



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΟΥΚΗ BENETIA
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ
ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΡΑΝΤΑΡ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024



ΚΟΥΚΗ ΒΕΝΕΤΙΑ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 6094

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΡΑΝΤΑΡ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Επιβλέπων:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΜΠΙΖΕΛΗΣ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δημήτριο Μπαμπζέλη, για τη βοήθεια και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών του ΕΛΓΑ για την ευγενική παραχώρηση των δεδομένων του μετεωρολογικού ραντάρ.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξη και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τα μετεωρολογικά ραντάρ, καθώς και την μελέτη κυττάρων καταιγίδων στην Κεντρική Μακεδονία. Στο εισαγωγικό κομμάτι αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τη σημασία της μετεωρολογίας στη ζωή του ανθρώπου. Έπειτα, αποσαφηνίζεται η έννοια της καταιγίδας και ο τρόπος εξέλιξης της, προκειμένου να γίνει κατανοητό το περιεχόμενο της εργασίας. Ξεκινώντας με το πρώτο μέρος, παρατίθενται κάποια ιστορικά στοιχεία για τον τρόπο δημιουργίας των ραντάρ και τη χρήση τους, ενώ έπειτα εξηγήθηκαν αναλυτικά, η αρχή της λειτουργίας τους, τα είδη και τα χαρακτηριστικά τους, οι μέθοδοι σάρωσης, η εξίσωση του ραντάρ και το σύστημα TITAN. Αναφέρθηκε, ακόμη, το δίκτυο των μετεωρολογικών ραντάρ στον ελληνικό χώρο και η εξέλιξή του με την πάροδο των χρόνων. Στη συνέχεια έγινε παρουσίαση του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας του ΕΛΓΑ, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ιστορία του προγράμματος, στις περιοχές που εφαρμόζεται αλλά και στη μεθοδολογία που ακολουθεί. Περνώντας στο δεύτερο μέρος, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά ενός κυττάρου καταιγίδας, χρονικά, κινηματικά, χωρικά και δυναμικά. Ακολούθησε η διευκρίνιση της μεθοδολογίας της μελέτης και της φύσης των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, η οποία συνοδεύτηκε από μία επίδειξη του τρόπου επεξεργασίας αυτών. Τα εν λόγω δεδομένα προέρχονται από μετεωρολογικό ραντάρ, αφορούν την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας, την περίοδο μεταξύ 2011 με 2020 και παρέχονται από το Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιείται σε έξι βασικά χαρακτηριστικά, την ταχύτητα, τον όγκο, την μάζα, την επιφάνεια, το ύψος της κορυφής και τέλος τον παράγοντα ανακλαστικότητας. Η εργασία ολοκληρώνεται με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τη διάκριση συγκεκριμένων καταιγίδων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις «μέσες» καταιγίδες για κάθε μήνα.

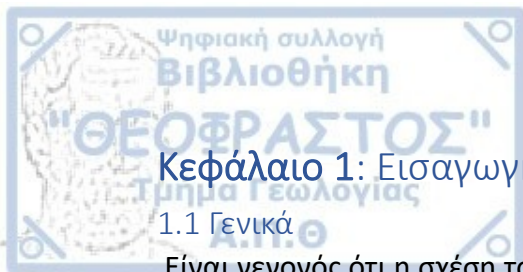


This thesis deals with meteorological radar and studies storm cells in the region of Central Macedonia. In the introductory section, a few general points are made about the significance of meteorology in human life. Then, the concept of a storm and its development are explained in order to provide a clearer understanding of what follows. In the first part, there is some historical data on the creation of radars and their use. This is followed by a detailed explanation of how they work, their types and characteristics, scanning methods, the radar equation and the TITAN system. In addition, there was also a reference to the meteorological radar network in Greece and its evolution over the years. Next, there is a presentation of the Greek National Hail Control Program of ELGA, focusing on the history of the project, the areas where it is applied and the methodology used. The second part of the thesis describes the characteristics of a storm cell, which are classified into four categories: temporal, kinematic, spatial and dynamic. The methodology of the study and the nature of the data used were then elucidated. The data in question were obtained from a meteorological radar, covering the region of Central Macedonia, for the period between 2011 and 2020 and provided by the Centre for Meteorological Applications. The statistical analysis is performed on six main characteristics: speed, volume, mass, envelope area, top and finally radar reflectivity dBz. The paper concludes by interpreting the results and distinguishing specific storms that represent the average storm for each month.



Περιεχόμενα

Περίληψη - Abstract	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Καταιγίδες	7
Κεφάλαιο 2: Μετεωρολογικά ραντάρ	9
2.1 Ιστορικά στοιχεία - Δημιουργία των ραντάρ	9
2.2 Αρχή λειτουργίας των ραντάρ.....	9
2.3 Είδη μετεωρολογικών ραντάρ.....	11
2.4 Μέθοδοι σάρωσης	12
2.5 Εξίσωση του ραντάρ.....	15
2.6 Σύστημα TITAN	16
2.7 Δίκτυο ραντάρ στην Ελλάδα.....	17
2.8 Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζιακής Προστασίας (ΕΠΧΠ)	18
2.8.1 Ιστορία του προγράμματος.....	18
2.8.2 Περιοχές Προστασίας.....	18
2.8.3 Αρχή λειτουργίας και τομείς του προγράμματος	19
Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία δεδομένων και μεθοδολογία	21
3.1 Χαρακτηριστικά κυττάρων καταιγίδων.....	21
3.2 Επεξεργασία των δεδομένων	25
Κεφάλαιο 4: Ανάλυση χαρακτηριστικών κυττάρων καταιγίδας	27
4.1 Κινηματικά.....	27
4.2 Χωρικά.....	29
4.3 Δυναμικά	38
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	42
Βιβλιογραφία	47



Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Είναι γεγονός ότι η σχέση του ανθρώπου και της επιστήμης ξεκίνησε από πάρα πολύ παλιά και η μετεωρολογία είναι ίσως η πρώτη επιστήμη που απασχόλησε τον άνθρωπο. Ο ορός *μετεωρολογία* προέρχεται από την ελληνική λέξη *μετέωρο*, το οποίο απευθύνεται σε οτιδήποτε πέφτει από τον ουρανό. Ο Αριστοτέλης ήταν από τους πρώτους που εισήγαγε την έννοια της μετεωρολογίας μέσα απ' το έργο του, «Μετεωρολογικά». Εκεί συγκεντρωνόταν οι γνώσεις της εποχής και τα φαινόμενα εξετάζονταν τόσο από επιστημονική, όσο και φιλοσοφική σκοπιά (Ahrens & Henson, 2023). Από τη νεολιθική εποχή, στην ελληνιστική περίοδο, στην επιστημονική επανάσταση μέχρι και σήμερα ο άνθρωπος προσπαθεί να κατανοήσει το σύμπαν και η αρχή της ερμηνείας του ξεκινά απ' την παρατήρηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Η διάφορα με τη σύγχρονη εποχή είναι ότι ο άνθρωπος, όχι μόνο κατανοεί τα φυσικά φαινόμενα, αλλά έχει και τα καταλληλά εφόδια και μέσα για να τα τροποποιήσει. Τα μετεωρολογικά ραντάρ, τα οποία αποτελούν και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι ίσως το σημαντικότερο εργαλείο που ανέπτυξε για αυτό το σκοπό. Η χρήση των ραντάρ καιρού ανά τα χρόνια έχει βελτιώσει την αντίληψη του ανθρώπου για την φύση των καταιγίδων και έχει ωφελήσει την κοινωνία, προσφέροντας χρήσιμες και έγκυρες πληροφορίες για τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια, η περιοχή της Μεσογείου έχει πληγεί πολλές φορές από έντονα καιρικά φαινόμενα και η Ελλάδα συχνά αποτελεί δίοδο αυτών. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών των κυττάρων καταιγίδων που αναπτύσσονται στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας κατά τη θερμή περίοδο του έτους με τη χρήση μετεωρολογικού ραντάρ. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά των κυττάρων ανά μήνα και εξάγονται συμπεράσματα για την κατανομή τους.

1.2 Καταιγίδες

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η δομή και το περιεχόμενο αυτής της διπλωματικής, είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί η έννοια της καταιγίδας και ο τρόπος που λειτουργεί. Η καταιγίδα, αποτελεί ένα βίαιο ατμοσφαιρικό φαινόμενο, το οποίο συνοδεύεται από κατακρημνίσματα (βροχή, χαλάζι), ισχυρούς ανέμους και ηλεκτρικές εκκενώσεις. Η ζωή μιας καταιγίδας, δηλαδή η δημιουργία και η εξέλιξη της, χαρακτηρίζεται από 3 στάδια (Μακρογιάννης, Σαχσαμάνογλου, 2004). Το στάδιο ανάπτυξης, κατά το οποίο ξεκινά η γένεση μια καταιγίδας εξ αιτίας κάποιας ατμοσφαιρικής αστάθειας. Μια αέρια μάζα αναγκάζεται να κινηθεί κατακόρυφα με αποτέλεσμα την δημιουργία νεφών. Συγκεκριμένα, νεφών τύπου Cumulus και Cumulonimbus (σωρειτομελανία) με το χαρακτηριστικό σχήμα, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 1.1. Το νέφος ψύχεται απότομα, λόγω της αύξησης της ταχύτητας των ανοδικών ρευμάτων και δημιουργούνται υδροσταγονίδια και παγοκρύσταλλοι. Όταν το βάρος τους ξεπεράσει το βάρος που μπορεί να συγκρατήσει το εκάστοτε νέφος, πέφτουν σε μορφή βροχής ή χαλαζιού. Η εμφάνιση κατακρημνισμάτων σηματοδοτεί

την αρχή του σταδίου ωρίμανσης. Σε αυτό το στάδιο εμφανίζεται ένα καθοδικό ρεύμα, δίπλα στο ανοδικό, με μικρότερες ταχύτητες (ταχύτητα ανοδικού ρεύματος $\approx 2 \times$ Ταχύτητα καθοδικού ρεύματος). Στο στάδιο της ωρίμανσης παρατηρείται το μέγιστο των φαινομένων στο έδαφος. - Στο έδαφος παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας και της πίεσης, ισχυρές ριπές ανέμου και έντονες βροχοπτώσεις, που ενίοτε συνοδεύονται από χαλάζι. Το στάδιο ωρίμανσης διαδέχεται, τελικά, το στάδιο διάλυσης. Σε αυτή τη φάση τα ανοδικά ρεύματα έχουν εξασθενήσει και κυριαρχεί πλέον το καθοδικό ρεύμα. Εξ' αιτίας αυτής της αποδυνάμωσης των ρευμάτων, η κορυφή του νέφους παρασύρεται από την κυκλοφορία στην τροπόσφαιρα και τελικά διαλύεται. Αντίστοιχα, τα φαινόμενα κάτω από την καταιγίδα ελαττώνονται μέχρι να σταματήσουν τελείως και το νέφος να διαλυθεί (Μακρογιάννης, Σαχσαμάνογλου, 2004).



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση νέφους Cumulonimbus (Stack Exchange Network, διαθέσιμο στο: <https://aviation.stackexchange.com/questions/16700/why-is-the-cumulonimbus-cloud-formation-so-dangerous>).

Κεφάλαιο 2: Μετεωρολογικά ραντάρ

2.1 Ιστορικά στοιχεία- Δημιουργία των ραντάρ

Τα ραντάρ είναι όργανα τηλεπισκόπησης με ευρεία εφαρμογή σε διάφορους κλάδους της επιστήμης, συμπεριλαμβανομένου και της μετεωρολογίας. Η λέξη ραντάρ προέρχεται από το radio detection and ranging, δηλαδή την ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως, ενώ στα ελληνικά εμφανίζονται και με τον όρο ραδιοεντοπιστές (Καρτάλης, Φείδας, 2013)

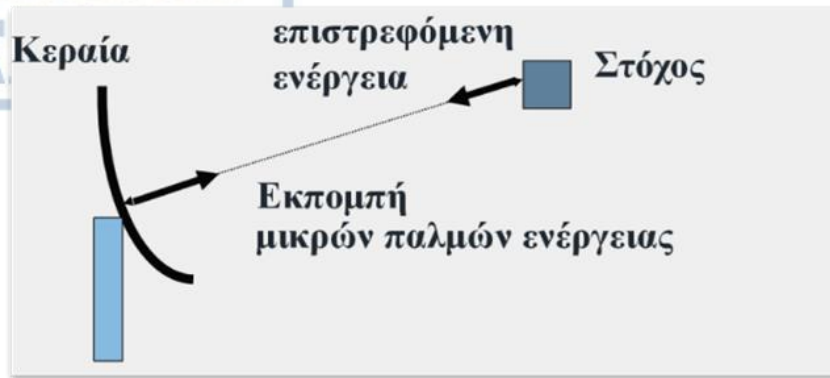
Η ιστορία των ραντάρ ξεκινά το 19ο αιώνα και θεμέλιο της δημιουργίας τους αποτελεί η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Σκωτσέζου φυσικού James Clerk Maxwell. Ο Maxwell απέδειξε, θεωρητικά, ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ανακαλούνται πάνω σε μεταλλικά αντικείμενα. Τη θεωρία αυτή επαληθεύει και ο Nikola Tesla, ο οποίος κάνοντας πειράματα παρατήρησε ότι τα αντικείμενα παρεμβαίνουν στην μετάδοση των κυμάτων. Με βάση αυτό λοιπόν, στις αρχές του 20ου αιώνα ο Tesla πρότεινε την ανάπτυξη ενός οργάνου για την ανίχνευση στόχων, με τη χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Γενικά, η δημιουργία των ραντάρ αποτελεί περισσότερο συλλογικό παρά ατομικό έργο, καθώς μετά τον Tesla πολλοί επιστήμονες αποπειράθηκαν την ανάπτυξη ενός οργάνου γι' αυτό τον σκοπό. Τελικά, το πρώτο ραντάρ που λειτούργησε επιτυχώς κατασκευάστηκε από το Εθνικό εργαστήριο φυσικής της Μεγάλης Βρετανίας με επικεφαλής τον Robert Watson-Watt. (Tapan K. Sarkar, et al., 2016)

Η αξιοποίηση των ραντάρ κορυφώθηκε στον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, όπου χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση εχθρικών αεροσκαφών και πλοίων, για την εύρεση στόχων βομβαρδισμού, καθώς και για την πλοήγηση των αεροσκαφών και των πλοίων σε αντίξοες συνθήκες. (Tapan K. Sarkar, et al., 2014, Guarnieri, 2010, Strong, 2005)

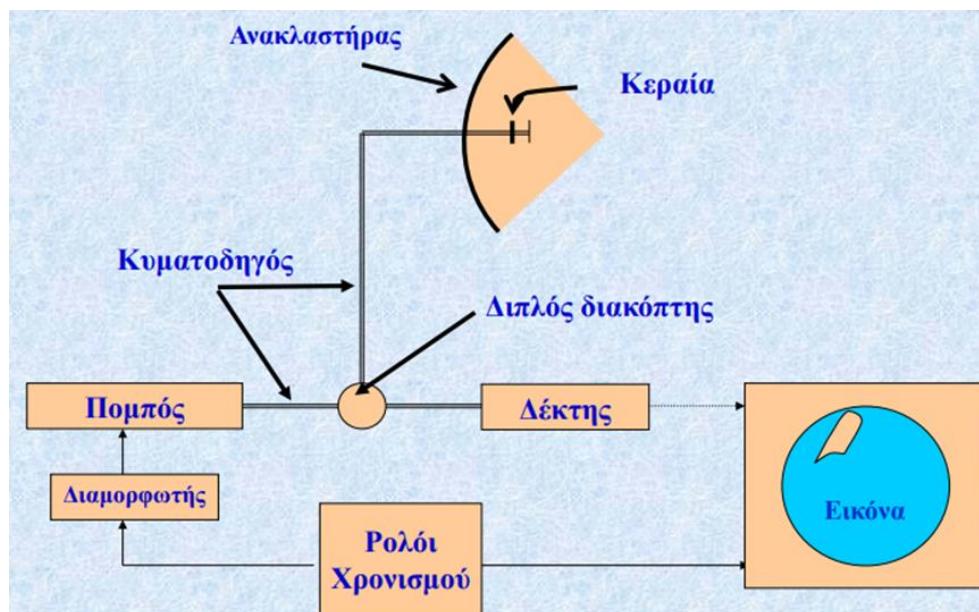
Τα πρώτα ραντάρ καιρού δημιουργήθηκαν μετά τη λήξη του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου. Σταδιακά, οι επιστήμονες άρχισαν να κατανοούν τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε και έκαναν τις απαραίτητες τροποποιήσεις για να εξασφαλίσουν καλύτερη προσαρμογή στις μετεωρολογικές απαιτήσεις (Gallicchio, 2017).

2.2 Αρχή λειτουργίας των ραντάρ

Τα μετεωρολογικά ραντάρ είναι ενεργητικά συστήματα τηλεπισκόπησης της ατμόσφαιρας και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση πυρήνων καταιγίδων, αλλά και για την μέτρηση διάφορων μετεωρολογικών παραμέτρων. Η αρχή της λειτουργίας τους βασίζεται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όταν αυτά προσπίπτουν σε έναν στόχο (Εικόνα 2.1). Τα ραντάρ εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, μέσω κεραίας, και όταν αυτά συναντήσουν το στόχο ενδιαφέροντος, ανακλώνται και επιστρέφουν πίσω στο ραντάρ ως ενισχυμένο σήμα. (Μπαλτάς, 1996)



Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας του ραντάρ. (Σιούτας, 2018)



Εικόνα 2.2: Δομή ραντάρ (Σιούτας, 2018)

- **Πομπός:** εκπομπή σήματος
- **Κεραία/πίατο:** αποστολή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- **Επεξεργαστής:** συλλογή και ανάλυση δεδομένων
- **Δέκτης:** ανίχνευση και ενίσχυση ανακλώμενου σήματος
- **Σύστημα:** εμφάνιση μετρήσεων

2.3 Είδη μετεωρολογικών ραντάρ

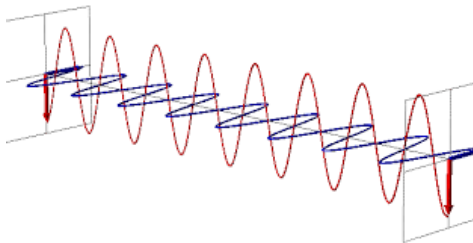
Υπάρχουν τρία είδη ραντάρ, τα **Doppler**, τα **διπλής πόλωσης** και τα **συμβατικά**.

