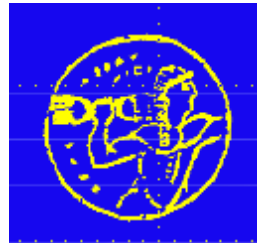
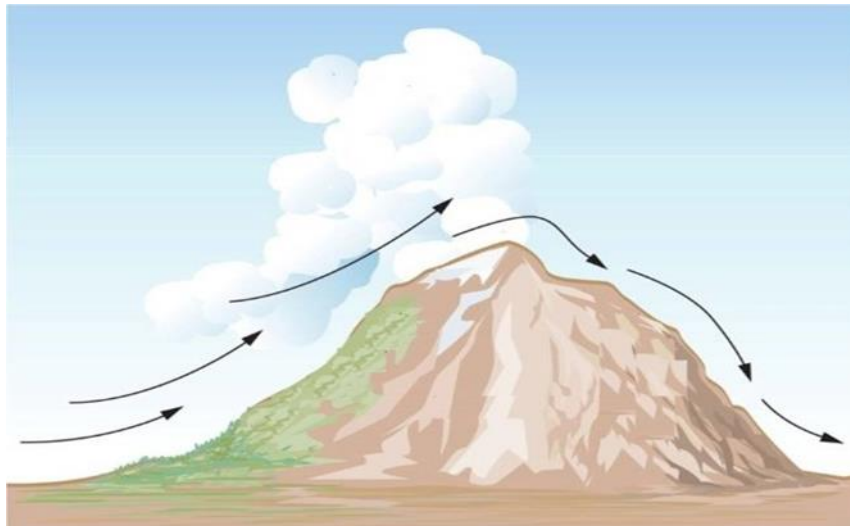




ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΥΜΠΙΑΝΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος



ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΥΕΤΟΥ ΟΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΝΕΦΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ

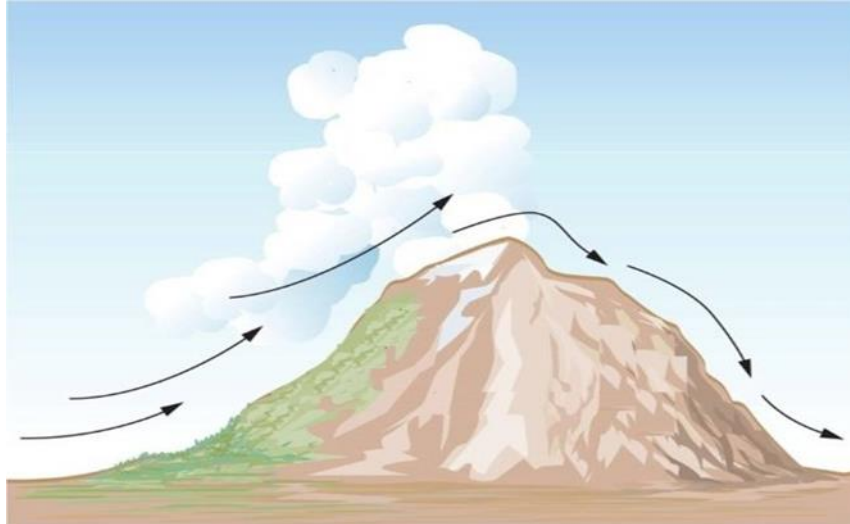
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
“ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2019



ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΥΜΠΑΝΙΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος



**ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΥΕΤΟΥ ΟΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΝΕΦΩΝ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του
Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη
«Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 3/7/2019

Επιβλέπων Καθηγητής (έως 31/8/2018): Θεόδωρος Καρακώστας, Ομότιμος Καθηγητής

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Πυθαρούλης Ιωάννης,
Ζάνης Πρόδρομος,
Μπαμπζέλης Δημήτριος,

Αναπληρωτής Καθηγητής, Επιβλέπων
Καθηγητής, Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής
Ε.ΔΙ.Π., Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής



© Κωσταντίνος Τυμπανίδης, Γεωλόγος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΔΥΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΥΕΤΟΥ ΟΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΝΕΦΩΝ ΜΕ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Kostantinos Tympanidis, Geologist, 2019

All rights reserved.

