984, 1989, 1992, 2001. Για τις χρονιές αυτές ισχύουν οι ίδιες σχέσεις μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων που αναφέρθηκαν για προηγούμενες ζώνες αλλά σε μεγαλύτερο βαθμό. Επίσης, παρατηρείται και πάλι το φαινόμενο του «σπασίματος» του ελαχίστου των ανωμαλιών της UTH πριν από το αντίστοιχο μέγιστο του ηλιακού κύκλου τις χρονιές 1991 και 2000. Ακόμη, όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα φαίνεται επίσης μία μεταβολή περιοδικότητας 4 χρόνων περίπου.



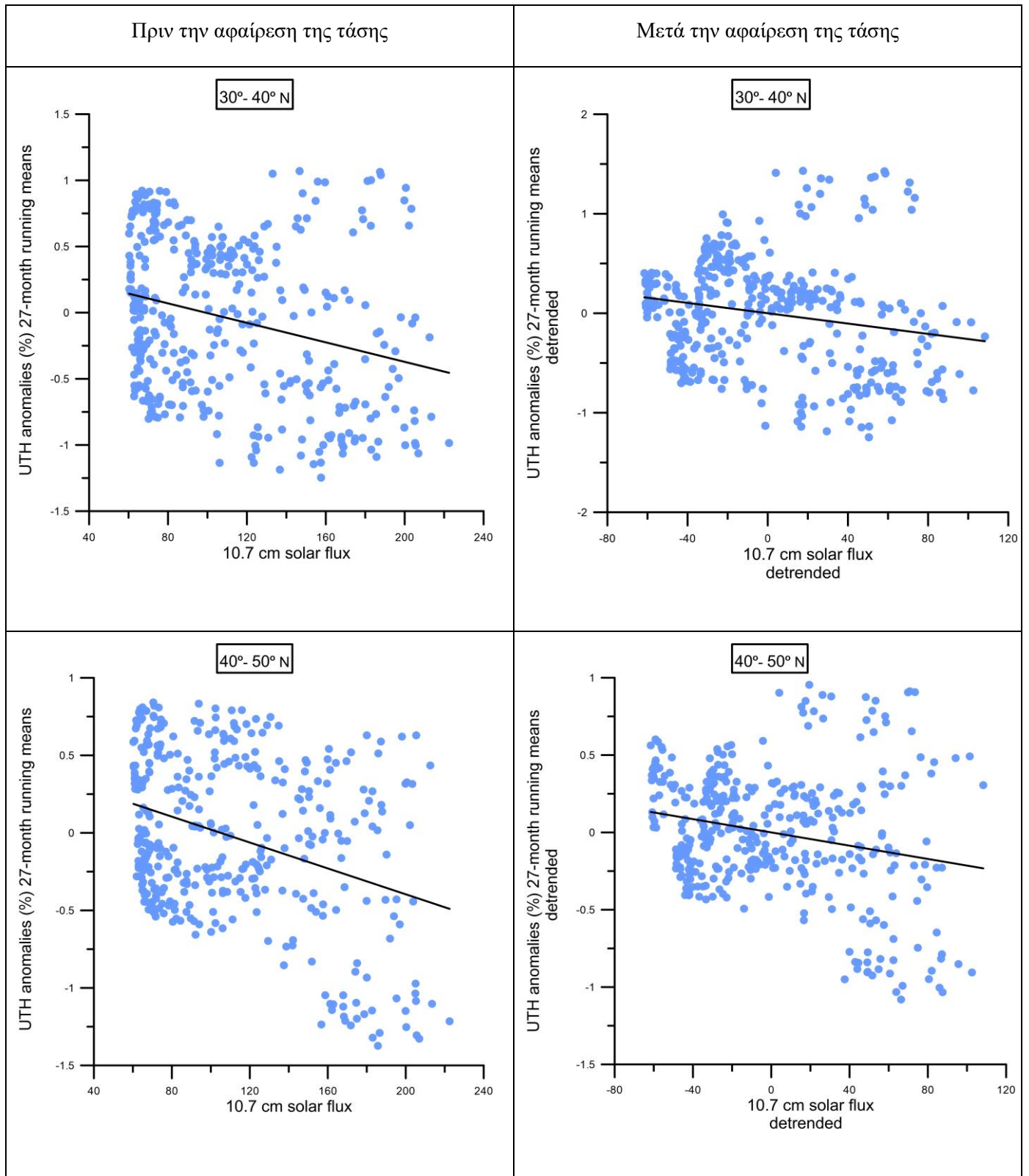
Σχήμα 5.11 Σύγκριση ανωμαλιών της UTH μεταξύ 30°-60° με τον ηλιακό κύκλο για το διάστημα 1980-2014