1. DOPPLER

Η αρχή της λειτουργίας των ραντάρ τύπου Doppler βασίζεται στο φαινόμενο Doppler. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπει μια πηγή είναι διαφορετική από τη συχνότητα που λαμβάνει ένας παρατηρητής και εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητά του σε σχέση με την πηγή (Neirp, et al., 2003, O'Donnell, 2007). Έτσι και τα ραντάρ αυτά εκπέμπουν μικροκύματα τα οποία επιστρέφοντας στον ανακλαστήρα, έχουν διαφορετική συχνότητα (σαν πηγή λειτουργούν τα κύτταρα καταιγίδας στα οποία ανακλώνται τα κύματα, ενώ σαν παρατηρητής ο ανακλαστήρας). Τα ραντάρ τύπου Doppler είναι non-images ραντάρ και δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και την κίνηση του στόχου παρατήρησης (Ahrens & Henson, 2023).

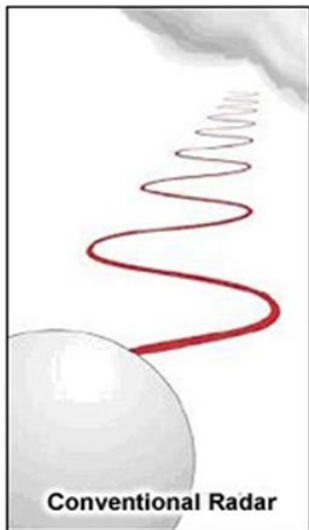
2. ΔΙΠΛΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Η πόλωση αφορά την κατεύθυνση κίνησης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (οριζόντια και κατακόρυφη). Συνεπώς τα κύματα που εκπέμπουν και λαμβάνουν αυτά τα ραντάρ κινούνται οριζόντια και κατακόρυφα (Εικόνα 2.3), δίνοντας έτσι πληροφορίες για το μέγεθος, το σχήμα και την ποικιλία των στόχων (O'Donnell, 2007).



Εικόνα 2.3: Κίνηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις δύο διαστάσεις του χώρου, οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. (ΠΕΛΛΗΣ, 2014, διαθέσιμο στο: https://physiclessons.blogspot.com/2013/11/blog-post_14.html)

3. ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ

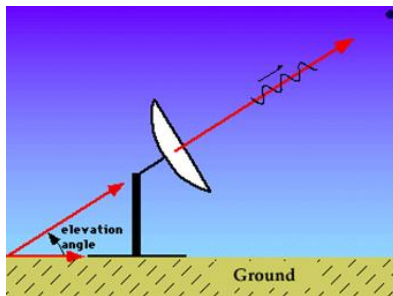


Τα συμβατικά ραντάρ εκπέμπουν κύματα μόνο στο οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 2.4) και δίνουν εικόνες στις οποίες εμφανίζονται τα φαινόμενα. Παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος, το σχήμα και την κίνηση του εκάστοτε στόχου παρατήρησης.

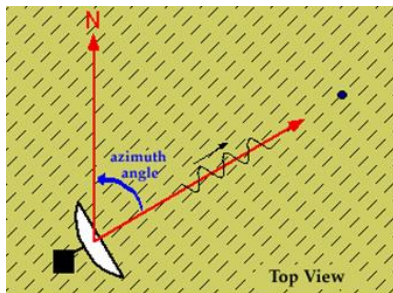
Εικόνα 2.4: Σάρωση στο οριζόντιο επίπεδο (National Oceanic and Atmospheric Administration)

2.4 Μέθοδοι σάρωσης

Στα ραντάρ χρησιμοποιούνται δύο κύριες μέθοδοι σάρωσης, η **PPI** (Plan Position Indicator) και η **RHI** (Range Height Indicator), οι οποίες βασίζονται στην αλλαγή της γωνίας ανύψωσης του ραντάρ (Εικόνα 2.5) και της γωνίας αζιμούθιου (Εικόνα 2.6) (Yao, L, & Yao, Z.,2020) (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών. Διαθέσιμο στο: <http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>).



Εικόνα 2.5: Γωνία ανύψωσης (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)



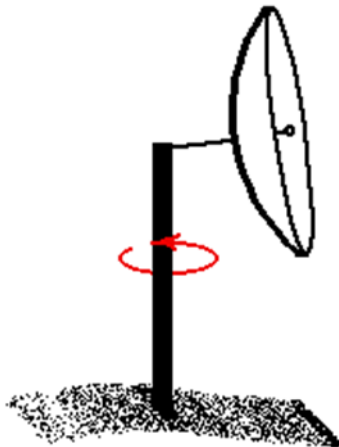
Εικόνα 2.6: Γωνία αζιμούθιου (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

- **Plan Position Indicator PPI**

Στην πρώτη μέθοδο διατηρείται σταθερή η γωνία ανύψωσης του ραντάρ, δηλαδή η γωνία της δέσμης του ραντάρ από το έδαφος, και το ραντάρ περιστρέφεται 360° (ή λιγότερο) αλλάζοντας έτσι τη γωνία αζιμούθιού του (Εικόνα 2.7). Με αυτό τον τρόπο η σάρωση γίνεται στο οριζόντιο επίπεδο.

(Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών. Διαθέσιμο στο:

<http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>).



Εικόνα 2.7: Μέθοδος σάρωσης PPI – Μεταβολή γωνίας αζιμούθιου. (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

Αντί της PPI χρησιμοποιείται και η **CAPPI** (Constant Altitude Plan Position Indicator), η οποία βασίζεται στις παρατηρήσεις από διαφορετική γωνία σάρωσης. (Yao, L, & Yao, Z., 2020).

- **Range Height Indicator RHI**

Αντίθετα στη μέθοδο **RHI**, η γωνία αζιμούθιου παραμένει σταθερή, ενώ η γωνία ανύψωσης μεταβάλλεται (Εικόνα 2.8). Η κεραία του ραντάρ κινείται καθ' ύψος, με αποτέλεσμα ο στόχος παρατήρησης να απεικονίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο.

(Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών. Διαθέσιμο στο:

<http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>).

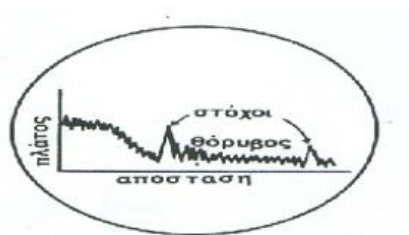


Εικόνα 2.8: Μέθοδος σάρωσης RHI – Αλλαγή γωνίας ανύψωσης (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

▪ **A-SCOPE**

Σε παλαιότερα συστήματα ραντάρ χρησιμοποιείται και ο ενδείκτης A-Scope ή A-Indicator. Το A-Scope αποτελεί την απλούστερη μορφή απεικόνισης σε ραντάρ και λειτουργεί όπως ένας παλμογράφος. Σε μια οθόνη A-Scope εμφανίζεται το πλάτος του ανακλώμενου σήματος ως προς το χρόνο που πέρασε από την αρχική εκπομπή του (Radartutorial.eu, διαθέσιμο στο: <https://www.radartutorial.eu/12.scopes/sc05.en.html>).

Διαιρώντας τον χρόνο με την ταχύτητα του φωτός ($c=3 \times 10^8$ m/s) παίρνουμε την απόσταση του στόχου από το ραντάρ, ενώ το πλάτος του παλμού μας δίνει πληροφορίες για το μέγεθος του στόχου.



Εικόνα 2.9: Δεξιά: Απεικόνιση A-Scope (Ανδρεάδης και Ζαμπίτης, 2005). Αριστερά: Οθόνη A-Scope (Διαθέσιμο στο :<https://www.radartutorial.eu/12.scopes/sc05.en.html>)

2.5 Εξίσωση του ραντάρ

Όπως προαναφέρθηκε, ένα ραντάρ εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω κεραίας και όταν αυτά προσπίπτουν σε ένα στόχο ανακλώνται. Η ανακλώμενη ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μια δέσμη και λαμβάνεται από τον ανακλαστήρα του ραντάρ. Το ποσό της λαμβανομένης ισχύς περιγράφεται από την εξής σχέση (2.5.1), η οποία καλείται εξίσωση ραντάρ. (Μπαλτάς, 1996)

$$P_A = P_E \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 R^4} \quad (2.5.1)$$

P_A : είναι η λαμβανόμενη ισχύς

P_E : είναι η εκπεμπόμενη ισχύς

G : η απολαβή της κεραίας

σ : διατομή οπισθοσκέδασης

λ : μήκος κύματος

R : απόσταση

Η εξίσωση αυτή αφορά έναν σημειακό στόχο. Όταν πρόκειται για πολλούς διάσπαρτους, όπως γίνεται σε μια καταιγίδα, χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.5.2), απ' την οποία φαίνεται πως η λαμβανομένη ισχύς είναι ανάλογη της ανακλαστικότητας Z .

$$R_A = \frac{C|K|^2 Z}{R^2} \quad (2.5.2)$$

Όπου

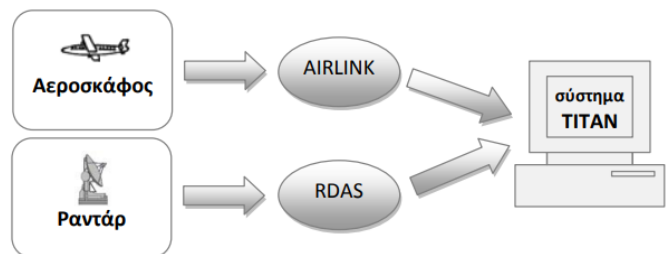
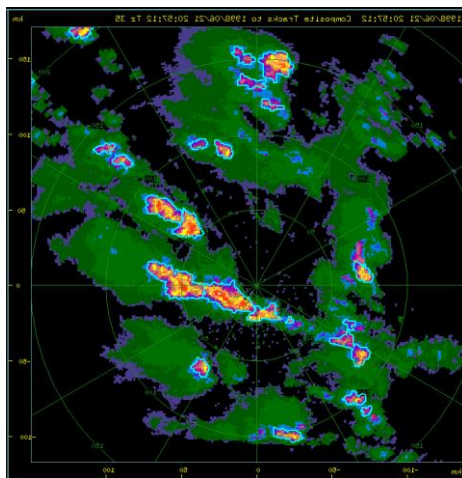
Z : Ο παράγοντας ανακλαστικότητας

C : Η σταθερά του ραντάρ

K : Παράμετρος η οποία σχετίζεται με το υλικό του στόχου, τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος. Είναι μία ένδειξη της ανακλαστικής ικανότητας του στόχου. Για συνήθεις θερμοκρασίες και για υδρομετέωρα η τιμή της παραμέτρου $|K|^2$ είναι 0,93, ενώ για παγοκρυστάλλους 0,197 αντίστοιχα (Collier, 1989).

2.6 Σύστημα TITAN

Το λαμβανόμενο σήμα από το ραντάρ εμφανίζεται σε μορφή εικόνας μετά από την απαραίτητη επεξεργασία μέσω του λογισμικού TITAN (Thunderstorm Identification Tracking, Analysis and Nowcasting). Το TITAN είναι ένα σύνολο προγραμμάτων το οποίο συλλέγει δεδομένα από τα ραντάρ και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα κύτταρα των καταιγίδων. Το σύστημα, εκτός από την ανάλυση των κυττάρων, έχει την δυνατότητα πρόγνωσης της κίνησης των καταιγίδων για την επόμενη ώρα. Το TITAN λαμβάνει δεδομένα μέσω του RDAS (Radar Data Acquisition System) και του AIRLINK. Το RDAS είναι ένα σύστημα σύνδεσης του ραντάρ το οποίο στέλνει τα δεδομένα στο TITAN για επεξεργασία, ενώ το AIRLINK, μέσω του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS), δίνει πληροφορίες σχετικά με την πτήση των αεροσκαφών. (Μπαμπζέλης, 2013)



Εικόνα 2.10: Αριστερά: απεικόνιση κυττάρων καταιγίδας μέσω του TITAN. (Διαθέσιμο στο: https://github.com/NCAR/lrose-titan/blob/master/docs/topics/storm_analysis.md)

Δεξιά: Τρόπος λήψης δεδομένων του συστήματος TITAN (Μπαμπζέλης, 2013).

2.7 Δίκτυο ραντάρ στην Ελλάδα

Το πρώτο επιχειρησιακό ραντάρ στον ελληνικό χώρο εγκαταστάθηκε στην Αθήνα το 1978 και στα επόμενα χρόνια, ραντάρ ίδιου τύπου έλαβαν και άλλες περιοχές της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, στην Λάρισα και στη Θεσσαλονίκη, από το 1980 και 1983 αντίστοιχα, λειτουργούν δυο ραντάρ τύπου WSR74 S-band του οργανισμού Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων (ΕΛΓΑ). Τα ραντάρ αυτά δεν ήταν τύπου Doppler, συνεπώς δεν διαχώριζαν έναν κινητό από έναν ακίνητο στόχο. Επιπλέον, λειτουργούσαν χειροκίνητα και αναλογικά με αποτέλεσμα να προκύπτουν προβλήματα όπως φυσική φθορά και μη σωστή λειτουργία του πομπού (Kollias, et al., 2005). Με αφορμή την διεξαγωγή των Ολυμπιακών Αγώνων, το 2004, έγιναν οι πρώτες προσπάθειες δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου και εκσυγχρονισμένου δικτύου ραντάρ στην Ελλάδα. Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), προκειμένου να παρέχει έγκυρες και άμεσες προγνώσεις κατά την διάρκεια των Ολυμπιακών, αποφάσισε να προχωρήσει σε αναβάθμιση του παλιού εξοπλισμού και αγορά νέων ραντάρ για την πλήρη κάλυψη του ελληνικού χώρου (Kollias, et al., 2005). Το νέο δίκτυο, λοιπόν, αποτελείται από τα τέσσερα αναβαθμισμένα ραντάρ (Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Αθηνά, Ανδραβίδα) και τρία νέα (Πρέβεζα, Καβάλα, Αστυπάλαια) όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.11. Στην εικόνα φαίνονται επίσης και τα ραντάρ που τοποθετήθηκαν αργότερα στην υπόλοιπη Ελλάδα. Επιπλέον, ο ΕΛΓΑ διαχειρίζεται δύο μισθωμένα ραντάρ C-band 5cm, από την εταιρία "Γενικές Αεροπορικές Εφαρμογές Α.Ε. 3Δ", τα οποία είναι τοποθετημένα στην περιοχή Φίλυρο του νομού Θεσσαλονίκης και στο Λιόπρασο Τρικάλων (ΕΛΓΑ, 2018).



Εικόνα 2.11: Δίκτυο μετεωρολογικών ραντάρ στην Ελλάδα. (Kollias, et al., 2005)

2.8 Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζιακής Προστασίας (ΕΠΧΠ)

2.8.1 Ιστορία του προγράμματος

Η ιδέα για την τροποποίηση του καιρού φαίνεται να ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του '40 (1946), όταν ο Irving Langmuir, Αμερικανός χημικός και μηχανικός, ο Bernard Vonnegut, Αμερικανός μετεωρολόγος, και ο Vincent Joseph Schaefer, Αμερικανός χημικός και μετεωρολόγος, απέδειξαν ότι ένα νέφος μπορεί να διαλυθεί αν γίνει διάχυση σε αυτό CO₂, σε θερμοκρασία μικρότερη των -40°C (ξηρού πάγου).

Αργότερα ο Vonnegut ανακάλυψε πως και ο AgI (ιωδιούχος άργυρος) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνητός πυρήνας συμπύκνωσης και να προκαλέσει παγιοποίηση σε υπερψυγμένο νερό, σε θερμοκρασία μικρότερη των -4°C. Με βάση αυτό, λοιπόν, στα τέλη της δεκαετίας του '40 οργανώθηκαν τα πρώτα προγράμματα τροποποίησης καιρού, με σκοπό την αύξηση του χιονιού μέσω σποράς των νεφών με AgI. Στις επόμενες δεκαετίες εφαρμόστηκαν προγράμματα ενίσχυσης βροχής, διάλυσης ομίχλης και καταστολής χαλαζιού σε διάφορα μέρη του κόσμου.