ON THE POTENTIALITY OF OROGRAPHIC CLOUDS RAIN ENHANCEMENT

OVER NORTHERN GREECE – *Master of Science Thesis*

Citation:

Τυμπανίδης, Κ., 2019. – Δυνητικότητα Αύξησης Υετού Ορογραφικών Νεφών με Εφαρμογή στη Βόρεια Ελλάδα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 73 σελ.

Tympanidis, K., 2019. – On the Potentiality of Orographic Clouds Rain Enhancement Over Northern Greece. Master of Science Thesis, Dept. of Meteorology and Climatology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 73pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με θέμα: «Δυνητικότητα Αύξησης Υετού Ορογραφικών Νεφών με Εφαρμογή στη Βόρεια Ελλάδα», εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών μου σπουδών στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Θεόδωρο Καρακώστα, Ομότιμο Καθηγητή τώρα και επιβλέποντα Καθηγητή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας έως την 31^η Αυγούστου 2018, για τις γνώσεις και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για την αμέριστη εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που έδειξε στο πρόσωπό μου. Τον ευχαριστώ, γιατί ήταν δίπλα μου, από την πρώτη στιγμή της γνωριμίας μας και η ενθαρρυντική του στάση ήταν κινητήριο δύναμη για τη διεκπεραίωση του προγράμματος των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Πυθαρούλη, Αναπληρωτή Καθηγητή, που ανέλαβε την επίβλεψη της Μεταπτυχιακής μου Διπλωματικής Εργασίας από την 1^η Σεπτεμβρίου 2018 και μετά, για τις γνώσεις και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και για την αμέριστη εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω και τα άλλα δυο μέλη της τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, το Διευθυντή του Τομέα, Καθηγητή κ. Πρόδρομο Ζάνη και τον κ. Δημήτρη Μπαμπζέλη, Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, αρχικά για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και για την ουσιαστική συμβολή τους κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου που με στηρίζει σε κάθε βήμα της ζωής μου. Η βοήθεια τους είναι ανεκτίμητη. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη και την ενθάρρυνσή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



Ο αντικειμενικός σκοπός στη μελέτη αυτή είναι η διερεύνηση της δυνητικότητας αύξησης του υετού στη Βόρεια Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Κεντρική Μακεδονία. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, αφενός, έχουν αναλυθεί και μελετηθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός ορογραφικών νεφών πάνω από την ορεινή περιοχή του Βερμίου, προκειμένου να δημιουργηθεί μια εμπεριστατωμένη και ολοκληρωμένη εικόνα και γνώση των χαρακτηριστικών τους και να εντοπιστούν και να τονιστούν εκείνα τα χαρακτηριστικά και ιδιότητες που υποστηρίζουν τη δυνητικότητα εφαρμογής προγράμματος αύξησης του υετού, μελλοντικά. Αφετέρου, τα προκύπτοντα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών να συγκριθούν με αντίστοιχα, ανάλογα και παρόμοια χαρακτηριστικά μη ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν σε πεδινή και πολύ γειτονική περιοχή του χώρου μελέτης.

Οι παρατηρήσεις των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, καθώς και η σύγκριση μεταξύ των δύο επιλεγμένων περιοχών (μιας ορεινής και μιας πεδινής) στην Κεντρική Μακεδονία προήλθαν από το C-band ραντάρ καιρού, που βρίσκεται στην περιοχή Φυλίου, κοντά στη Θεσσαλονίκη. Οι μετρήσεις αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το σύστημα TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis και Nowcasting). Στα χαρακτηριστικά των νεφών που μελετήθηκαν περιλαμβάνονται και η κατακόρυφη έκταση του νέφους, η ανακλαστικότητα, ο όγκος, η έκταση, η μάζα, ο ρυθμός βροχόπτωσης, η ταχύτητα κίνησης και η περιεκτικότητα του υγρού υετού στο νέφος.