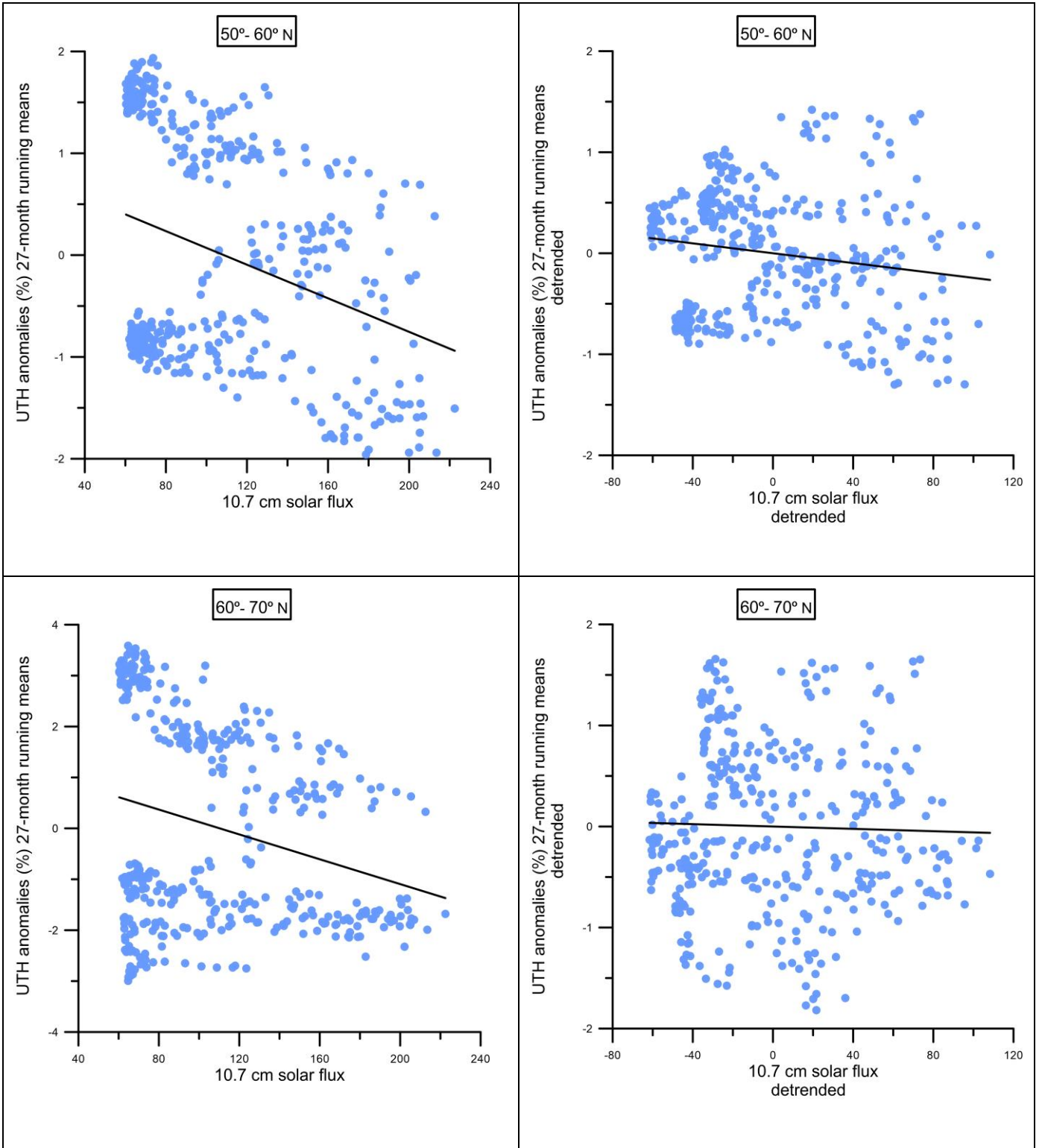
Πιο αναλυτικά, η διερεύνηση της ύπαρξης ή όχι συσχέτισης μεταξύ της ηλιακής ροής και της υγρασίας μελετήθηκε με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, δημιουργείται ένα διάγραμμα διασποράς ανάμεσα στις δύο παραμέτρους για κάθε ζώνη ξεχωριστά και υπολογίζεται η συσχέτιση τους.