(Καρακώστας, 2013)

Όσον αφορά την Ελλάδα, με αφορμή κυρίως οικονομικούς λόγους και ανάγκης προστασίας των καλλιεργειών, σχεδιάστηκε το 1983 το Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζιακής Προστασίας (ΕΠΧΠ), του οποίου η εφαρμογή ξεκίνησε ένα χρόνο αργότερα (1984). Η υλοποίηση και η εφαρμογή του προγράμματος ξεκίνησε από τον τότε Οργανισμό Γεωργικών Ασφαλίσεων (ΟΓΑ) και πλέον ΕΛΓΑ, σε συνεργασία με το Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών (ΚΕΜΕ). Στόχος του προγράμματος είναι η καταστολή του χαλαζιού, μείωση μεγέθους χαλαζόκοκκων, για την προστασία των καλλιεργειών σε αγροτικές περιοχές. (Καρακώστας, 2013)

2.8.2 Περιοχές Προστασίας

Το πρόγραμμα ήταν τόσο επιχειρησιακό όσο και ερευνητικό και αρχικά εφαρμόζοταν σε περιοχές της Θεσσαλίας και της Μακεδονίας. Το ΕΠΧΠ πλέον εφαρμόζεται σε περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας, συγκεκριμένα νομός Ημαθίας, Πέλλας, Κιλκίς, Θεσσαλονίκης και Πιερίας (έκταση 2741 km²), καθώς και σε περιοχές της Θεσσαλίας και της Στερεάς Ελλάδας, νομός Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, τμήματα της περιοχής Τύρναβου και του νομού Φθιώτιδας (έκταση 2456 km²), καλύπτοντας συνολικά 5197 km² γεωργικών καλλιεργειών. (Καρακώστας, 2013)



Εικόνα 2.12 : Οι περιοχές προστασίας του προγράμματος. (ΕΛΓΑ, 2018)

2.8.3 Αρχή λειτουργίας και τομείς του προγράμματος

Η λειτουργία του προγράμματος βασίζεται σε 4 τομείς:

- Μετεωρολογικός εξοπλισμός - Πρόγνωση καιρού
- Μετεωρολογικά ραντάρ
- Μέθοδος σποράς
- Δίκτυο χαλαζόμετρων

Η πρόγνωση του καιρού γίνεται σε συνεργασία με την ΕΜΥ, μέσω i) προγνωστικών χαρτών και παρατηρήσεων επιφάνειας, όπου παρακολουθείται η μεταφορά και η κίνηση των μετώπων και των αερίων μαζών, ii) ραδιοβολίσεις, με τις οποίες μετριοούνται διάφορες ατμοσφαιρικές παράμετροι και τέλος iii) με τη χρήση των μετεωρολογικών ραντάρ, όπου ανιχνεύουν καταιγίδες και άλλα φαινόμενα.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΠΟΡΑΣ

Τα θεωρητικά μοντέλα καταστολής χαλαζιού είναι τα εξής:

- Ολικής παγιοποίησης νερού
- Αυξημένου ανταγωνισμού
- Πρόωρης βροχόπτωσης
- Χαμήλωμα της τροχιάς
- Προώθησης της διαδικασίας συνένωσης
- Τροποποίησης των δυναμικών αιτιών

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το ΕΠΧΠ είναι αυτή του “αυξημένου ανταγωνισμού”. Ο AgI δρα ως πυρήνας συμπύκνωσης για τα υδροσταγονίδια και έτσι η μεγάλη ποσότητα πυρήνων προκαλεί αυξημένο ανταγωνισμό μεταξύ των σωματιδίων για την ίδια σταθερή ποσότητα νερού. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ισοκατανομή των σωματιδίων στους πυρήνες, με αποτέλεσμα όταν αυτοί κορεστούν και προκαλέσουν χαλαζόπτωση, οι κόκκοι να είναι μικρότερου μεγέθους. (Καρακώστας, 2013)

ΤΡΟΠΟΙ ΣΠΟΡΑΣ

Αεροπλάνα κατάλληλα για πτήσεις IFR, εφοδιασμένα με φυσίγγια AgI, εκτελούν πτήσεις μέσα στα καταιγιδοφόρα νέφη και πραγματοποιούν τη σπορά. Υπάρχουν τρεις τρόποι σποράς 1)εκπεμπόμενη –ευρεία σπορά 2) σπορά σε ανοδικό ρεύμα 3) απευθείας εισαγωγή

1) Εκπεμπόμενη –ευρεία σπορά

Η εκπεμπόμενη-ευρεία σπορά γίνεται είτε από αέρος είτε από το έδαφος, μέσω της εκπομπής AgI από κάποια συνεχή πηγή (αέρος) ή σταθερή πηγή (έδαφος).

2) Σπορά σε ανοδικό ρεύμα

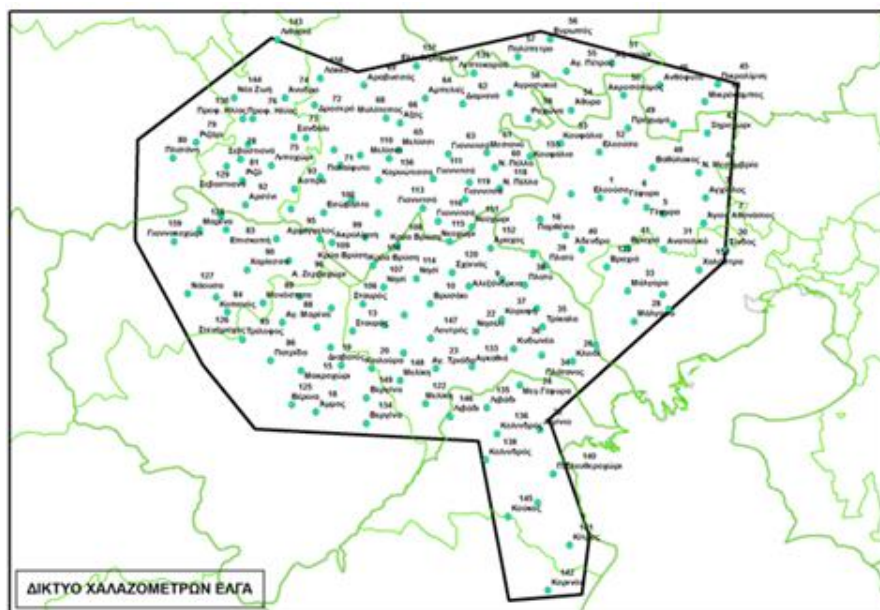
Η πτήση πραγματοποιείται κάτω από τη βάση του καταιγιδοφόρου νέφους. Οι πυρήνες AgI βρίσκονται στις πτέρυγες των αεροσκαφών και διαχέονται στο νέφος μέσω ανοδικών ρευμάτων.

3) Απευθείας εισαγωγή

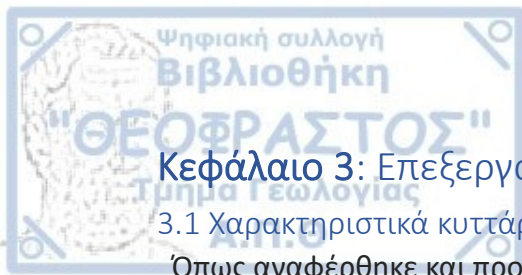
Για τη μέθοδο της απευθείας εισαγωγής χρησιμοποιούνται πυροτεχνικά φυσίγγια AgI ή ξηρός πάγος και η σπορά εκτελείται από την κορυφή του νέφους. Τα φυσίγγια με την πτώση δημιουργούν ένα κάθετο κυλινδρικό "σωλήνα" μέσα στο νέφος κατακόρυφης ανάπτυξης και το κάθε ένα δρα ως μια συνεχής πηγή εκπομπής τεχνητών πυρήνων συμπύκνωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη κάλυψη της περιοχής του ενδιαφέροντος μέσα στο νέφος και τη δημιουργία επαρκών πυρήνων. (Καρακώστας, 2013)

ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΛΑΖΟΜΕΤΡΩΝ

Ένα χαλαζόμετρο αποτελείται από ένα κομμάτι πολυστερίνης, πάχους 3cm και επιφάνειας 730cm². Χρησιμοποιείται για την καταγραφή των αποτυπωμάτων των κόκκων του χαλαζιού, τα οποία ψηφιοποιούνται με το κατάλληλο λογισμικό και δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την χαλαζόπτωση. Το δίκτυο χαλαζόμετρων του ΕΠΧΠ εφαρμόζεται στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. (ΕΛΓΑ, 2018)



Εικόνα 2.13: Το δίκτυο χαλαζόμετρων στην Ελλάδα. (ΕΛΓΑ, 2018)



Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία δεδομένων και μεθοδολογία

3.1 Χαρακτηριστικά κυττάρων καταιγίδων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα μετεωρολογικά ραντάρ έχουν την δυνατότητα να παρέχουν δεδομένα που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των κυττάρων καταιγίδας. Τα χαρακτηριστικά αυτά χωρίζονται σε 4 κατηγορίες και περιλαμβάνουν τις εξής παραμέτρους:

1. Χρονικά

Χρόνος πρώτης ανίχνευσης - Start
Χρόνος διάρκειας - Duration

2. Κινηματικά

Ταχύτητα κίνησης - Speed
Διεύθυνση κίνησης - Direction

3. Χωρικά

Όγκος - Volume
Μάζα - Mass
Επιφάνεια - Envelope area
Επιφάνεια υετού - Precipitation area
Ύψος κορυφής - Top
Διανυόμενη έκταση

4. Δυναμικά

Ανακλαστικότητα – Reflectivity dBz
Ρυθμός υετού - Prate
Ροή υετού - Pflux

Αναλυτικότερα,

Χρόνος πρώτης ανίχνευσης - Start T

Ορίζεται ως η χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το κύτταρο καταιγίδας από το ραντάρ και καταγράφεται από το σύστημα TITAN.

Χρόνος διάρκειας κυττάρου - Duration

Η διάρκεια ζωής του κυττάρου, από την στιγμή της ανίχνευσης και καταγραφής του έως και την διάλυσή του.

Ταχύτητα κίνησης – Speed (km/hr)

Η απόσταση που έχει διανύσει ο στόχος προς το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών παρατηρήσεων.

Διεύθυνση κίνησης - Direction (°)

Αφορά την πορεία του στόχου και συγκεκριμένα την διεύθυνση πάνω στην οποία κινείται.

Όγκος - Volume (km³)

Περιγράφει το χώρο που καταλαμβάνει το κύτταρο. Για να θεωρηθεί ένα κύτταρο έγκυρο πρέπει ο όγκος του να ξεπερνά τα 15km³

Μάζα - Mass (ktons)

Σχετίζεται με την ποσότητα νερού που υπάρχει μέσα σε ένα κύτταρο, τόσο σε υγρή όσο και σε στερεή φάση. Η μάζα συνδέεται με τον όγκο μέσω της σχέσης:

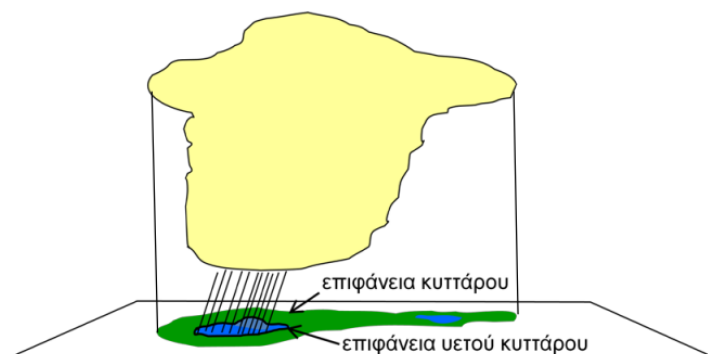
$$Mass = \int Md(volume) \quad (3.1.1)$$

Επιφάνεια - Envelope area (km²)

Η επιφάνεια ενός στόχου περιγράφει την έκταση που καλύπτει στον δισδιάστατο χώρο.

Επιφάνεια υετού – Precipitation area (km²)

Η επιφάνεια υετού προσδιορίζει την έκταση που εμφανίζεται υετός.



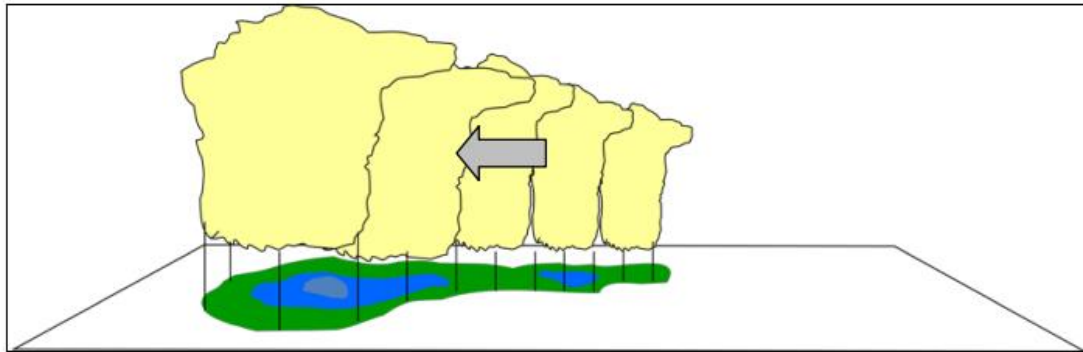
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της επιφάνεια υετού ενός κυττάρου. (Μπαμπζέλης, 2013)

Ύψος κορυφής - Top (km)

Το ύψος (mean ή max top) της κορυφής μια καταιγίδας αντιστοιχεί στο ύψος που ανέρχεται το εκάστοτε καταιγιδοφόρο νέφος μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διανυόμενη έκταση (km²)

Η έκταση που διανύει το κύτταρο από την στιγμή της ανίχνευσής του έως και τη στιγμή της διάλυσής του.

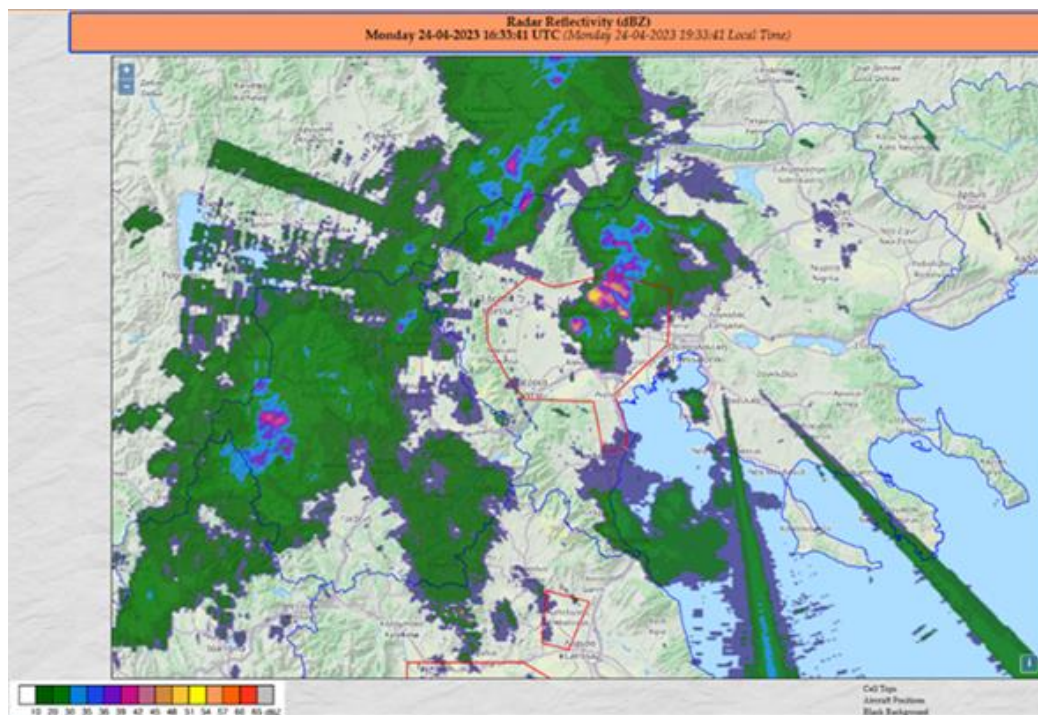


Εικόνα 3.2: Η διανυόμενη έκταση ενός κυττάρου. (Μπαμπζέλης, 2013)

Ανακλαστικότητα dBz – Radar

Ο παράγοντας ανακλαστικότητας είναι μια παράμετρος που καταγράφεται από τα ραντάρ και δίνει πληροφορίες σχετικά με τα φαινόμενα και τον τύπο των φαινομένων. Μετριέται $Z=10^{-1} \text{ mm}^6\text{m}^3$ για ασθενή βροχή, $Z=10^7 \text{ mm}^6\text{m}^3$ για έντονη χαλαζόπτωση και προκύπτει από τον εξής τύπο:

$$Z(\text{dBZ}) = 10\log_{10} \left[C \frac{R^2}{|K|^2} P_{\Lambda} \right] \quad (3.1.2)$$



Εικόνα 3.3: Από συμβατικό ραντάρ, εμφανίζεται περιοχή της Β. Ελλάδας και καταγράφεται ο παράγοντας της ανακλαστικότητας dBZ. (ΕΛΓΑ, 2023)

Ρυθμός υετού – Prate (mm/hr)

Ο παράγοντας της ανακλαστικότητας συνδέεται με το ρυθμό βροχόπτωσης μέσω της σχέσης $Z = aR^b$ (3.1.3). Οι παράμετροι a και b συμπληρώνονται εμπειρικά και εξαρτώνται από τους διαφορετικούς τύπους κατακρήμνισης και τις συνθήκες (Jones, 1956). Έχουν προταθεί πολλές σχέσεις Z-R οι οποίες εξυπηρετούν συγκεκριμένα μετεωρολογικά φαινόμενα, μια από αυτές είναι η εκθετική σχέση Z-R Marshall-Palmer. Η σχέση αυτή λοιπόν περιγράφεται από την εξίσωση $Z = 200R^{1.6}$ (3.1.4) και χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την ανακλαστικότητα των νεφών σε ρυθμό βροχόπτωσης (Battan, 1973, 1976).