Οι αναλύσεις των μετεωρολογικών δεδομένων του ραντάρ καιρού αναδεικνύουν σημαντικά στοιχεία των παρατηρούμενων ορογραφικών νεφών, περιγράφουν και συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιοχών και εντοπίζουν τις μηνιαίες διαφορές μεταξύ τους. Η μελέτη των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών υλοποιήθηκε για μια περίοδο πέντε (5) ετών, δηλαδή από τον Απρίλιο του 2006 έως το Δεκέμβριο του 2010, με έμφαση στην περίοδο Απριλίου - Σεπτεμβρίου κάθε έτους. Είναι σπουδαίο να τονιστεί ότι ένας ικανοποιητικός αριθμός ορογραφικών νεφών της χειμερινής περιόδου έχουν συμπεριληφθεί στη μελέτη αυτή. Από την άλλη μεριά, η συγκριτική μελέτη μεταξύ των χαρακτηριστικών των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών εκπονήθηκε για την περίοδο Απρίλιος-Σεπτέμβριος για τα χρόνια 2008 έως 2010.

Από τη μελέτη των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών προκύπτουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της ψυχρής και της θερμής περιόδου του έτους. Τα ορογραφικά νέφη φαίνονται να είναι πιο έντονα κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους και λιγότερο έντονα κατά την ψυχρή. Όσον αφορά στη συγκριτική μελέτη μεταξύ των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, φαίνεται ότι τα κύτταρα με ενσωματωμένες ανοδικές κινήσεις που επηρεάζουν συγχρόνως και τις δύο περιοχές, διαφέρουν, τόσο ως προς τον αριθμό, όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Τα κύτταρα των ορογραφικών νεφών αναπτύσσονται πάνω από την ορεινή περιοχή νωρίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας, κινούνται πιο αργά, έχουν υψηλότερες μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας και το 35% αυτών δεν εμφανίζει δυνητικότητα παροχής βροχής. Η μηνιαία κατανομή των σχετικών συχνοτήτων των μελετώμενων κυττάρων παρουσιάζει επίσης ορισμένες διαφορές μεταξύ των μεταβατικών και των καλοκαιρινών μηνών.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι, ναι υφίσταται μεγάλη δυνητικότητα αύξησης του υετού στη Βόρεια Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Κεντρική Μακεδονία.



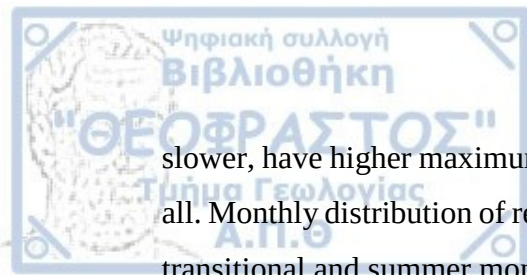
ABSTRACT

The objective on this study is to investigate the potentiality of orographic cloud rain enhancement over northern Greece and particularly over Central Macedonia. To meet this objective, firstly, certain orographic clouds over the mountainous area of Vermion have been analyzed and studied, in order to establish an all-around integrated knowledge of their characteristics and point out those features and qualities that attribute to the feasibility potential of possible rain enhancement future project. Secondly, the resulted orographic cloud characteristics to be compared against similar and analogous characteristics, resulted from non-orographic clouds, being observed within the near neighborhood plain area.

The measurement characteristics of the orographic and non-orographic clouds and the comparison of them between the two selected areas (one mountainous and one plain) over Central Macedonia were obtained through the C-band weather radar being located at Fyliro area, close to Thessaloniki. The characteristics were analyzed using the cell tracker TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting). The radar-based characteristics include cloud vertical extend, reflectivity, volume, area, mass, precipitation rate, speed and liquid water content.

The analyses of the weather radar measurements bring out important evidences of the occurred orographic clouds, describe and compare orographic and non-orographic storm characteristics between the two examined areas, and identify monthly differences among them. The study of the orographic cloud characteristics was performed for a 5 year period, from April 2006 until December 2010, focusing on the April to September period of each year. It is important to mention that several cases of winter time orographic clouds are also included. On the other hand, the comparison study between the orographic and non-orographic clouds was performed for the period April to September for the years 2008 to 2010.