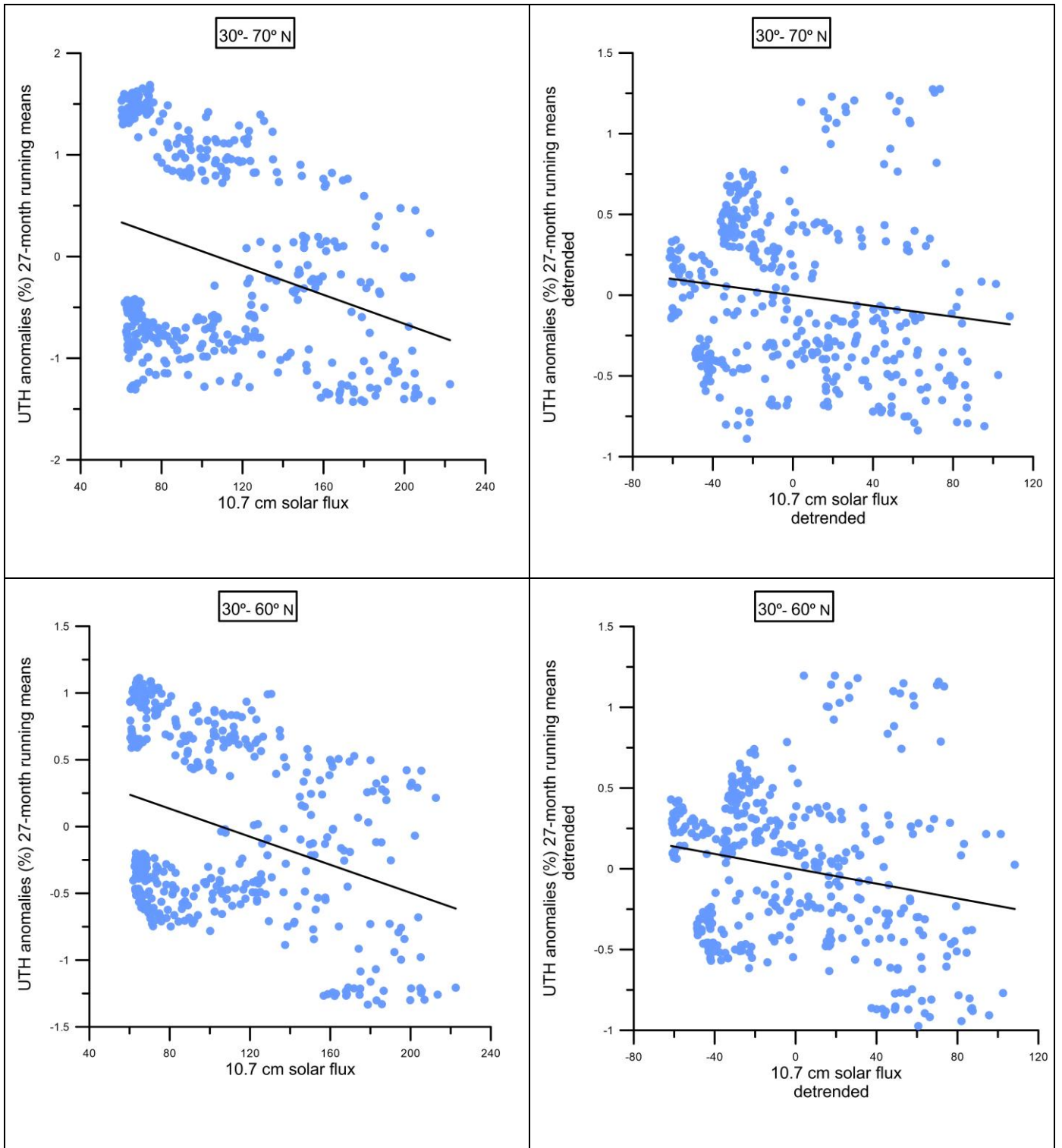
Όμως, για να αποφύγουμε φαινομενικές συσχετίσεις μεταξύ των δύο μεταβλητών έχει αφαιρεθεί η γραμμική τάση και από τις δύο χρονοσειρές. Σαφές παράδειγμα φαινομενικής συσχέτισης φαίνεται στους παρακάτω πίνακες και αφορά τα υψηλά γεωγραφικά πλάτη (60°- 70° N). Σε αυτά τα πλάτη ο συντελεστής συσχέτισης R και η στατιστική συνάρτηση t έχουν υψηλές τιμές και συγκεκριμένα σχεδόν ίσες με τις αντίστοιχες τιμές των πλατών 30°- 40° N κάτι που έρχεται σε αντίφαση με τις παρατηρήσεις από τα διαγράμματα σύγκρισης ηλιακής ροής και ανωμαλιών της υγρασίας για το συγκεκριμένο εύρος πλατών. Αυτές οι υψηλές τιμές οφείλονται στην γραμμική τάση της υγρασίας και διορθώνονται εάν αφαιρεθεί η τάση από τη μία ή και τις δύο χρονοσειρές.