Ροή υετού – Pflux (m^3/s)

Η ροή υετού εξαρτάται από τον ρυθμό υετού R και μια περιοχή $A(km^2)$ η οποία καλείται περιοχή υετού του κυττάρου (Εικόνα 15). Η ροή υετού ενός κυττάρου προκύπτει από τον τύπο:

$$Pflux = \int R d(A) \quad (3.1.5)$$



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση της ροής υετού.
(Μπαμπζέλης, 2013)

ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

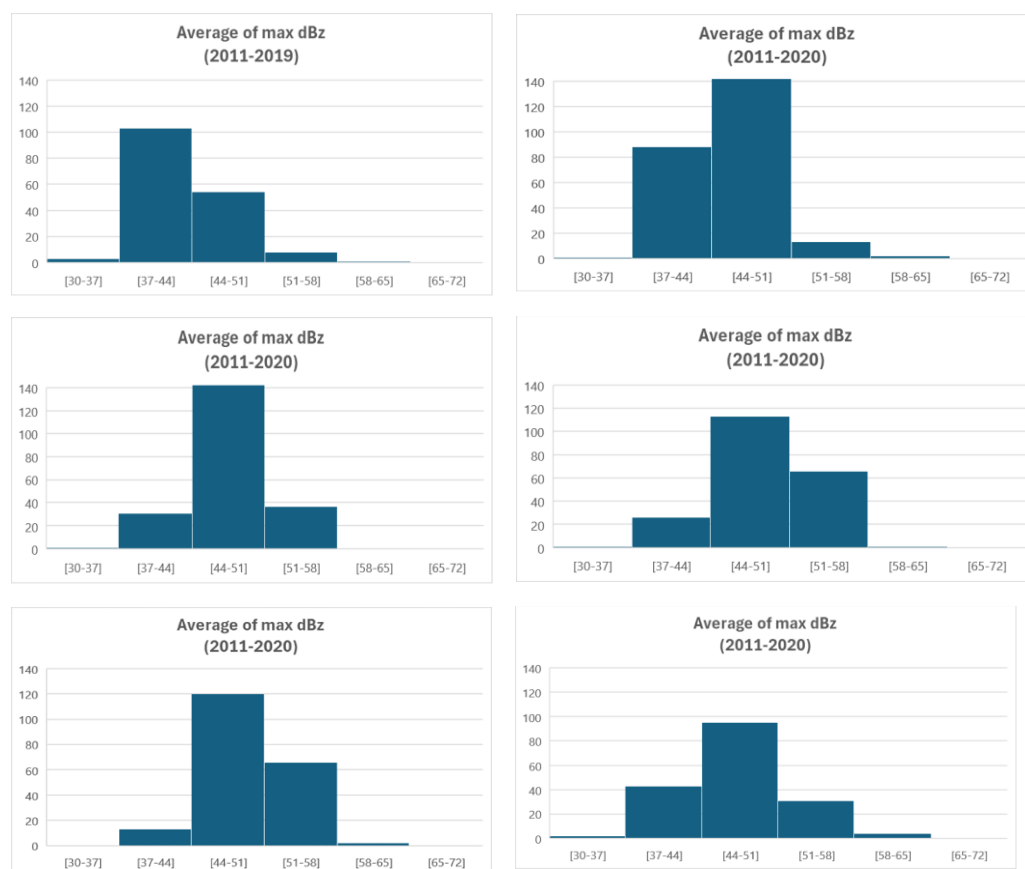
Για να θεωρηθεί ένα κύτταρο έγκυρο θα πρέπει:

- Η ανακλαστικότητα να ξεπερνάει τα 35dBz
- Να έχει χρόνο διάρκειας τουλάχιστον 15 λεπτά
- Η κορυφή του να ξεπερνάει τα 3.5km
- Να έχει συνολικό όγκο τουλάχιστον $15km^3$ (Μπαμπζέλης, 2013)

3.2 Επεξεργασία των δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει η στατιστική ανάλυση δεδομένων καταιγίδων από την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας για την περίοδο 2011-2020. Πρόκειται για δεδομένα ραντάρ, τα οποία παρέχονται από το ΚΕΜΕ (μονάδα του ΕΛΓΑ), που εδρεύει στο Αεροδρόμιο «ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ» της Θεσσαλονίκης. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του excel και οι δείκτες/παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν είναι η **ταχύτητα** (Average of mean speed), ο **όγκος** των κυττάρων καταιγίδας (Average of mean volume), η **μάζα** (Average of mean mass), η **επιφάνεια** (Average of mean envelope area), η **κορυφή** (Average of max/mean top) και τέλος η **ανακλαστικότητα** (Average of max/mean dBz).

Τα δεδομένα περιλαμβάνουν περίοδο 6 μηνών (Απρίλιος, Μάιος, Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος, Σεπτέμβριος) για τη χρονοσειρά 2011-2020 (για τον Απρίλιο 2011-2019). Τα δεδομένα έχουν προσαρμοστεί έτσι ώστε να μην υπάρχουν κενά στις καταγραφές και οι ημερομηνίες να συμπίπτουν με τις αντίστοιχες ημερομηνίες ραδιοβολίσεων για την ίδια περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των τιμών για κάθε παράμετρο, έχουν προκύψει κατάλληλες κλάσεις έτσι ώστε να δημιουργηθούν διαγράμματα και πίνακες συχνοτήτων για κάθε παράμετρο και για κάθε μηνά ξεχωριστά (σχήμα 3.1). Επιπλέον, έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα διασποράς για κάθε κλάση που παρουσιάζει την μέγιστη συχνότητα για όλα τα έτη.



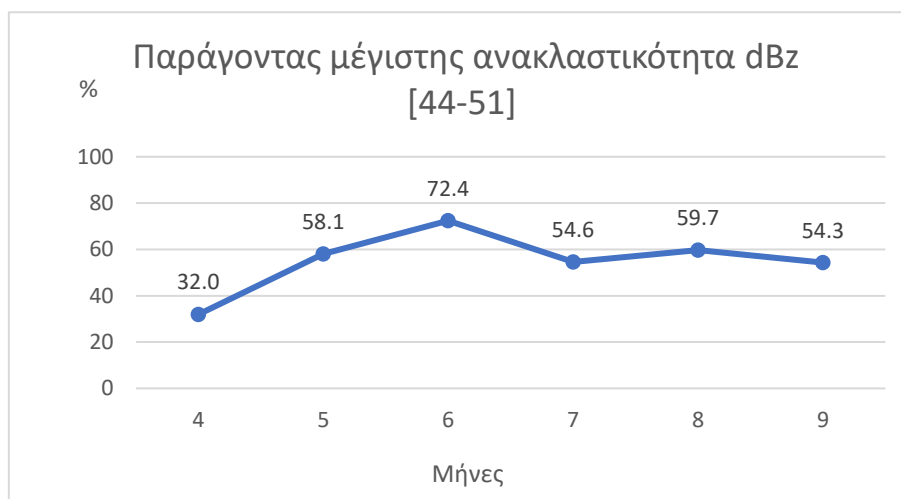
Σχήμα 3.1: Διαγράμματα συχνοτήτων της μέγιστης ανακλαστικότητας για όλους μήνες.

Στο παραπάνω σχήμα (3.1) παρουσιάζεται δείγμα της επεξεργασίας των δεδομένων. Εμφανίζονται τα διαγράμματα συχνοτήτων για μια από τις παραμέτρους που θα αναλυθούν, την μέγιστη ανακλαστικότητα (Average of max dBz). Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχουν έξι διαγράμματα, ένα για κάθε μήνα καταγραφής, Απρίλιος έως Σεπτέμβριος, από τα αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα. Στον άξονα Χ βρίσκονται οι κλάσεις, δηλαδή 6 ομάδες τιμών για την μέγιστη ανακλαστικότητα dBz, ενώ ο άξονας Υ αντιπροσωπεύει το σύνολο των καταγραφών. Για παράδειγμα, στο πρώτο διάγραμμα αριστερά το μέγιστο βρίσκεται στην κλάση [37-44], δηλαδή περίπου 100 καταγραφές παρουσίασαν μέγιστη ανακλαστικότητα από 37 dBz έως 44 dBz.

Παρακάτω εμφανίζεται ο αντίστοιχος πίνακας συχνοτήτων για την μέγιστη ανακλαστικότητα (πίνακας 3.1), καθώς και το διάγραμμα διασποράς που προκύπτει για την κλάση που παρουσιάζει το μέγιστο ποσοστό συνολικά (σχήμα 3.2).

Πίνακας 3.1: Πίνακας συχνοτήτων για την μέγιστη ανακλαστικότητα (max dBz). Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

Months	[30-37]	[37-44]	[44-51]	[51-58]	[58-65]	[65-72]
4	1.8	60.9	32.0	4.7	0.6	0.0
5	0.4	35.5	58.1	5.2	0.8	0.0
6	0.4	12.4	72.4	14.8	0.0	0.0
7	0.5	12.6	54.6	31.9	0.5	0.0
8	0.0	6.5	59.7	32.8	1.0	0.0
9	1.1	24.6	54.3	17.7	2.3	0.0



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα διασποράς για την κλάση που εμφανίζει το μεγαλύτερο

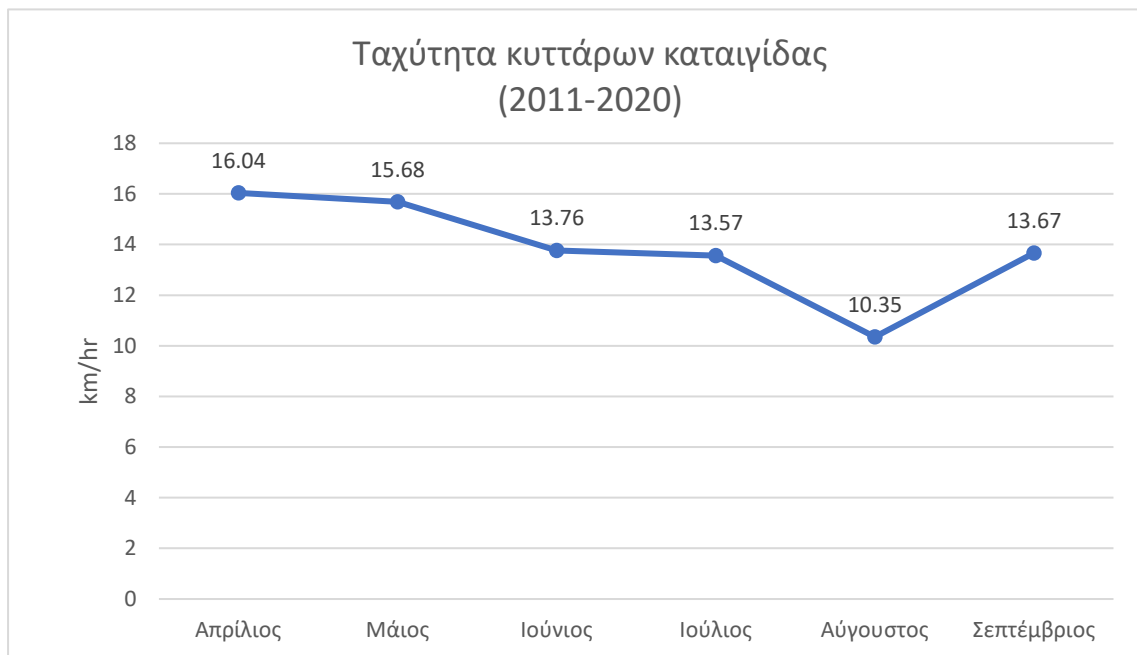
Όπως συμπεραίνεται από τον πίνακα 3.1, η κλάση στην οποία εμπίπτουν οι περισσότερες καταγραφές είναι αυτή με εύρος τιμών από 44 έως 51. Ενώ στο σχήμα 3.2 παρατηρείται ότι το μέγιστο εμφανίζεται τον 6^ο μήνα (Ιούνιο) με 72,4% των καταγραφών να ανήκουν σε αυτό το εύρος τιμών.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση χαρακτηριστικών κυττάρων καταιγίδας

4.1 Κινηματικά

Ταχύτητα Κίνησης – Speed (km/hr)

Ο μέσος όρος της τιμής της ταχύτητας των κυττάρων για όλη τη χρονοσειρά είναι 13.85km/hr. Στο σχήμα 4.1 εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της ταχύτητας για όλα τα χρόνια (2011-2020). Παρατηρείται μια αρνητική τάση μέχρι τον Αύγουστο, ενώ μετά οι τιμές αυξάνουν μέχρι τον Σεπτέμβριο. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται τον Απρίλιο με 16.04 km/hr, ενώ η ελάχιστη τον Αύγουστο με 10.35km/hr. Γενικότερα, φαίνεται οι ταχύτητες να ελαχιστοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό συμβαίνει διότι την εαρινή και την χειμερινή περίοδο η διέλευση συστημάτων είναι συχνότερη, σε αντίθεση με την θερμή περίοδο που μεσολαβεί.

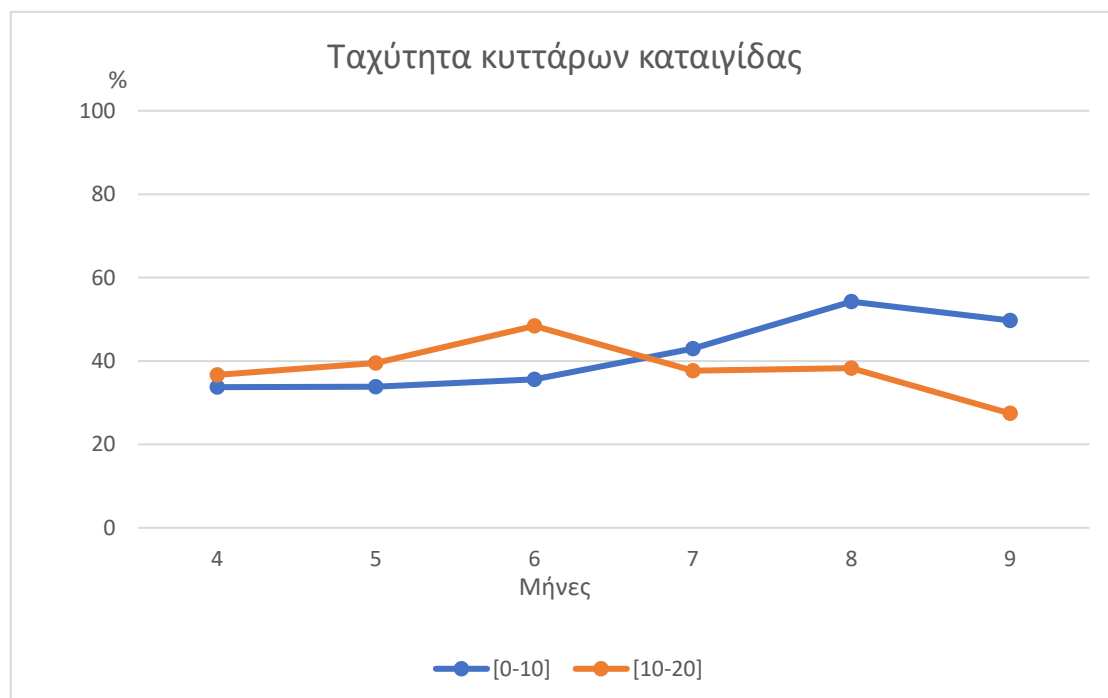


Σχήμα 4.1: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της ταχύτητας

Πίνακας 4.1: Πίνακας συχνοτήτων για την μέση ταχύτητα. Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

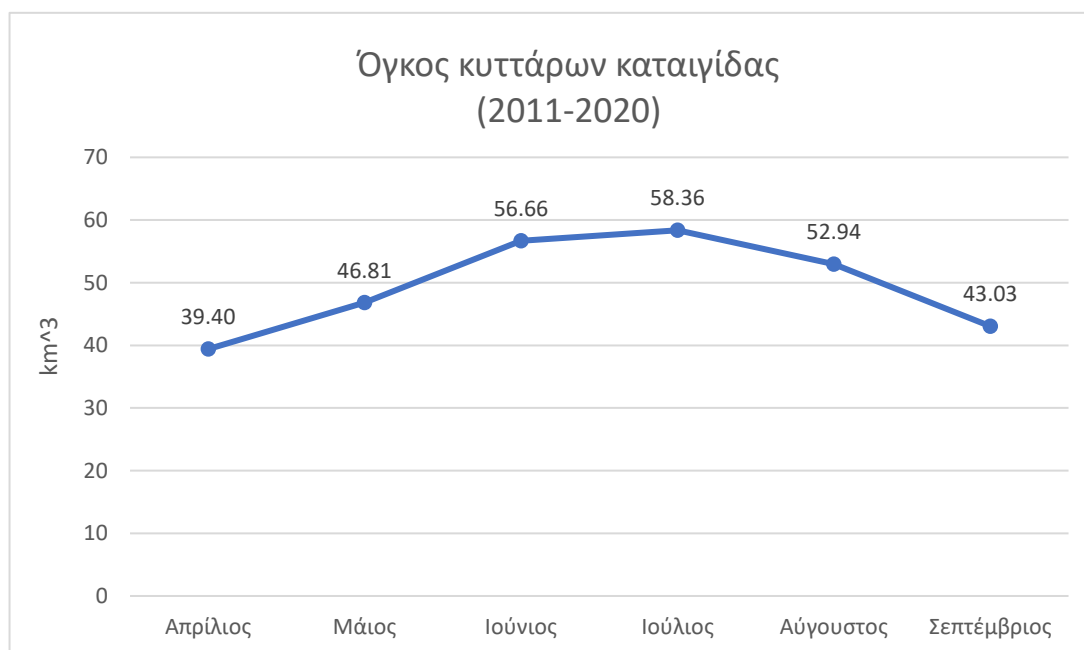
Months	[0-10]	[10-20]	[20-30]	[30-40]	[40-50]	[50-60]
4	33.7	36.7	14.8	11.8	3.0	0.0
5	33.9	39.5	17.7	5.2	2.4	1.2
6	35.6	48.4	12.4	3.2	0.0	0.4
7	43.0	37.7	14.0	2.9	1.4	1.0
8	54.2	38.3	6.0	1.5	0.0	0.0
9	49.7	27.4	14.3	4.6	3.4	0.6

Από τον παραπάνω πίνακα συχνοτήτων (πίνακας 4.1) προκύπτει ότι οι κλάσεις με τα μεγαλύτερα ποσοστά είναι οι δύο πρώτες, [0-10] και [10-20]. Με βάση τον πίνακα 4.1 δημιουργήθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα των κλάσεων, [0-10] [10-20], όπου εμφανίζεται η μηνιαία κατανομή των ποσοστών (Σχήμα 4.2). Φαίνεται λοιπόν ότι οι ταχύτητες που κυριαρχούν την εαρινή περίοδο (μέχρι και το 6ο μήνα, Ιούνιο) έχουν τιμές από 10 έως 20 km/hr, ενώ στην συνέχεια, όπως προαναφέραμε οι ταχύτητες μειώνονται τους καλοκαιρινούς μήνες και κυμαίνονται από 0 έως 10km/hr.