Concerning the orographic cloud characteristics, significant differences are indicated between the cold and the warm season of the year. Orographic clouds appear to be more intense during the warm season of the year and less during the cold. Concerning the comparison between orographic and non-orographic clouds, appears that the convective cells that affect both areas differ, in number as well as in their characteristics. Cells develop over the mountainous area earlier within the day, move



slower, have higher maximum reflectivity values and 35% of them do not precipitate at all. Monthly distribution of relative frequencies also revealed certain differences among transitional and summer months.

Based upon these, it is concluded that there is a great potentiality of orographic cloud rain enhancement over northern Greece and particularly over Central Macedonia.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1	Γενικές εισαγωγικές έννοιες	10
1.2	Γενικά περί ορογραφικών νεφών	11
1.3	Βασικές αρχές της Τροποποίησης του Καιρού	13
1.4	Αντικειμενικός σκοπός, σημασία της μελέτης και ανασκόπηση αυτής ...	18
1.4.1	Αντικειμενικός σκοπός	18
1.4.1	Σημασία της μελέτης	19
1.4.1	Ανασκόπηση της μελέτης	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ

2.1	Γενικά ιστορικά στοιχεία	21
2.2	Γενικά στοιχεία σχεδιασμού προγράμματος αύξησης νετού ορογραφικών νεφών	24
2.3	Γενικά στοιχεία επιλογής περιοχής και περιόδου μελέτης ερευνητικών προγραμμάτων αύξησης νετού ορογραφικών νεφών	25
2.4	Προγράμματα αύξησης νετού από ορογραφικά νέφη	27
2.5	Γενικές συμπερασματικές έννοιες από την εφαρμογή προγραμμάτων αύξησης νετού από ορογραφικά νέφη	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1	Το ραντάρ καιρού	36
3.2	Δεδομένα μετεωρολογικού ραντάρ	39
3.3	Μεθοδολογία καταγραφής, επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων μετεωρολογικού ραντάρ	41
3.4	Χαρακτηριστικά νεφών	42
3.5	Χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1	Εισαγωγή	50
4.2	Χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών	51
4.3	Σύγκριση χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία	58
4.3.1	<i>Σύγκριση χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία</i>	<i>59</i>
4.3.2	<i>Μηνιαία σύγκριση των χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία</i>	<i>64</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1	Σύνοψη	68
5.1	Συμπεράσματα	69
5.1	Προοπτικές	72

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
---------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Γενικές εισαγωγικές έννοιες

Η ανάπτυξη της Μετεωρολογίας την τελευταία εκατονταετία υπήρξε σημαντική, όχι μόνο γι' αυτή καθαυτή την επιστημονική πρόοδο, με την έννοια της κατανόησης των καιρικών φαινομένων από τον άνθρωπο, αλλά και για τη δυνατότητα πρόγνωσης-πρόβλεψης των καιρικών συνθηκών, με σκοπό την έγκαιρη λήψη μέτρων για την αντιμετώπισή τους και για τον καλύτερο προγραμματισμό των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων της επιστήμης της Μετεωρολογίας, έτσι όπως διαμορφώνεται σήμερα, δε σταματάει εδώ. Ο άνθρωπος μπορεί πλέον να επέμβει στην εξέλιξη κάποιων ακραίων -και όχι μόνο- καιρικών φαινομένων. Ο τομέας της Μετεωρολογίας που ασχολείται μ' αυτό το θέμα είναι γνωστός πλέον ως *Τροποποίηση του Καιρού*. Επομένως, Τροποποίηση του Καιρού ονομάζεται ο κλάδος της επιστήμης της Μετεωρολογίας που ασχολείται με την επιστημονική επέμβαση στην εξέλιξη κάποιων νεφικών σχηματισμών και εν γένει καιρικών φαινομένων, με στόχο να τα μετατρέψει σε ευεργετικά, ή τουλάχιστον λιγότερο επιβλαβή για τον άνθρωπο και γενικά για τη ζωή του πάνω στη Γη (Καρακώστας, 2007). Ο κλάδος αυτός της