Τα διαγράμματα διασποράς, οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R και της στατιστικής συνάρτησης t πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμικής τάσης παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.1 Διαγράμματα διασποράς μεταξύ της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα και του ηλιακού κύκλου σε διάφορες γεωγραφικές ζώνες







Πίνακας 5.2 Συσχέτιση μεταξύ της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα και του ηλιακού κύκλου σε διάφορες γεωγραφικές ζώνες

	Πριν την αφαίρεση της τάσης		Μετά την αφαίρεση της τάσης	
Ζώνες	R	t-test	R	t-test
30°-40°N	-0,27	-5,54	-0,19	-3,91
40°-50°N	-0,35	-7,31	-0,23	-4,58
50°-60°N	-0,32	-6,72	-0,17	-3,33
60°-70°N	-0,27	-5,51	-0,03	-0,61
30°-70°N	-0,31	-6,48	-0,14	-2,86
30°-60°N	-0,34	-7,10	-0,20	-4,14

Όπου:

- R: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης με εύρος τιμών $-1 \leq R \leq 1$
- $t = \frac{R \cdot \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-R^2}}$
 - R^2 : Συντελεστής προσδιορισμού με εύρος τιμών $0 \leq R^2 \leq 1$
 - N: Μέγεθος δείγματος

Τέλος, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων για κάθε ζώνη και για να απορριφθεί η υπόθεση αυτή θα πρέπει:

$$\text{➤ } |t| > t_{N-2; \alpha/2}$$

με $t_{N-2; \alpha/2} = 1,96$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

και $t_{N-2; \alpha/2} = 2,576$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%

Με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής συνάρτησης t ξεχωρίζουμε δύο περιπτώσεις:

- 1) Για τις ζώνες 30° - 40° , 40° - 50° , 50° - 60° , 30° - 70° , 30° - 60° N ισχύει ότι οι τιμές $|t| > t_{N-2; \frac{\alpha}{2}} = 2,576$ και οπότε, απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και η συσχέτιση για κάθε ζώνη ξεχωριστά είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%.
- 2) Για την ζώνη 60° - 70° N ισχύει ότι $|t| < t_{N-2; \frac{\alpha}{2}} = 2,576$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99% αλλά και ότι $|t| < t_{N-2; \frac{\alpha}{2}} = 1,96$ σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και οπότε επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων στα επίπεδα εμπιστοσύνης που εξετάζουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η κλιματολογία της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα από δορυφορικές μετρήσεις κατά την περίοδο 1980-2014 και αναλύθηκε η επίδραση του 11-ετούς ηλιακού κύκλου στις μεταβολές της υγρασίας. Μετά την εκτενή μελέτη της κλιματολογίας της υγρασίας και σύγκρισης της με τον 11-ετή ηλιακό κύκλο, προκύπτει ότι, τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο βρισκόμαστε. Οπότε, για τις μεμονωμένες ζώνες των βορείων γεωγραφικών πλατών 30° - 40° , 40° - 50° , 50° - 60° αλλά και τις συνολικές ζώνες των 30° - 70° , 30° - 60° ισχύει ότι η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99% και άρα είναι ασφαλές να αποδώσουμε μερικώς την μεταβλητότητα της ποσότητας των υδρατμών της ανώτερης τροπόσφαιρας στην ηλιακή δραστηριότητα. Κάτι τέτοιο όμως, δεν φαίνεται να ισχύει για την ζώνη των 60° - 70° N όπου δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων.