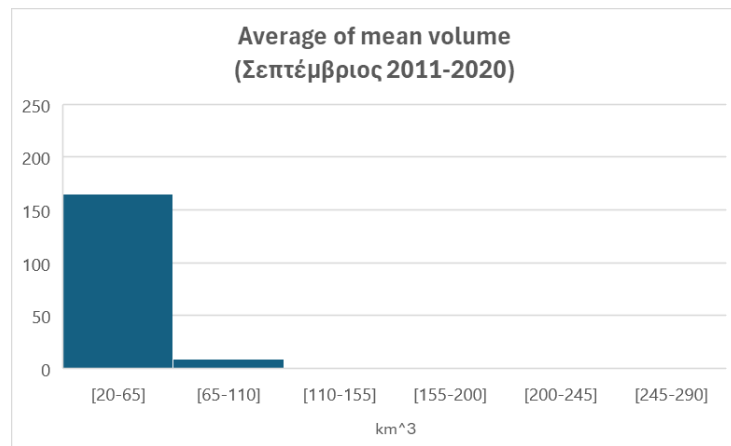
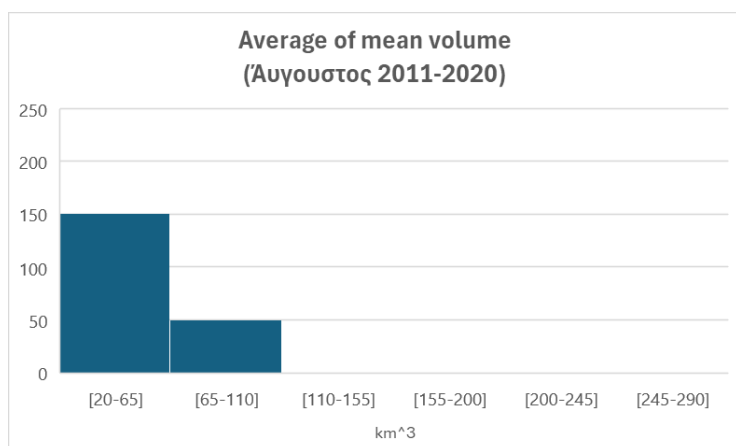
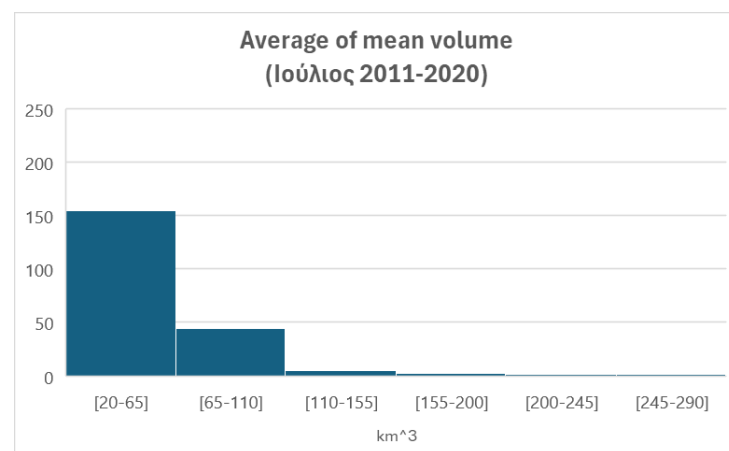
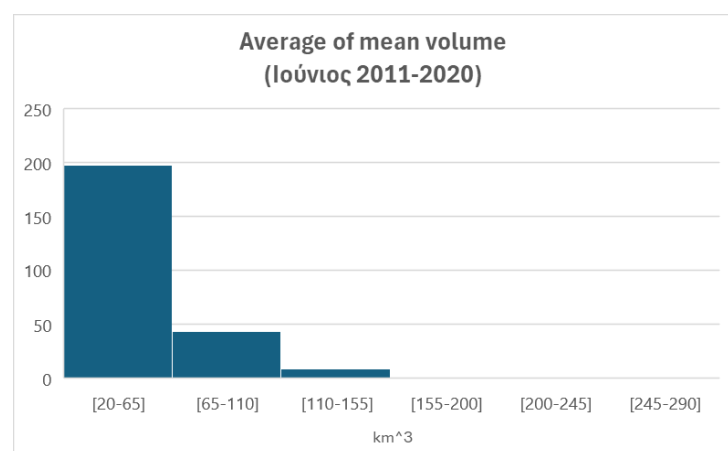
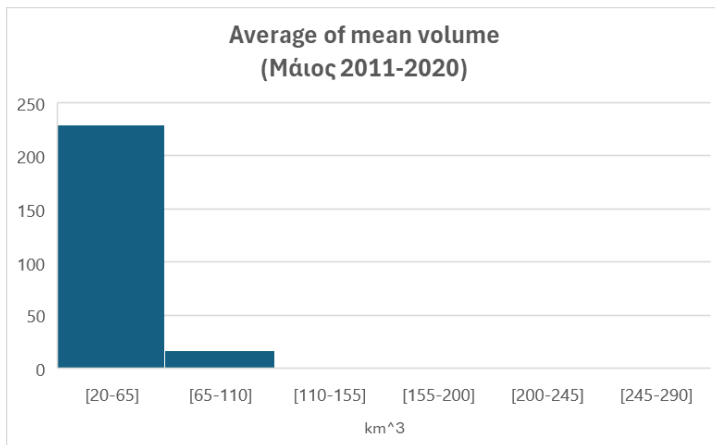
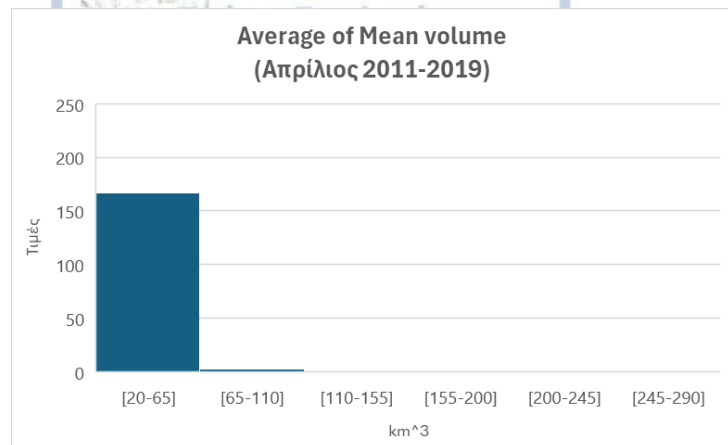


Σχήμα 4.2: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών, της μέσης ταχύτητας, για τις κλάσεις με τα μεγαλύτερα ποσοστά.

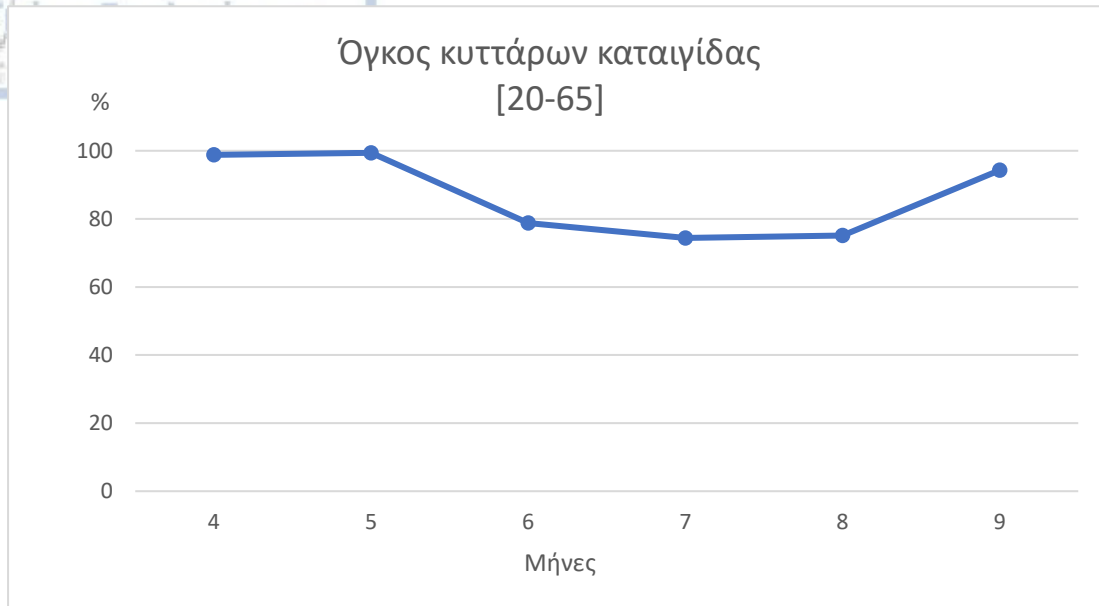
Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί εμφανίζονται η μηνιαία κατανομή του όγκου για όλη την περίοδο μελέτης. Παρατηρείται μεγιστοποίηση του όγκου τους καλοκαιρινούς μήνες με τις τιμές να ξεπερνάνε τα 50km³. Αυτό επαληθεύεται και από το σχήμα 4.4, όπου φαίνονται τα διαγράμματα συχνοτήτων για κάθε μήνα ξεχωριστά. Ενώ η κλάση με την μεγαλύτερη συχνότητα φαίνεται να είναι αυτή με εύρος 20-65km³ (Σχήμα 4.4), τους μήνες του καλοκαιριού παρατηρείται αύξηση στη συχνότητα της κλάσης με εύρος τιμών 65-110km³. Αυτό φαίνεται και από τα σχήματα 4.5 και 4.6, παρατηρείται μείωση των ποσοστών τη θερινή περίοδο (Σχήμα 4.5), διότι οι καταγραφές αρχίζουν να ξεπερνούν τα 65km³ και συμπεριλαμβάνονται στην αμέσως επόμενη κλάση (Σχήμα 4.6). Τη θερινή περίοδο, όπου παρατηρούνται οι μέγιστες θερμοκρασίες, μεγιστοποιείται και η εξάτμιση συνεπώς, περισσότεροι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται αύξηση του όγκου των κυττάρων καταιγίδας.



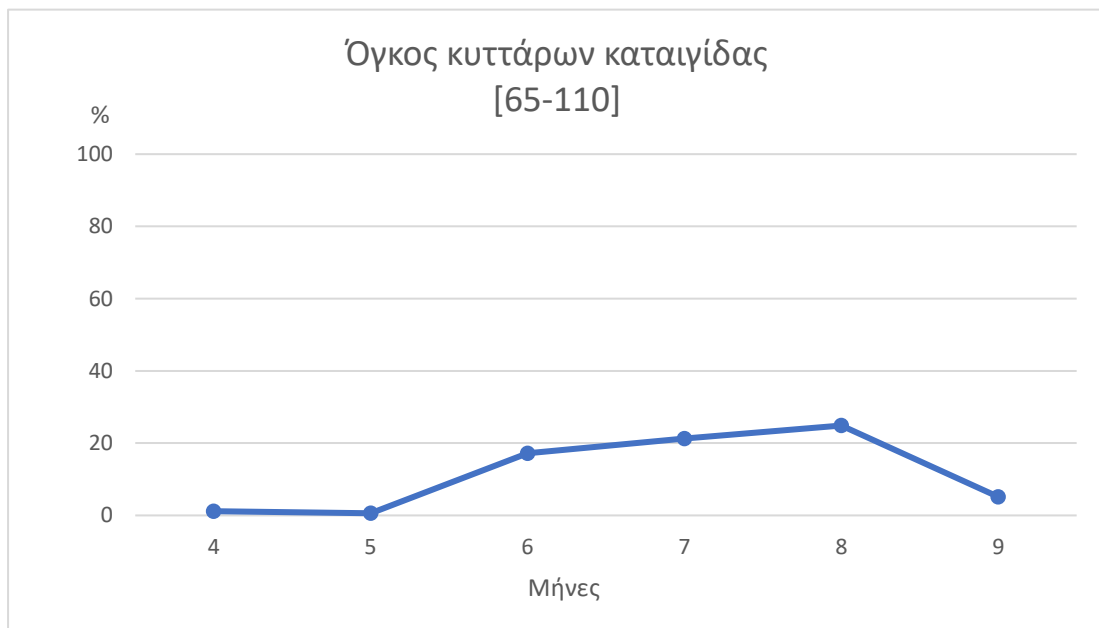
Σχήμα 4.3: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων του όγκου.



Σχήμα 4.4: Διαγράμματα κλάσεων του όγκου για κάθε μήνα ξεχωριστά.



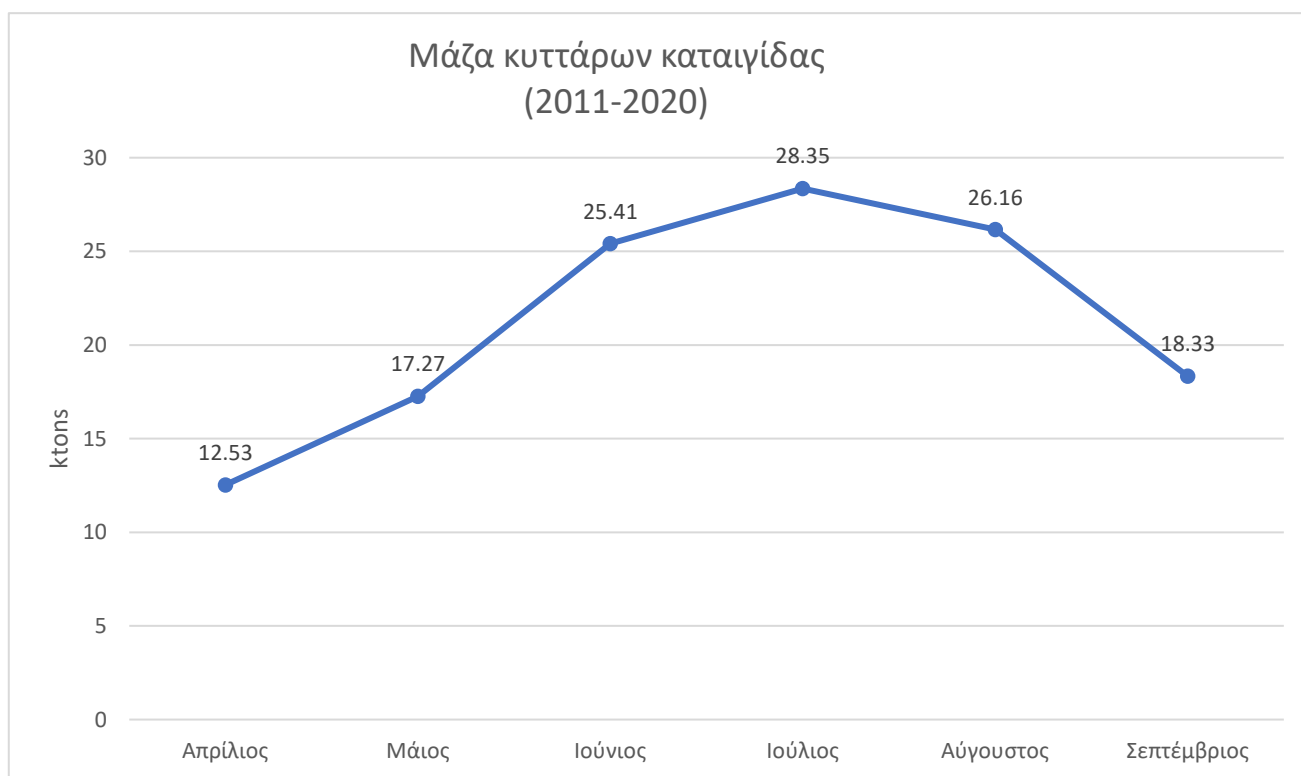
Σχήμα 4.5: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών, του όγκου, για την κλάση με εύρος τιμών από 20 έως 65km³.



Σχήμα 4.6: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών, του όγκου, για την κλάση με εύρος τιμών από 65 έως 110km³.