Εφαρμοσμένης Μετεωρολογίας αναπτύχθηκε εξαιτίας της ανάγκης του ανθρώπου να ελέγξει προς όφελος του τις καιρικές συνθήκες. Η τροποποίηση καιρού, εκτός των άλλων περιλαμβάνει:

- την αύξηση του υετού με σκοπό, την αντιμετώπιση της ξηρασίας, την ενίσχυση του υδροφόρου ορίζοντα και την αποταμίευση νερού
- την προστασία από το χαλάζι για τον περιορισμό των ζημιών στις καλλιέργειες και στις αστικές περιουσίες
- τη μετατόπιση του όγκου νερού των νεφών για την αποφυγή πλημμυρών.

Η Τροποποίηση του Καιρού αναπτύχθηκε ουσιαστικά ύστερα από την ανακάλυψη του Langmuir του Research Laboratory της General Electric Company το 1946, ότι ένα νέφος μπορεί να διαλυθεί διαχέοντας στο νέφος ξηρό πάγο, δηλαδή CO_2 σε θερμοκρασία περίπου -70°C . Ένα χρόνο αργότερα ο Vonnegut, μέλος της ίδιας ομάδας της General Electric Company, ανακάλυψε τον Ιωδιούχο Άργυρο (AgI), μια χημική ουσία που μπορεί να παράγει παγοπυρήνες, με απώτερο σκοπό να προκαλέσει παγοποίηση σε υπερψυγμένο νερό, σε θερμοκρασία -4°C και μικρότερη. Έτσι, σ' ένα νέφος, όπου δεν υπάρχουν αρχικά αρκετοί παγοπυρήνες, για να ξεκινήσει η διαδικασία σχηματισμού υετού, προκαλείται παγοποίηση (List, 1979; Καρακώστας, 2007).

1.2 Γενικά περί ορογραφικών νεφών

Τα ορογραφικά νέφη δημιουργούνται και αναπτύσσονται όταν υγρές αέριες μάζες αναγκάζονται λόγω του ανάγλυφου του εδάφους να ανυψωθούν, π.χ. στις κορυφογραμμές βουνών. Οι υγρές αέριες μάζες που κινούνται προς τα επάνω, σε μεγαλύτερα υψόμετρα, ψύχονται και οι υδρατμοί των αερίων μαζών συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας τα ορογραφικά νέφη. Σχετικά συχνά, οι αρχικά υγρές μάζες δίνουν υετό, κυρίως στην προσήνεμη πλευρά. Γενικά, τα ορογραφικά νέφη κινούνται σχετικά αργά, αν και οι επικρατούντες σ' αυτά άνεμοι μπορεί να είναι αρκετά ισχυροί (Huschke, 1959; Καρακώστας, 2007).

Η εφαρμογή ενός προγράμματος αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη συνδυάζει την εφαρμογή της θεωρητικής έρευνας στην πράξη, καθώς και την τεχνολογική υποδομή. Παράλληλα, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι αρκετά δύσκολη

καθώς η διαδικασία δημιουργίας υετού εξαρτάται από παράγοντες που επηρεάζουν τα φυσικά, δυναμικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των νεφών, καθώς και στο γεγονός ότι δεν έχουμε μια πλήρη και ολοκληρωμένη εικόνα για τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται μέσα στο ορογραφικό νέφος.