Συμπερασματικά, η επίδραση του 11-ετούς ηλιακού κύκλου στην υγρασία της ανώτερης τροπόσφαιρας είναι εμφανής σε συγκεκριμένες γεωγραφικές ζώνες και μπορεί να εντείνει φυσικά φαινόμενα όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω της διαδικασίας σχηματισμού σύννεφων *cirrus*. Ακόμη, πέρα από την 11-ετή περιοδική μεταβολή των υδρατμών που οφείλεται στον ηλιακό κύκλο βρέθηκε και μια δευτερεύουσα 4-ετής (κατά προσέγγιση) περιοδική μεταβολή που δεν μπορεί να αποδοθεί σε συνηθισμένα, τουλάχιστον, φυσικά φαινόμενα. Τέλος, το κατά πόσο επηρεάζει ο ηλιακός κύκλος το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς και το φαινόμενο που οφείλεται η 4-ετής περιοδική μεταβολή στην ποσότητα της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα αποτελούν πεδία έρευνας που χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας και ανάλυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Απόστολος Αθ. Φλόκας, Μαθήματα μετεωρολογίας και κλιματολογίας, Θεσσαλονίκη 1992.
- Μάνος Δανέζης και Στράτος Θεοδοσίου, Το σύμπαν που αγάπησα, εισαγωγή στην αστροφυσική, Αθήνα, 2012.
- Παναγιώτης Μαχαίρας, Χρήστος Μπαλαφούτης, Γενική κλιματολογία με στοιχεία μετεωρολογίας, Θεσσαλονίκη 1997.
- Bai, T. and Cliver, E. W., 1990, “A 154 Day Periodicity in the Occurrence Rate of Proton Flares”, *Astrophys. J.*, 363, 299–309, doi: 10.1086/169342.
- Ballester, J. L., Oliver, R. and Carbonell, M., 2002, “The Near 160 Day Periodicity in the Photospheric Magnetic Flux”, *Astrophys. J.*, 566, 505–511, doi:10.1086/338075.
- Beer, J., Tobias, S. and Weiss, N., 1998, “An active Sun throughout the Maunder Minimum”, *Solar Phys.*, 181, 237–249, doi:10.1023/A:1005026001784.
- Benevolenskaya, E. E., 1995, “Double Magnetic Cycle of Solar Activity”, *Solar Phys.*, 161, 1–8, doi:10.1007/BF00732080.
- Berggren, A.-M., Beer, J., Possnert, G. et al., 2009, “A 600-year annual ¹⁰Be record from the NGRIP ice core, Greenland”, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11801, doi:10.1029/2009GL038004
- Chen, R., Cao, C., and Menzel, W.: Intersatellite calibration of NOAA HIRS CO₂ channels for climate studies, *J. Geophys. Res.*, 118, 5190–5203, doi:10.1002/jgrd.50447, 2013.
- Clark, David H., Stephenson, F. Richard: An Interpretation of the Pre-Telescopic Sunspot Records from the Orient, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 19, p.387, Bibcode:1978QJRAS..19..387C
- David H. Hathaway, “The Solar Cycle”, *Living Rev. Solar Phys.*, 12, (2015), 4, doi:10.1007/lrsp-2015-4.
- Dickson, N., Gierens, K., Rogers, H., and Jones, R.: Vertical spatial scales of ice supersaturation and probability of ice supersaturated layers in low resolution profiles of relative humidity, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Transport, Atmosphere and Climate*, edited by: Sausen, R., van Velthoven, P., Brüning, C., and Blum, A., DLR Forschungsbericht 2010-10, 239–243, 2010.
- Eddy, J. A., 1976, “The Maunder Minimum”, *Science*, 192, 1189–1202, doi:10.1126/science.192.4245.1189.