Μάζα – Mass (ktons)

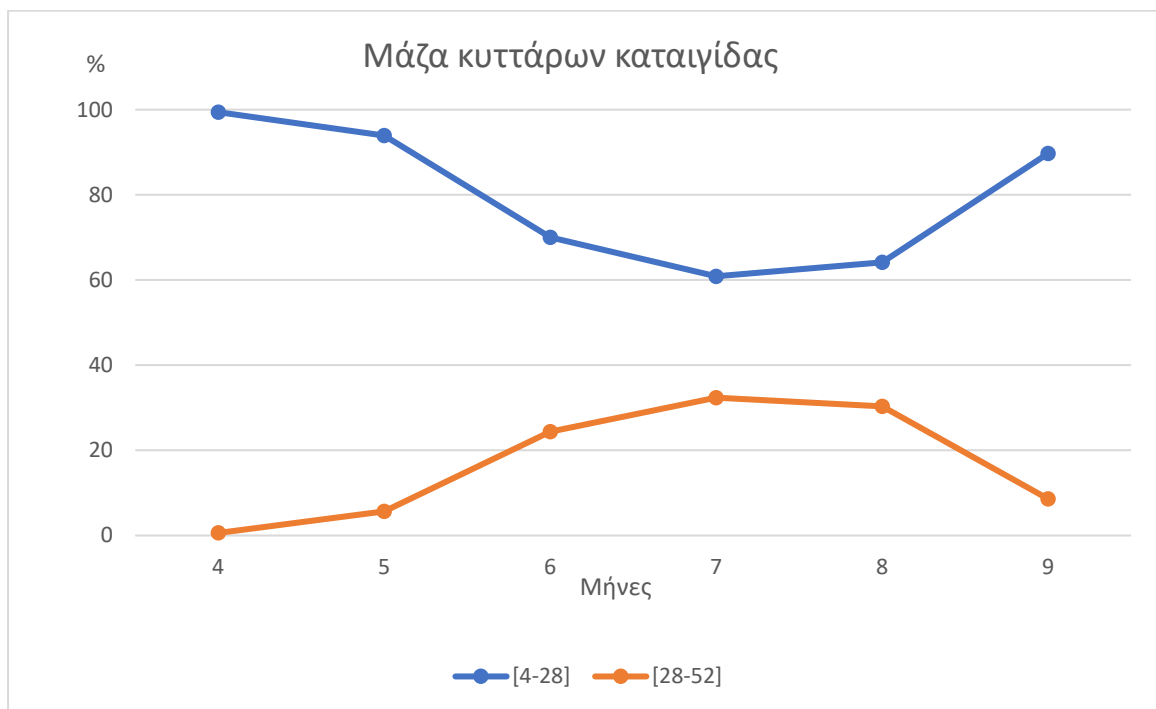
Το ίδιο μοτίβο ακολουθεί και η μάζα των κυττάρων, αφού φαίνεται στην μηνιαία κατανομή (σχήμα 4.7) μια έντονη θετική τάση μέχρι τον Ιούλιο και ακολουθεί μια αρνητική μέχρι τον Σεπτέμβριο. Από τον πίνακα συχνотήτων (πίνακας 4.2) φαίνεται πως το εύρος, της πλειοψηφίας, των τιμών κυμαίνεται από 4 έως 52 ktons (οι ακραίες τιμές δεν λαμβάνονται υπόψη). Συγκεκριμένα οι περισσότερες τιμές βρίσκονται στην κλάση 4-28 ktons, εκτός από τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου οι τιμές της μάζας μεγιστοποιούνται και εμφανίζονται τιμές στην κλάση 28-52 ktons. Η αύξηση της μάζας το καλοκαίρι οφείλεται, για ακόμη μια φορά, στην αστάθεια και μεταφορά ενέργειας που επικρατεί αυτή την εποχή. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι θερμές αέριες μάζες έχουν τη δυνατότητα να συγκρατήσουν περισσότερους υδρατμούς (υγρασία). Αφού η μάζα εκφράζει την ποσότητα νερού που υπάρχει μέσα σε ένα κύτταρο (υγρασία), τότε είναι ανάλογη της ποσότητας της υγρασίας.



Σχήμα 4.7: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της μάζας.

Πίνακας 4.2: Πίνακας συχνοτήτων για την μάζα. Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

Months	[4-28]	[28-52]	[52-76]	[76-100]	[100-124]	[124-148]
4	99.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
5	94.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.4
6	70.0	24.4	3.6	1.2	0.4	0.4
7	60.9	32.4	3.4	1.4	1.4	0.5
8	64.2	30.3	5.5	0.0	0.0	0.0
9	89.7	8.6	1.1	0.6	0.0	0.0



Σχήμα 4.8: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών, της μάζας, για την κλάση με εύρος τιμών από 4 έως 28 ktons και 28 έως 52 ktons.

Στο παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 4.8) φαίνεται η διακύμανση των τιμών σε κάθε κλάση ([4-28] και [28-52]). Η συμμετρία των δύο καμπύλων επαληθεύει την απότομη μετακίνηση των τιμών, τη θερινή περίοδο, από την μια κλάση στην άλλη και άρα την αύξηση της μάζας.

Επιφάνεια - Envelope area (km²)

Η επιφάνεια των καταιγίδων παρουσιάζει μια όχι και τόσο ομαλή κατανομή σε σχέση με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά (σχήμα 4.9). Το μέγιστο εμφανίζεται τον Απρίλιο, με 24.98km², ενώ το ελάχιστο τον Αύγουστο, με 21.40km². Γενικά παρατηρείται ομαλή μείωση της επιφάνειας μέχρι και την αρχή του καλοκαιριού (Ιούνιο), ενώ ακολουθεί απότομη αύξηση μέχρι τον Ιούλιο και ακριβώς μετά, απότομη μείωση το Σεπτέμβριο (ελάχιστο).

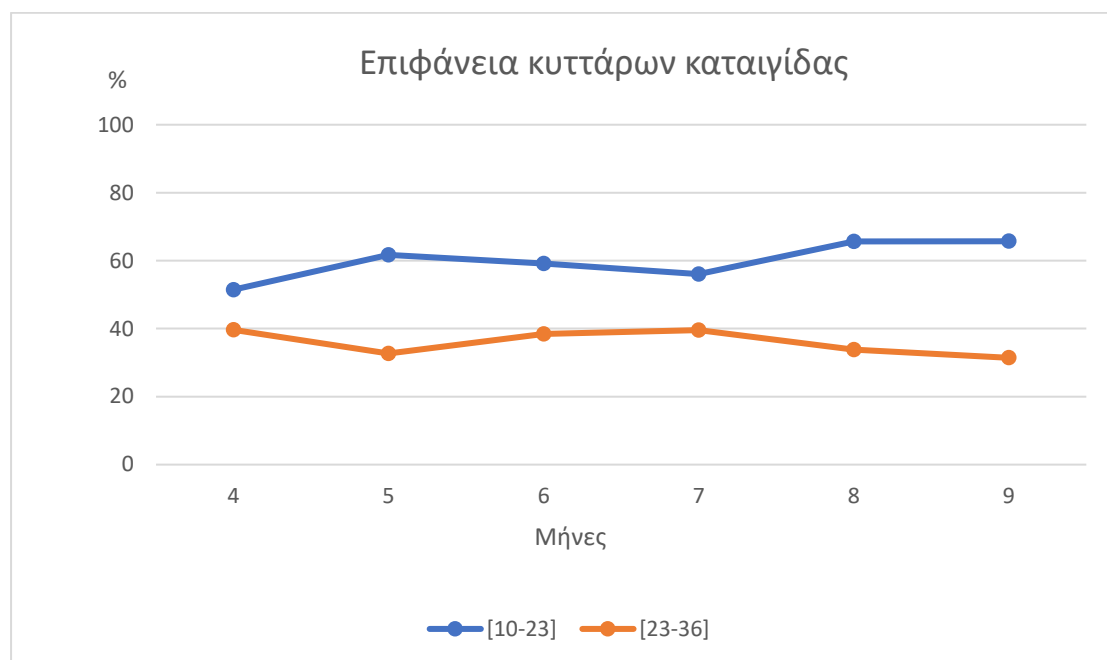


Σχήμα 4.9: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της επιφάνειας των καταιγίδων.

Πίνακας 4.3: Πίνακας συχνοτήτων για την επιφάνεια. Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

Months	[10-23]	[23-36]	[36-49]	[49-62]	[62-75]	[75-88]
4	51.5	39.6	8.9	0.0	0.0	0.0
5	61.7	32.7	4.8	0.4	0.4	0.0
6	59.2	38.4	1.2	0.8	0.0	0.4
7	56.0	39.6	2.4	1.0	1.0	0.0
8	65.7	33.8	0.5	0.0	0.0	0.0
9	65.7	31.4	2.9	0.0	0.0	0.0

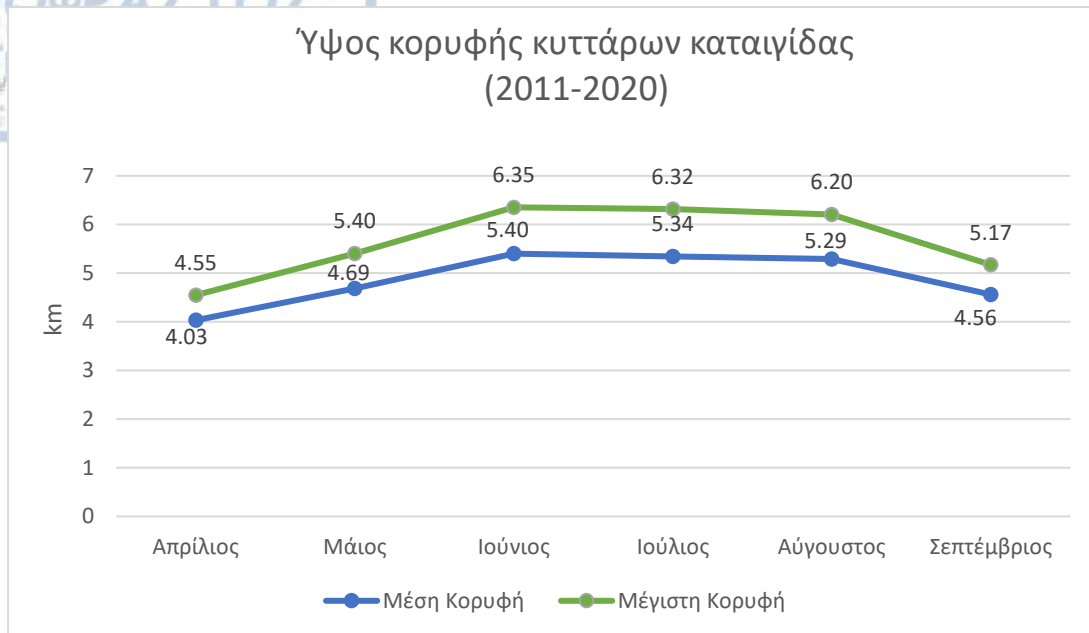
Στον πίνακα συχνοτήτων της επιφάνειας των καταιγίδων (πίνακας 4.3), φαίνεται πως τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζονται στις δυο πρώτες κλάσεις, με εύρος τιμών 10 με 23km² και 23 με 36km². Το διάγραμμα των κλάσεων που προκύπτει εμφανίζεται παρακάτω στο σχήμα 4.10. Οι καμπύλες έχουν συμμετρική μορφή, όπως και στο διάγραμμα της μάζας προηγουμένως (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.10: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών της επιφάνειας, για την κλάση με εύρος τιμών από 10 έως 23km² και 23 έως 36km².

Ύψος Κορυφής – Top (km)

Παρόμοια κατανομή με τον όγκο έχει και η κορυφή των καταιγίδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11. Όπως πολλάκις αναφέρθηκε, τους μήνες του καλοκαιριού υπάρχει αύξηση της αστάθειας, η οποία ευνοεί την κατακόρυφη ανάπτυξη των καταιγίδων, άρα και την αύξηση του ύψους της κορυφής των νεφών. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της μέγιστης κορυφής (max top) είναι 6.35km (Ιούνιο) και 4.55km (Απρίλιο), αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της μέσης κορυφής (mean top) είναι 5.40km (Ιούνιο) και 4.03km (Απρίλιο), αντίστοιχα.

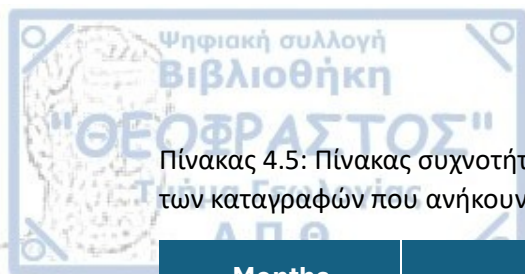


Σχήμα 4.11: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της μέγιστης και της μέσης κορυφής των νεφών, των καταιγίδων.

Γενικά, το μεγαλύτερο ποσοστό των καταγραφών εμπίπτει στο εύρος 4 έως 7km (πίνακας 4.4 και 4.5) και για την μέση και για την μέγιστη κορυφή. Παρ' όλα αυτά, στο σχήμα 4.12 φαίνεται η συχνότητα της μέγιστη κορυφής για την κλάση [7-10] και παρατηρείται ότι σχεδόν το 30% των τιμών ξεπερνάει τα 7km τους καλοκαιρινούς μήνες.

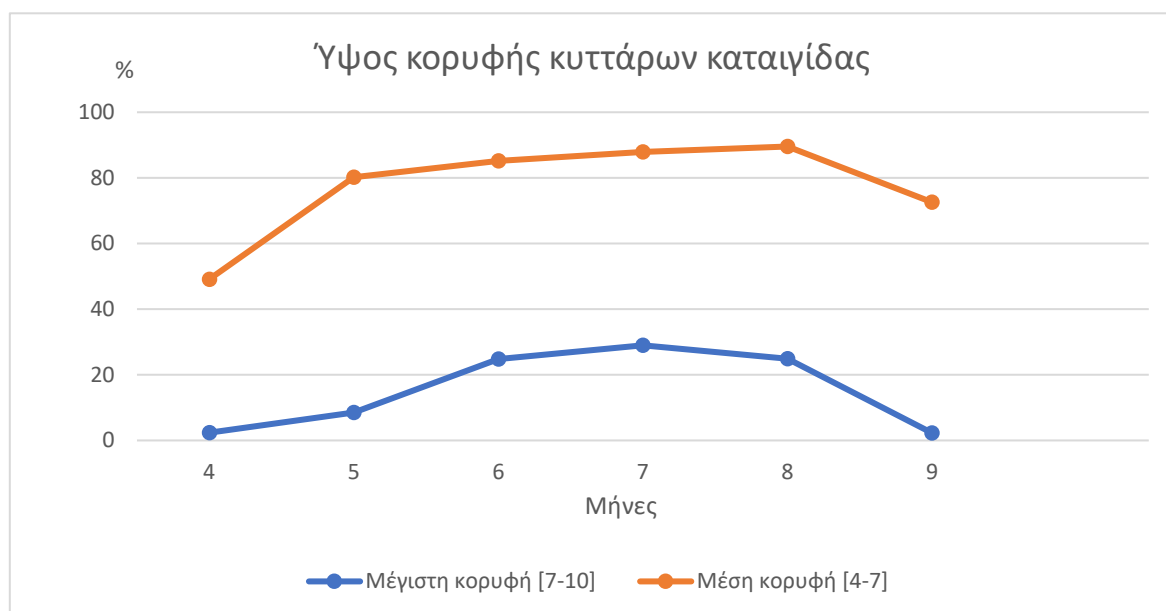
Πίνακας 4.4: : Πίνακας συχνοτήτων για την μέση κορυφή (mean top). Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

Months	[1-4]	[4-7]	[7-10]	[10-13]
4	50.9	49.1	0.0	0.0
5	18.1	80.2	1.6	0.0
6	6.8	85.2	8.0	0
7	7.7	87.9	4.3	0
8	9.0	89.6	1.5	0
9	26.9	72.6	0.6	0



Πίνακας 4.5: Πίνακας συχνοτήτων για την μέγιστη κορυφή (max top). Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες

Months	[1-4]	[4-7]	[7-10]	[10-13]
4	34.3	63.3	2.4	0
5	11.3	80.2	8.5	0
6	2.4	70.0	24.8	2.8
7	4.8	64.7	29.0	1.4
8	8.0	66.7	24.9	0.5
9	12.0	85.7	2.3	0.0



Σχήμα 4.12: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών της κορυφής, για την κλάση με εύρος τιμών από 4 έως 7km (mean top) και 7 έως 10km (max top).

4.3 Δυναμικά

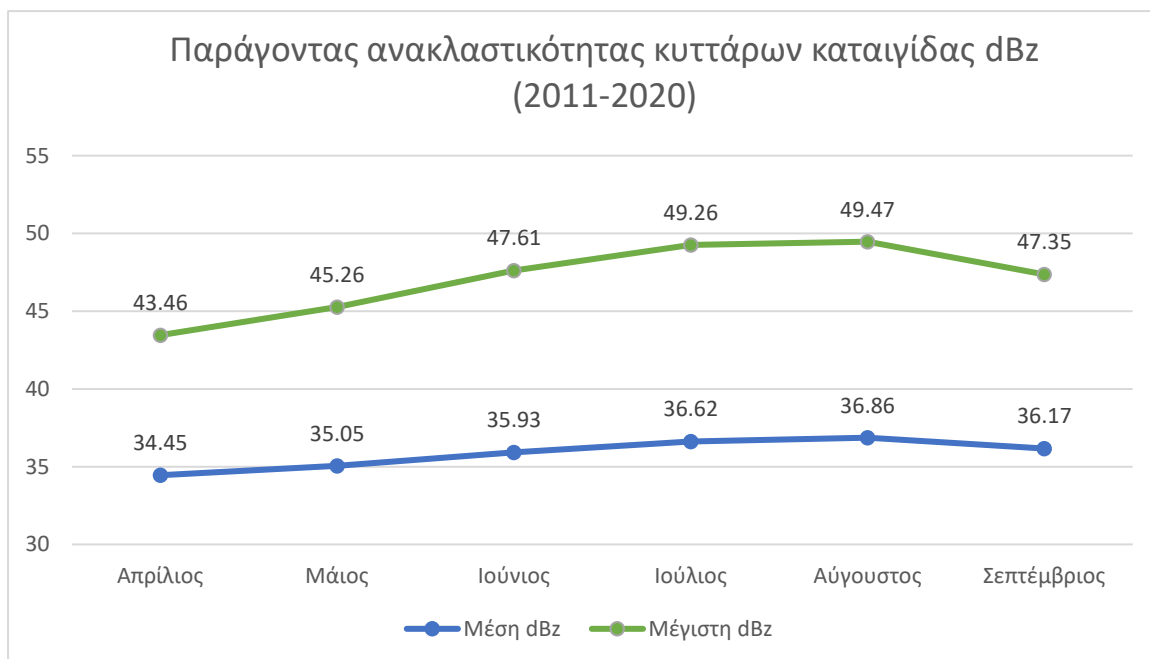
Ανακλαστικότητα dBz - Radar reflectivity

Ο παράγοντας ανακλαστικότητας του ραντάρ αποτελεί μέτρο έντασης του κυττάρου καταιγίδας (Μπαμπζέλης, 2013) και εξαρτάται από τα εξής:

- Μέγεθος, σχήμα και κατανομή των υδροσταγονιδίων
- Φάση, υγρή ή παγωμένη
- Πλήθος υδροσταγονιδίων ανά μονάδα του όγκου

Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 4.13) απεικονίζονται η μηνιαία κατανομή της μέσης (mean dBz) και μέγιστης (max dBz) ανακλαστικότητας, για όλη την περίοδο της μελέτης. Η κατανομή των μέσων όρων και για τις δύο παραμέτρους είναι σχεδόν σταθερή, αφού οι τιμές έχουν σχετικά μικρή απόκλιση. Για την μέση και την μέγιστη ανακλαστικότητα το μέγιστο εμφανίζεται τον Αύγουστο, 36.86 και 49.47 αντίστοιχα.