Ένα πρόγραμμα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη έχει ως στόχο την τροποποίηση των δυναμικών και μικροφυσικών νεφικών χαρακτηριστικών με την παρέμβαση του ανθρώπου, έτσι ώστε το αποτέλεσμα που θα προκύψει να είναι διαφορετικό από το αναμενόμενο που θα προέκυπτε μέσω των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο ορογραφικό νέφος αυτό καθ' εαυτό. Για να γίνει δυνατή η οποιαδήποτε τροποποίηση στη δομή των ορογραφικών νεφών απαιτείται η καλύτερη δυνατή γνώση της μικροφυσικής τους, καθώς και των διαφόρων διαδικασιών που πραγματοποιούνται μέσα σ' αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μετρήσεων διαφόρων παραμέτρων που δίνουν μια εικόνα των συνθηκών που επικρατούν, τόσο στην ατμόσφαιρα, όσο και στο εσωτερικό των νεφών. Πλην του στόχου καταπολέμησης της λειψυδρίας, το πρόγραμμα θα πρέπει να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον ανάλογα με τις επικρατούσες ανάγκες σε νερό. Όμως, η επίδραση των διαφόρων παραγόντων στα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών, η αδυναμία για επανάληψη της εφαρμογής και η χρήση των μαθηματικών πιθανοτήτων, τόσο στην πρόγνωση, όσο και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, δυσκολεύουν σημαντικά την έρευνα και κυρίως την εφαρμογή προγραμμάτων στην τροποποίηση του καιρού.

Τα πρώτα και περισσότερα προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη έχουν συνδεθεί με σπορά των νεφών που γίνεται από γεννήτριες εδάφους. Άλλοι τρόποι σποράς βεβαίως είναι η χρήση ειδικά εξοπλισμένων αεροσκαφών, τα οποία μπορούν να κάνουν σπορά, είτε χρησιμοποιώντας ξηρό πάγο (CO_2 σε -40°C), ή παγοπυρήνων AgI , υπό μορφή πυροτεχνικών γεννητριών.

Τα πρώτα προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την αποφυγή επιπλέον άρδευσης και για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία σποράς πραγματοποιούνταν σε ορεινές περιοχές, κυρίως κατά τη διάρκεια των ψυχρών μηνών, για να παραχθεί νερό για χρήση κατά τους επόμενους μήνες, όταν η ανάγκη για υγρασία είναι μεγαλύτερη. Λίγα μόνο προγράμματα χρησιμοποιήθηκαν για άμεσα αποτελέσματα, όπως αύξηση του πάχους του χιονιού σε χιονοδρομικά κέντρα.

Τα πρώτα προγράμματα αύξησης υετού σχεδιάστηκαν με σκοπό να αυξήσουν τον υετό από τις ορογραφικές καταιγίδες. Αυτά εφαρμόστηκαν κυρίως στις δυτικές Η.Π.Α.

και έχουν δώσει ενδείξεις αύξησης νετού στη περιοχή εφαρμογής, της τάξεως 10-15%, ή και ακόμη μεγαλύτερα (Vartiman and Moore, 1978).

1.3 Βασικές αρχές της Τροποποίησης του Καιρού

Η τροποποίηση του καιρού αποτελεί ένα κλάδο της μετεωρολογίας, του οποίου η φύση είναι τέτοια, ώστε να θεωρείται πρόκληση από όσους έχουν ασχοληθεί με αυτόν. Η ανάγκη του ανθρώπου να ελέγξει τα καιρικά φαινόμενα έχει τις ρίζες της αιώνες πριν. Όμως, τέθηκε σε επιστημονική βάση το 1946. Ο Vincent J. Schaefer, μέλος της ομάδας του Irving Langmuir στην General Electric Research Laboratories (GERL), θεωρείται ο επιστήμονας που ανήγαγε την τροποποίηση του καιρού σε επιστημονικό επίπεδο. Η πρώτη αναφορά σε σπορά ορογραφικών νεφών με πυρήνες παγοποίησης έγινε από τους Kraus και Squires το 1947 (Mason, 1971).