- Gettelman, A., Fetzer, E., Elderling, A., and Irion, F.: The global distribution of supersaturation in the upper troposphere from the Atmospheric Infrared Sounder, *J. Climate*, 19, 6089–6103, 2006.
- Gierens, K., Eleftheratos, K., and Shi, L.: Technical Note: 30 years of HIRS data of upper tropospheric humidity, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 7533–7541, doi:10.5194/acp-14-7533-2014, 2014.
- Gierens, K., Kärcher, B., Mannstein, H., Mayer, B.: Aerodynamic contrails: Phenomenology and flow physics. *J. Atmos. Sci.* 66, 217–226 (2009). doi:10.1175/2008JAS2767.1.
- Gierens, K., Kohlhepp, R., Spichtinger, P., and Schroedter-Homscheidt, M.: Ice supersaturation as seen from TOVS, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 539–547, doi:10.5194/acp-4-539-2004, 2004.
- Gierens, K., Schumann, U., Helten, M., Smit, H., Marengo, A.: A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements. *Ann. Geophysicae* 17, 1218–1226 (1999). doi:10.1007/s00585-999-1218-7.
- Gierens, K., Schumann, U., Helten, M., Smit, H., Wang, P.H.: Ice-supersaturated regions and subvisible cirrus in the northern midlatitude upper troposphere. *J. Geophys. Res.* 105, 22743–22753 (2000). doi:10.1029/2000JD900341.
- Gierens, K., Spichtinger, P., and Schumann, U.: Ice supersaturation, in: *Atmospheric Physics. Background – Methods – Trends*, edited by: Schumann, U., chap. 9, 135–150, Springer, Heidelberg, Germany, 2012.
- Gierens, K., Spichtinger, P.: On the size distribution of ice-supersaturated regions in the upper troposphere and lowermost stratosphere. *Ann. Geophysicae* 18, 499–504 (2000). doi:10.1007/s00585-000-0499-7.
- Gleissberg, W., 1939, “A long-periodic fluctuation of the sun-spot numbers”, *Observatory*, 62, 158–159, Bibcode:1939Obs....62..158G.
- Gnevyshev, M. N. and Ohl, A. I., 1948, “On the 22-year cycle of solar activity”, *Astron. Zh.*, 25, 18–20.
- Hathaway, D. H., Wilson, R. M. and Reichmann, E. J., 1999, “A synthesis of solar cycle prediction techniques”, *J. Geophys. Res.*, 104(A10), 22,375–22,388, doi:10.1029/1999JA900313.
- Hathaway, D.H., Wilson, R.M. & Reichmann, E.J. *Solar Physics* (2002) 211: 357. doi:10.1023/A:1022425402664.