Στους πίνακες συχνотήτων 4.6 και 4.7 φαίνεται πιο αναλυτικά η κατανομή της ανακλαστικότητας. Από τον πίνακα 4.6 προκύπτει ότι η κλάση με τις περισσότερες καταγραφές για την μέση ανακλαστικότητα είναι η [30-37] και ακολουθεί η [37-44], ενώ τα ποσοστά στις υπόλοιπες είναι μηδενικά. Αντίθετα, για την μέγιστη εμφανίζονται τιμές σχεδόν σε όλα τα εύρη, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.7. Παρόλο που οι κλάσεις που υπερισχύουν είναι οι [37-44] και [44-51], υπάρχουν τιμές για την μέγιστη ανακλαστικότητα που ξεπερνούν αυτό το διάστημα. Στη συνέχεια παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα των κλάσεων που προκύπτουν, 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.13: Μηνιαία κατανομή των μέσων όρων της μέσης (mean dBz) και της μέγιστης (max dBz) ανακλαστικότητας.

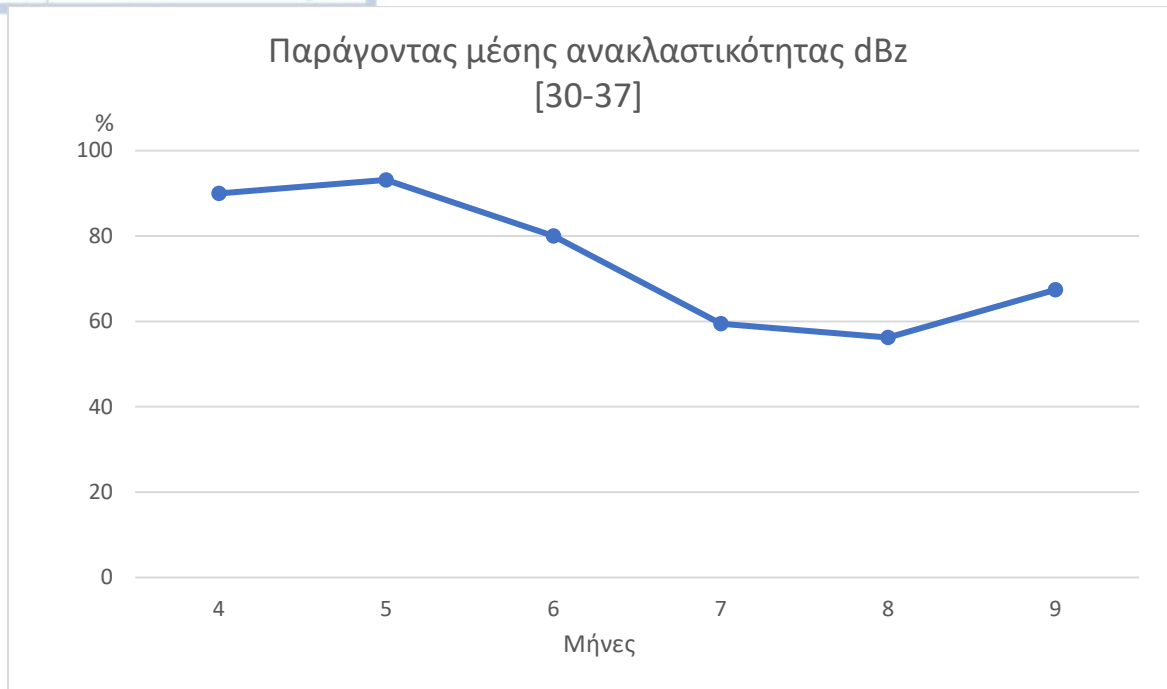


Πίνακας 4.6: Πίνακας συχνοτήτων για την μέση ανακλαστικότητα (mean dBz). Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες

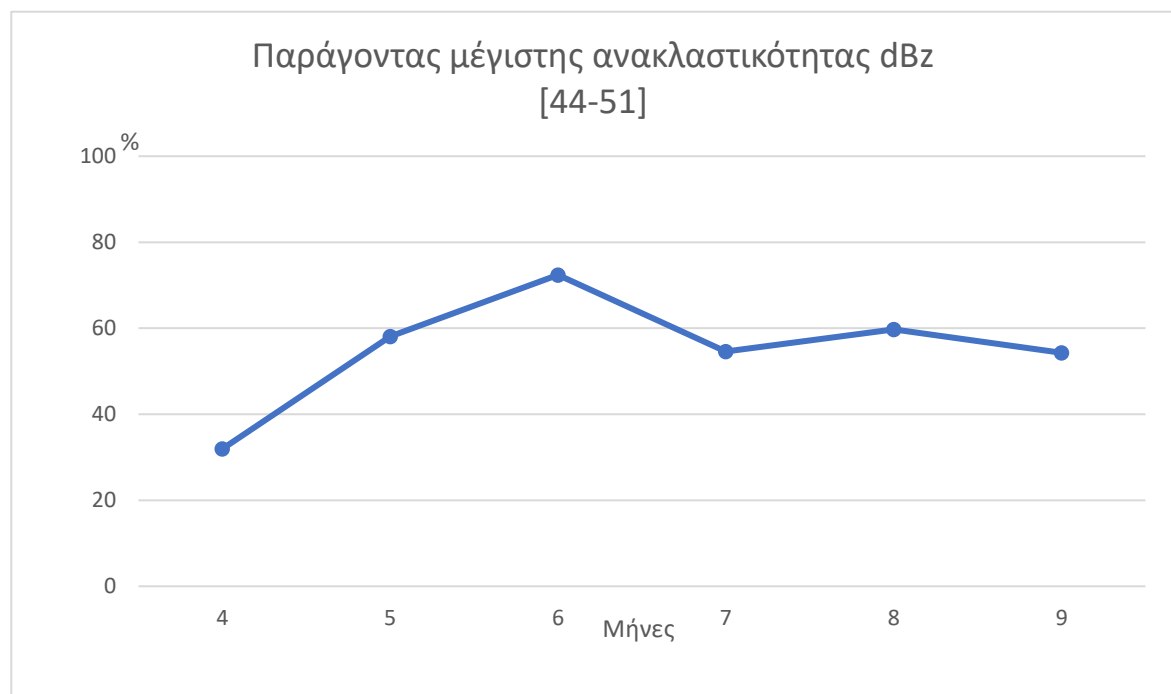
Months	[30-37]	[37-44]	[44-51]	[51-58]	[58-65]	[65-72]
4	89.9	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0
5	93.1	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0
6	80.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	59.4	40.6	0.0	0.0	0.0	0.0
8	56.2	43.8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	67.4	32.6	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 4.7: Πίνακας συχνοτήτων για την μέγιστη ανακλαστικότητα (max dBz). Φαίνονται τα ποσοστά των καταγραφών που ανήκουν σε κάθε κλάση για όλους τους μήνες.

Months	[30-37]	[37-44]	[44-51]	[51-58]	[58-65]	[65-72]
4	1.8	60.9	32.0	4.7	0.6	0.0
5	0.4	35.5	58.1	5.2	0.8	0.0
6	0.4	12.4	72.4	14.8	0.0	0.0
7	0.5	12.6	54.6	31.9	0.5	0.0
8	0.0	6.5	59.7	32.8	1.0	0.0
9	1.1	24.6	54.3	17.7	2.3	0.0



Σχήμα 4.14: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών της μέσης ανακλαστικότητας, για την κλάση [30-37].



Σχήμα 4.15: Μηνιαία κατανομή των ποσοστών των καταγραφών της μέγιστης ανακλαστικότητας, για την κλάση [44-51].

Το μοτίβο των προηγούμενων παραμέτρων ακολουθεί και η ανακλαστικότητα, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται τους καλοκαιρινούς μήνες.

Προκειμένου να υπάρξει μια σαφέστερη εικόνα για τα φαινόμενα που προκύπτουν από τις συγκεκριμένες τιμές της ανακλαστικότητας, αναφέρονται στους ακόλουθους πίνακες, 4.8 και 4.9 οι αντιστοιχίες των φαινομένων με τον παράγοντα ανακλαστικότητας.

Γενικά, η διαφορά μεταξύ χιονιού και βροχής είναι ότι ο συντελεστής $|K|^2$ (Κεφάλαιο 2.5 σχέση 2.5.2) για τον πάγο είναι μικρότερος από του νερού. Το οπισθοσκεδασμένο σήμα σωματιδίων νερού είναι κατά 7dBz ισχυρότερο απ' ότι αυτό που θα έδιναν τα σωματίδια πάγου. Όσον αφορά το χαλάζι, αποτελείται από υδρομετέωρα πάγου διαμέτρου μεγαλύτερη από 5mm. Ανακλαστικότητα μεγαλύτερη από 55dBz συνεπάγεται χαλαζόπτωση (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διαθέσιμο στο:

<http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>).

Πίνακας 4.8: Σχέση μεταξύ φαινομένων και παράγοντα ανακλαστικότητας (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

Είδος φαινομένου	Ανακλαστικότητα
Ψιχάλα	$Z=140 R^{1.5}$
Στρωματόμορφη βροχή	$Z=200 R^{1.6}$
Ορογραφική βροχή	$Z=31 R^{1.71}$
Καταιγίδα	$Z=500 R^{1.5}$
Χιόνι	$Z=1780 R^{2.21}$

Πίνακας 4.9: Σχέση μεταξύ φαινομένων και παράγοντα ανακλαστικότητας (Σιούτας, 2018).

Ο Δείκτης FOKR (Foote-Krauss) εκτίμησης της έντασης των καταιγίδων			
Κατηγορία Καταιγίδας	Ανακλαστικότητα Ραντάρ	Ύψος Καταιγίδας	Χαρακτηριστικά
1	> 40 dBZ	> 3 km ΜΣΘ	Ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών με δυναμικό για χαλάζι. Η πρώτη ηχώ πάνω από ύψος -8C
2	> 45 dBZ	> 3 km ΜΣΘ	Καταιγίδες με αυξημένη πιθανότητα για χαλάζι
3	45–55 dBZ	ΔΗ45>3 km	Χαλαζοκαταιγίδες
4	> 55 dBZ	ΔΗ45>4 km	Σφοδρές καταιγίδες και υπερκαταιγίδες

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση κυττάρων καταιγίδων για την περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. Συγκεκριμένα, η μελέτη αξιοποίησε δεδομένα ραντάρ του ΕΛΓΑ και στόχος της ήταν η παρατήρηση έξι παραμέτρων: ταχύτητας, όγκου, μάζας, έκτασης, ύψος κορυφής (μέση, μέγιστη) και ανακλαστικότητας (μέση, μέγιστη). Παρατηρήθηκε μια αλληλουχία μεταξύ των χαρακτηριστικών των κυττάρων, ένα μοτίβο στην κατανομή. Με εξαίρεση την ταχύτητα (average of mean speed) και την επιφάνεια (average of envelope area) των κυττάρων (Σχήμα 4.1 και 4.9 αντίστοιχα), οι υπόλοιπες παράμετροι παρουσίαζαν τις μέγιστες καταγραφές τους μήνες του καλοκαιριού (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο).

Οι καταιγίδες, αν και εμφανίζονται όλη την διάρκεια του χρόνου, ευνοούνται την θερινή περίοδο λόγω της έντονης αστάθειας της ατμόσφαιρας. Η ύπαρξη μέγιστης αστάθειας, την περίοδο του καλοκαιριού, οφείλεται στις αυξημένες θερμοκρασίες, οι οποίες ευνοούν την εξάτμιση. Οι καταιγίδες είναι ανάλογες της δυναμικής ενέργειας της ατμόσφαιρας και τα χαρακτηριστικά τους μεγιστοποιούνται όταν αυτή φτάνει στο ζενίθ της, δηλαδή την εποχή του καλοκαιριού.

Στον ακόλουθο πίνακα 5.1 φαίνονται για κάθε μηνά ξεχωριστά τα χαρακτηριστικά μια μέσης καταιγίδας, όπως προέκυψαν από την βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε. Παρατηρείται ότι ο μέγιστος όγκος, μάζα και επιφάνεια εμφανίζονται τον Ιούλιο, με 58.4 km³, 27.4 ktons και 23.5 km² αντίστοιχως. Για το ύψος της κορυφής ενός κυττάρου καταιγίδας τα μέγιστα εμφανίζονται τον Ιούνιο, 5.4km για την μέση κορυφή και 6.4 για την μέγιστη. Ο παράγοντας ανακλαστικότητας μεγιστοποιείται τον Αύγουστο, 36.9 και 49.5 dBz, για την μέση και την μέγιστη ανακλαστικότητα αντίστοιχα. Τέλος, η ταχύτητα των κυττάρων, σε αντίθεση με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά τα οποία μεγιστοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες, εμφανίζει μέγιστο τον Απρίλιο, 16km/hr.

Πίνακας 5.1: Μέσος όρος των χαρακτηριστικών των καταιγίδων για κάθε μήνα.

Μήνες	Όγκος	Μάζα	Επιφάνεια	Μέση Κορυφή	Μέγιστη Κορυφή	Μέση dBz	Μέγιστη dBz	Ταχύτητα
Απρίλιος	39.4	12.5	25.0	4.0	4.5	34.5	43.5	16.0
Μάιος	46.8	17.3	23.4	4.7	5.4	35.1	45.3	15.7
Ιούνιος	56.7	25.4	23.1	5.4	6.4	35.9	47.6	13.8
Ιούλιος	58.4	28.4	23.5	5.3	6.3	36.6	49.3	13.6
Αύγουστος	52.9	26.2	21.4	5.3	6.2	36.9	49.5	10.3
Σεπτέμβριος	43.0	18.3	22.0	4.6	5.2	36.2	47.4	13.7

Τα χαρακτηριστικά των καταιγίδων λαμβάνονται από μετεωρολογικό ραντάρ C-Band με τη χρήση του συστήματος TITAN. Το λογισμικό TITAN, όπως προαναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2.6), είναι ένα σύνολο προγραμμάτων που αναπτύχθηκε για τον αυτόματο εντοπισμό, την παρακολούθηση και την πρόβλεψη των κυττάρων, με βάση τις μετρήσεις της ανακλαστικότητας του ραντάρ. Ο αλγόριθμος, για κάθε τιμή ανακλαστικότητας, ορίζει ένα κύτταρο ως μια τρισδιάστατη περιοχή στην οποία οι τιμές ανακλαστικότητας υπερβαίνουν ένα δεδομένο όριο. Έπειτα, ο αλγόριθμος αντιστοιχίζει τις καταιγίδες μεταξύ διαδοχικών εικόνων ραντάρ. Το σύστημα έχει επίσης την δυνατότητα να ταξινομεί τις καταιγίδες, σε σύνθετες (πολυκύτταρες καταιγίδες) και μεμονωμένες (μονοκύτταρικές καταιγίδες), ανάλογα με το αν τα κύτταρα συγχωνεύονται ή χωρίζονται (Dixon and Wiener, 1993). Η συγκεκριμένη μελέτη ασχολείται με μονοκύτταρικές.