- Jackson, D. and Bates, J.: A 20-yr TOVS radiance Pathfinder data set for climate analysis, in: 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 80th AMS Annual Meeting, Long Beach, CA, JP4.11, 1–4, 2000.
- Jackson, D. and Bates, J.: Upper tropospheric humidity algorithm assessment, *J. Geophys. Res.*, 106, 32259–32270, 2001.
- Jensen, E.J., Smith, J.B., Pfister, L., Pittman, J.V., Weinstock, E.M., Sayres, D.S., Herman, R.L., Troy, R.F., Rosenlof, K., Thompson, T.L., et al.: Ice supersaturations exceeding 100 % at the cold tropical tropopause: implications for cirrus formation and dehydration. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 851–862 (2005). doi:10.5194/acp-5-851-2005.
- Kärcher, B., Mayer, B., Gierens, K., Burkhardt, U., Mannstein, H., Chatterjee, R.: Aerodynamic contrails: microphysics and optical properties. *J. Atmos. Sci.* 66, 227–243 (2009). doi:10.1175/2008JAS2768.1.
- Klaus Gierens, Peter Spichtinger and Ulrich Schumann, *Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends*, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- Lean, J., 1990, “Evolution of the 155 Day Periodicity in Sunspot Areas During Solar Cycles 12 to 21”, *Astrophys. J.*, 363, 718–727, doi: 10.1086/169378.
- Lübken, F.-J., Lautenbach, J., Höffner, J., Rapp, M., Zecha, M.: First continuous temperature measurements within polar mesosphere summer echoes. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 71, 453–463 (2009). doi:10.1016/j.jastp.2008.06.001.
- Ma, L. H. and Vaquero, J. M., 2009, “Is the Suess cycle present in historical naked-eye observations of sunspots?”, *New Astron.*, 14, 307–310, link:<https://doi.org/10.1016/j.newast.2008.09.003>
- Maunder, E. W., 1890, “Professor Spoerer’s Researches on Sun-spots”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 50, 51–252, Bibcode:1890MNRAS..50..251S.
- Mursula, K., Zieger, B. and Vilppola, J. H., 2003, “Mid-term Quasi-periodicities in Geomagnetic Activity During the Last 15 Solar Cycles: Connection to Solar Dynamo Strength”, *Solar Phys.*, 212, 201–207, doi:10.1023/A:1022980029618.
- NOAA and NASA-GSFC: NOAA-N Prime, Tech. Rep. Document No. NP-2008-10-056-GSFC, NOAA and NASA-GSFC, 2008.
- Ogurtsov, M. G., Nagovitsyn, Y. A., Kocharov, G. E. and Jungner, H., 2002, “Long-period cycles of the Sun’s activity recorded in direct solar data and proxies”, *Solar Phys.*, 211, 371–394, doi:10.1023/A:1022411209257.
- R. J. Bray and R. E. Loughhead, *Sunspots*, Wiley, New York, 1965 pp. 1-5.

- Rädcl, G. and Shine, K.: Evaluation of the use of radiosonde humidity data to predict the occurrence of persistent contrails, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 133, 1413–1423, 2007.
- Ribes, J. C. and Nesme-Ribes, E., 1993, “The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715”, *Astron. Astrophys.*, 276, 549–563, bibcode:1993A&A...276..549R.
- Rieger, E., Share, G. H., Forrest, D. J., Kanbach, G., Reppin, C. and Chupp, E. L., 1984, “A 154-day periodicity in the occurrence of hard solar flares?”, *Nature*, 312, 623–625, doi:10.1038/312623a0.
- Rozelot, J. P., 1994, “On the stability of the 11-year solar cycle period (and a few others)”, *Solar Phys.*, 149, 149–154, doi:10.1007/BF00645186.
- Schwabe, H., 1844, “Sonnen-Beobachtungen im Jahre 1843”, *Astron. Nachr.*, 21(495), 233–236. doi:10.1002/asna.18440211505
- Shi, L. and Bates, J.: Three decades of intersatellite-calibrated, High-Resolution Infrared Radiation Sounder upper tropospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, 116, D04108, doi:10.1029/2010JD014847, 2011.
- Shi, L., Bates, J., and Cao, C.: Scene radiance dependent intersatellite biases of HIRS longwave channels, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 25, 2219–2229, doi:10.1175/2008JTECHA1058.1, 2008.
- Shi, L.: Intersatellite differences of HIRS longwave channels between NOAA-14 and NOAA-15 and between NOAA-17 and METOP-A, *IEEE T. Geosci. Remote*, 51, 1414–1424, 2013.
- Soden, B. and Bretherton, F.: Upper tropospheric relative humidity from the GOES 6.7 μm channel: Method and climatology for July 1987, *J. Geophys. Res.*, 98, 16669–16688, 1993.
- Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M. and Beer, J., 2004, “Unusual activity of the Sun during the previous 11,000 years”, *Nature*, 431, 1084–1087, doi:10.1038/nature02995.
- Spichtinger, P., Gierens, K., and Read, W.: The global distribution of ice-supersaturated regions as seen by the Microwave Limb Sounder, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 129, 3391–3410, 2003b.
- Spichtinger, P., Gierens, K., Leiterer, U., and Dier, H.: Ice supersaturation in the tropopause region over Lindenberg, Germany, *Meteorol. Z.*, 12, 143–156, 2003a.

- Spichtinger, P., Gierens, K., Read, W.: The statistical distribution law of relative humidity in the global tropopause region. *Meteorol. Z.* 11, 83–88 (2002). doi:10.1127/0941-2948/2002/0011-0083.
- Suess, H. E., 1980, “The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years”, *Radiocarbon*, 22, 200–209.
- Svalgaard, L., 2012, “How well do we know the sunspot number?”, in *Comparative Magnetic Minima: Characterizing Quiet Times in the Sun and Stars*, (Eds.) Mandrini, C. H., Webb, D. F., IAU Symposium, 286, pp. 27–33, Cambridge University Press, Cambridge· New York, doi: <https://doi.org/10.1017/S1743921312004590>.
- Tapping, K.F. & Charrois, D.P. *Sol Phys* (1994) 150: 305. doi:10.1007/BF00712892.
- Tompkins, A., Gierens, K., Rädcl, G.: Ice supersaturation in the ECMWF Integrated Forecast System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133, 53–63 (2007). doi:10.1002/qj.14.
- Treffeisen, R., Krejci, R., Ström, J., Engvall, A. C., Herber, A., and Thomason, L.: Humidity observations in the Arctic troposphere over Ny-Ålesund, Svalbard based on 15 years of radiosonde data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2721–2732, doi:10.5194/acp-7-2721-2007, 2007.
- Usoskin, I. G., 2013, “A History of Solar Activity over Millennia”, *Living Rev. Solar Phys.*, 10, lrsp-2013-1, doi:10.12942/lrsp-2013-1
- Vonmoos, M. V., Beer, J. and Muscheler, R., 2006, “Large variations in Holocene solar activity: Constraints from ^{10}Be in the Greenland Ice Core Project ice core”, *J. Geophys. Res.*, 111(A10), A10105, doi:10.1029/2005JA011500.
- Wang, Y.-M. and Sheeley Jr, N. R., 2003, “On the fluctuating component of the Sun’s large-scale magnetic field”, *Astrophys. J.*, 590, 1111–1120, doi:10.1086/375026.
- Weatherhead, E., Reinsel, G., Tiao, G., Meng, X.-L., Choi, D., Cheang, W.-K., Keller, T., DeLuisi, J., Wuebbles, D., Kerr, J., Miller, A., Oltmans, S., and Frederick, J.: Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data, *J. Geophys. Res.*, 103, 17149–17161, doi:10.1029/98JD00995, 1998.
- Wegener, A.: *Meteorologische Terminbeobachtungen am Danmarks-Havn. Meddelelser om Grønland, Vol. XLII: Danmark-Ekspeditionen til Grønlands Nordøstkyst 1906-1908 II*, 125–356 (1914).
- Wilson, R. M., 1988, “On the Long-term Secular Increase in Sunspot Number”, *Solar Phys.*, 115, 397–408, doi:10.1007/BF00148736.

- Zerefos, C. S., Tourpali, K., Eleftheratos, K., Kazadzis, S., Meleti, C., Feister, U., Koskela, T., and Heikkilä, A.: Evidence of a possible turning point in solar UV-B over Canada, Europe and Japan, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2469–2477, doi:10.5194/acp-12-2469-2012, 2012.

Πηγές από το διαδίκτυο

- https://el.wikipedia.org/wiki/Αστρικό_στέμμα
- https://el.wikipedia.org/wiki/Ατμόσφαιρα_της_γης
- <https://el.wikipedia.org/wiki/Ηλιος>
- https://el.wikipedia.org/wiki/Φαινόμενο_του_θερμοκηπίου
- <http://www1.aegean.gr/gympeir/thermokipio.htm>
- https://www.doyk.gr/vivliothiki/pdf/perivallon/fainomeno_thermokipiou.pdf
- <http://www1.aegean.gr/gympeir/thermokipio.htm>
- <https://www.meteo.gr/meteoplus/pdf/thermokipio.pdf>
- https://www.moa.gov.cy/moa/ms/ms.nsf/DMLradiosonde_gr/DMLradiosonde_gr?OpenDocument
- <https://www.nasa.gov/content/goddard/largest-sunspot-of-solar-cycle>
- <https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-solar-flare>
- <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/sdo/potw635-cme-blow-out>
- https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20110917-aurora-space.html
- <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1304-positive-and-negative-effects-of-uv>