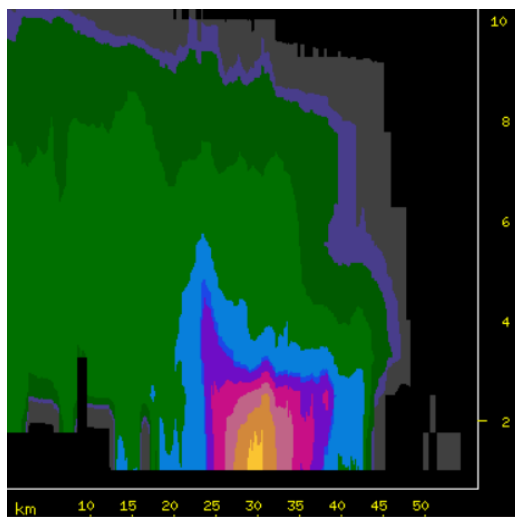
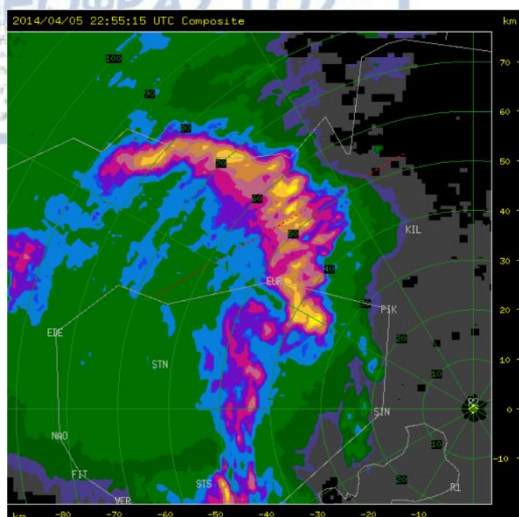
Στη συνέχεια παρατίθενται τα στοιχεία ορισμένων καταιγίδων (Πίνακας 5.2), οι οποίες αντιπροσωπεύουν την «μέση» καταιγίδα για κάθε μήνα, καθώς και οι αντίστοιχες εικόνες που προέκυψαν από το σύστημα TITAN (Εικόνες 5.1-6). Με τον όρο «μέση καταιγίδα» εννοείται μια καταιγίδα που τα χαρακτηριστικά της εμπίπτουν στο εύρος των τιμών που ορίζει η κλάση με την μεγαλύτερη συχνότητα, για κάθε παράμετρο.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μιας «μέσης» καταιγίδας για κάθε μήνα.

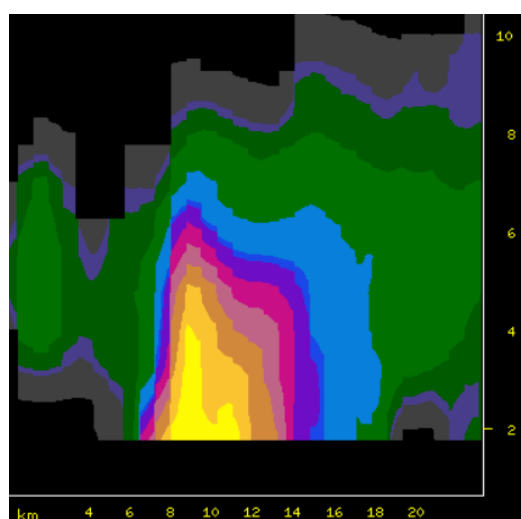
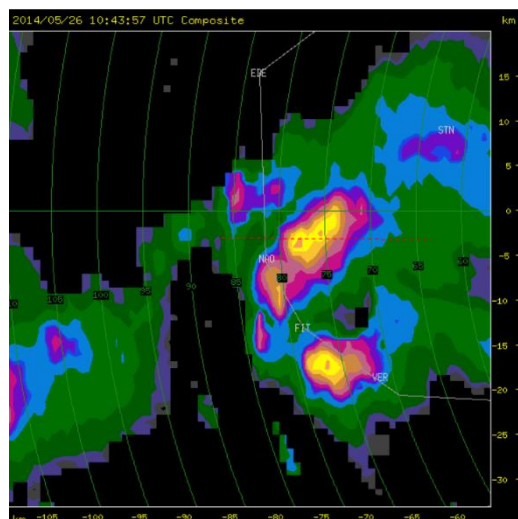
Μήνας	Μέρα	Έτος	Όγκος	Μάζα	Επιφάνεια	Μέση Κορυφή	Μέγιστη Κορυφή	Μέση dBz	Μέγιστη dBz	Ταχύτητα
Απρίλιος	5	2014	46.14	16.10	22.22	4.64	5.31	34.21	43.25	18.60
Μάιος	27	2014	50.65	24.65	21.38	5.27	6.63	37.39	54.75	14.53
Ιουνιος	11	2015	45.84	20.20	19.79	4.88	5.63	36.14	47.75	15.49
Ιούλιος	5	2012	34.25	9.87	16.22	5.15	5.69	33.98	43.00	5.92
Αύγουστος	26	2019	46.49	23.02	17.79	5.24	6.01	36.32	48.02	6.30
Σεπτέμβριος	28	2015	35.84	14.52	17.86	4.62	5.20	35.94	47.28	6.60

Σε κάθε «μέση» καταιγίδα αναλογεί μια εικόνα στην οποία το κύτταρο απεικονίζεται στο οριζόντιο επίπεδο, PPI σάρωση και μία στο κατακόρυφο, RHI σάρωση (Εικόνες 5.1-6, αριστερά και δεξιά αντίστοιχα). Η κατακόρυφη τομή των κυττάρων φαίνεται στις εικόνες PPI με μία διακεκομμένη κόκκινη γραμμή.

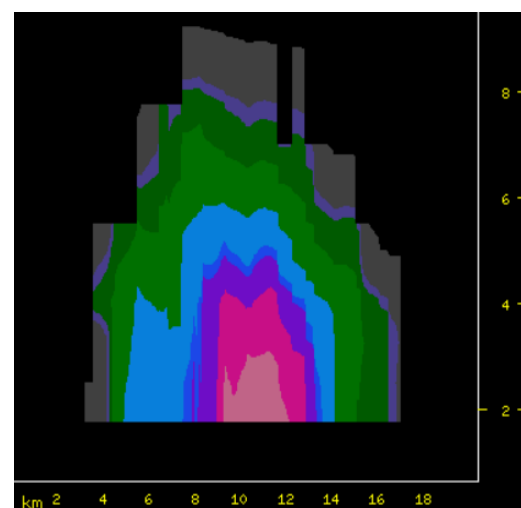
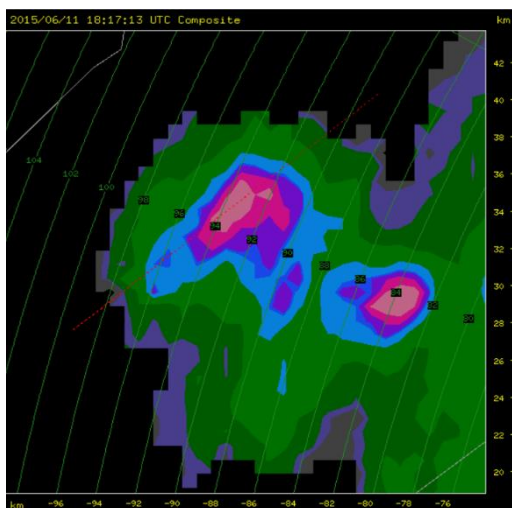
Τα περισσότερα κύτταρα εμφανίζονται με λοβοειδές σχήμα και τα χρώματα αντιστοιχούν σε τιμές ανακλαστικότητας dBz. Όσο πιο θερμά χρώματα (κίτρινα, πορτοκαλί, κόκκινα), τόσο πιο έντονα τα φαινόμενα σε αυτή την περιοχή. Στις περιοχές όπου η ανακλαστικότητα πλησιάζει τα 55dBz είναι πιθανή η εκδήλωση χαλαζόπτωσης, όπως συμβαίνει στη «μέση» καταιγίδα τον Μάιο (Εικόνα 5.2) και τον Αύγουστο (Εικόνα 5.5). Αντίθετα οι μικρότερες τιμές dBz αντικατοπτρίζουν πιο ασθενή φαινόμενα.



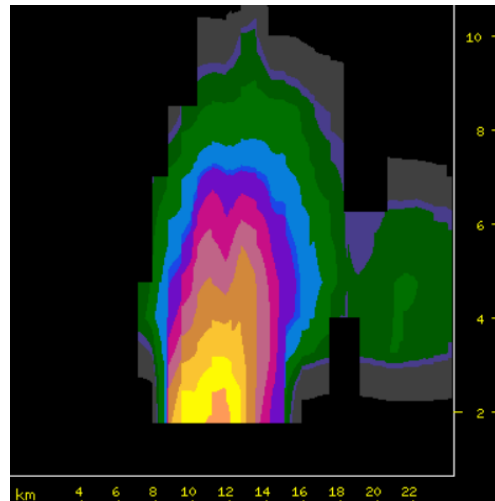
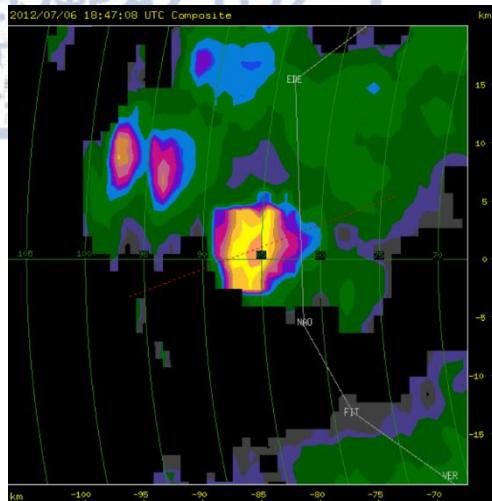
Εικόνα 5.1: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Απρίλιο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI.



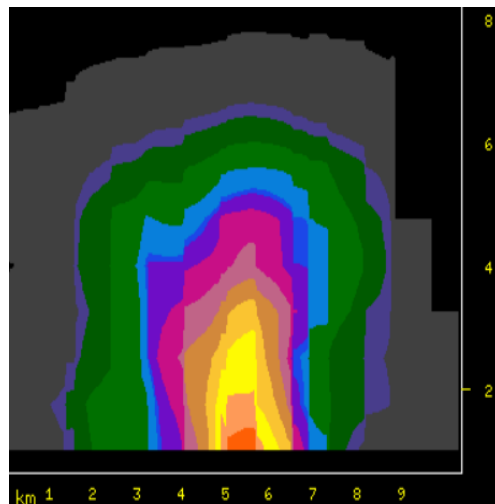
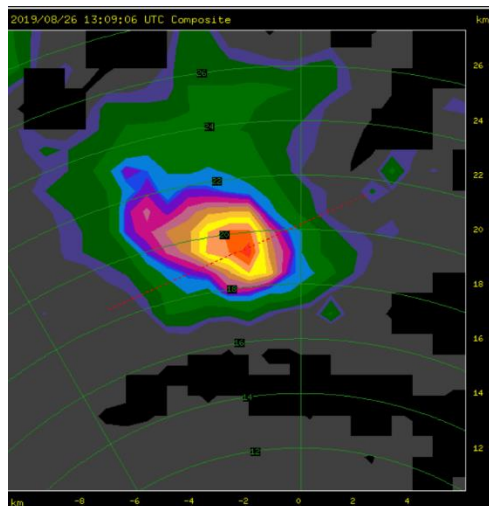
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Μάιο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI.



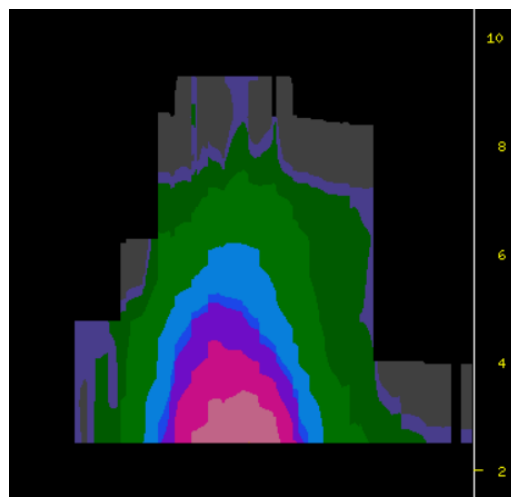
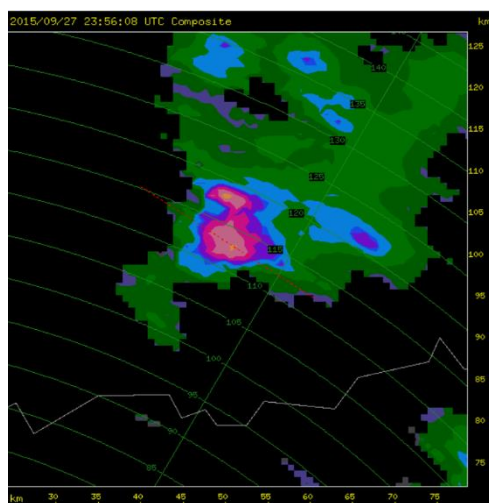
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Ιούνιο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI.



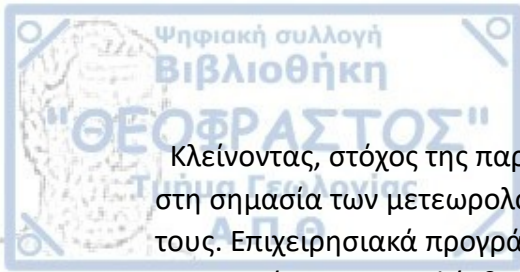
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Ιούλιο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI.



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Αύγουστο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI.



Εικόνα 5.6: Απεικόνιση κυττάρου μέσης καταιγίδας στο σύστημα TITAN για τον μήνα Σεπτέμβριο. Αριστερά: Οριζόντιο επίπεδο, σάρωση PPI. Δεξιά: Κατακόρυφη τομή κυττάρου, σάρωση RHI



Κλείνοντας, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να δώσει έμφαση στη σημασία των μετεωρολογικών ραντάρ και στην ανάγκη για την εκμετάλλευσή τους. Επιχειρησιακά προγράμματα, όπως το Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζιακής Προστασίας που αναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2.8), η αναβάθμιση του δικτύου ραντάρ της χώρας, η σωστή ενημέρωση και εκπαίδευση ανθρώπινου δυναμικού αλλά και η οικονομική ενίσχυση των επιστημονικών φορέων, είναι μόνο μερικά από αυτά που μπορούν να υλοποιηθούν, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη αξιοποίηση των ραντάρ, αλλά και η ανάπτυξη του κλάδου της μετεωρολογίας γενικότερα.



ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Καρακώστας, Θ., 2013: Σημειώσεις συνοπτικής και δυναμικής μετεωρολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ 39- 49

Κάρταλης, Κ., Φεΐδας, Χ., 2013: Αρχές και εφαρμογές δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Εκδόσεις Τζιολά, Θεσσαλονίκη, σελ 53.

Μακρογιάννης, Τ., Ι., Σαχσαμάνογλου, Χ., Σ., 2004: Μαθήματα γενικής μετεωρολογίας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ 282-285.

Μπαλτάς, Ε., 1996: Εκτίμηση και πρόγνωση καταιγίδων και πλημμυρών με χρήση μετεωρολογικού ραντάρ. Διατριβή για διδακτορικό δίπλωμα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών, σελ 40 και 54-58.

Μπαμπζέλης, Δ., 2013: Διερεύνηση συνθηκών εφαρμογής προγραμμάτων αύξησης βροχής: Εφαρμογή στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ 95-105 και 137-157.

Σιούτας, Μ., 2018: Μετεωρολογικό Ραντάρ και πρόγνωση σφοδρών καταιγίδων και πλημμυρών. Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών, ΕΛΓΑ, Αεροδρόμιο Μακεδονία, Θεσσαλονίκη. Διαθέσιμο στο: <https://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/06/Sioutas.pdf>

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Ahrens, C. D., Henson, R. (2023). Η ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΣΗΜΕΡΑ: Εισαγωγή στον καιρό, το Κλίμα και το Περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιολά, 13η έκδοση, p.24, 258, 469.

Battan, L.J. (1973). Radar observation of the atmosphere, University of Chicago Press, Chicago, p. 324.

Battan, L.J. (1976). Vertical air motions and the Z-R relation, Journal of Applied Meteorology, Vol. 15, pp. 1120-1121.

Collier, C.G. (1989). Applications of weather radar systems, John Wiley and Sons, p. 294.

Dixon M, Wiener G (1993) TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting – A radar-based methodology. J. Atmos. Ocean. Tech. 10, 785-797.

Gallicchio, N. (2017). Radar and Satellite History. The Evolution of Meteorology: a look into the past, present, and future of weather forecasting, 43-49.

Guarnieri, M. (2010). The early history of radar [Historical]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 4(3), 36-42.



Kollias, P., Potiriadis, G., Alexakis, G., & Serpetzoglou, E. (2007, August). THE HELLENIC WEATHER RADAR NETWORK–UPGRADES, DESCRIPTION AND FUTURE PLANS. In 33 rd Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia.

Neipp, C., Hernández, A., Rodes, J. J., Márquez, A., Beléndez, T., & Beléndez, A. (2003). An analysis of the classical Doppler effect. European journal of physics, 24(5), 497.

O'Donnell, R. M. (2007). Introduction to radar systems. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, Primavera.

Sarkar, T. K., & Palma, M. S. (2014). A history of the evolution of RADAR. In 2014 44th European Microwave Conference (pp. 734-737). IEEE

Sarkar, T. K., Palma, M. S., & Mokole, E. L. (2016). Echoing across the years: A history of early radar evolution. IEEE Microwave Magazine, 17(10), 46-60.

Strong, R. (2005). Radar: the evolution since World War II. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 20(1), 19-24.

Yao, L., & Yao, Z. (2020, September). Pseudo RHI Software Developing for Dual-polarization Weather Radar CAPPI Observation Variables. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1646, No. 1, p. 012149). IOP Publishing.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

National Oceanic and Atmospheric Administration. Διαθέσιμο στο:
<https://www.noaa.gov/>

Radartutorial.eu. Διαθέσιμο στο: <https://www.radartutorial.eu/12.scopes/sc05.en.html>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, (EMY). Διαθέσιμο στο:
http://www.emy.gr/emyl/observation/sa_xartis_paron_kairos_perioxes?ora=None&perioxi=GRE

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθηνών, Παρουσίαση. Διαθέσιμο στο:
<http://users.ntua.gr/dkoutso/courses/hydrometeo/2001RadarSatelSM.pdf>

Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων, (ΕΛΓΑ). Διαθέσιμο στο:
<https://www.elga.gr/energitiki-prostasia/keme>

ΠΕΛΛΗΣ, 2014. Ηλεκτρονικό Blog . Διαθέσιμο στο:
https://physiclessons.blogspot.com/2013/11/blog-post_14.html