Έκτοτε πραγματοποιήθηκε πλήθος πειραμάτων, των οποίων τα αποτελέσματα έτυχαν πλήρους αποδοχής, αλλά και αμφισβήτησης, με αποτέλεσμα ο κλάδος να αποκτήσει ένθερμους υποστηρικτές, αλλά και πολέμιους. Η ιδιαιτερότητα της τροποποίησης καιρού οφείλεται στο συνδυασμό που απαιτεί ο κλάδος αυτός, τόσο της θεωρητικής και ερευνητικής μελέτης, όσο και της επιχειρησιακής υποδομής και άσκησης, ενώ ταυτόχρονα καθίσταται δύσκολη η αξιολόγηση των προσπαθειών. Η πολυπλοκότητα της κατανόησης και εκτίμησης των αποτελεσμάτων οφείλεται στο πλήθος των παραγόντων που υπεισέρχονται στη μελέτη της φυσικής των νεφών, της θερμοδυναμικής, της δυναμικής, της συνοπτικής και τόσων άλλων κλάδων της επιστήμης της Μετεωρολογίας, καθώς και της μη ολοκληρωμένης γνώσης όλων των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα μέσα στα νέφη. Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις των διαφόρων παραγόντων, η αδυναμία της απόλυτης επανάληψης του πειράματος και η εισαγωγή της έννοιας της πιθανότητας στην πρόγνωση και στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων, δυσκολεύουν τέτοιου είδους προσπάθειες. Σημειώνεται τέλος, ότι η μεγάλη μεταβλητότητα που παρουσιάζει η παράμετρος της πάσης φύσεως κατακρημνισμάτων, εισάγει περαιτέρω ασάφειες κατά την αξιολόγηση τέτοιων πειραμάτων.

Στόχος της τροποποίησης του καιρού είναι η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών ενός νέφους μετά από ανθρώπινη παρέμβαση, για τη λήψη αποτελέσματος, διαφορετικού από αυτό που θα σημειωνόταν μόνο με φυσικές

διαδικασίες. Μέχρι σήμερα οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στους παρακάτω τομείς: στην αύξηση βροχόπτωσης, στην αύξηση χιονόπτωσης, στη διάλυση ομίχλης και στη μείωση χαλαζοπτώσεων. Για να συντελεστούν όμως τέτοιες μεταβολές στη δομή των νεφών, είναι απαραίτητη, η όσο το δυνατόν καλύτερη γνώση των διαδικασιών που συμβαίνουν εντός των νεφών, των ευνοϊκών -για την κάθε περίπτωση- συνθηκών και ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να γίνει η παρέμβαση του ανθρώπου για την επίτευξη του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος.

Για την καλύτερη κατανόηση και πρόγνωση των δυναμικών, θερμοδυναμικών και μικροφυσικών διαδικασιών χρησιμοποιούνται μετρήσεις διαφόρων παραμέτρων που απεικονίζουν την εικόνα, τόσο της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας, όσο και των νεφών. Δυστυχώς, οι διαθέσιμες πληροφορίες δεν είναι πάντοτε επαρκείς και ακόμα λιγότερες κρίνονται οι ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις. Είναι όμως γεγονός, ότι με την πάροδο των χρόνων, η λήψη τέτοιων πληροφοριών έχει βελτιωθεί σημαντικά και αναμένεται περαιτέρω μελλοντική εξέλιξη.

Η αύξηση της βροχόπτωσης βασίζεται στην παρατήρηση, ότι, σε ένα νέφος που σχηματίζεται, δημιουργεί ή όχι βροχή και τέλος διαλύεται, δεν χρησιμοποιείται ποτέ όλη η διαθέσιμη ποσότητα υδρατμών. Επομένως, αν με κάποιο τρόπο δεσμευτεί αυτή η ποσότητα, τότε το νέφος δυνητικά μπορεί να καταστεί βροχοφόρο, ή να αυξηθεί το ποσό βροχής που θα φτάσει στο έδαφος.

Ανεξαρτήτως των μεθόδων που εφαρμόζονται σε ένα πρόγραμμα αύξησης βροχόπτωσης, αυτό που επιχειρείται πάντοτε είναι η τροποποίηση της συγκέντρωσης και του φάσματος του μεγέθους των πυρήνων συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei- CCN) που βρίσκονται μέσα σε ένα νέφος. Η συγκέντρωση πυρήνων συμπύκνωσης συγκεκριμένου μεγέθους είναι καθοριστική για το πλήθος και το είδος των πυρήνων συμπύκνωσης που θα ενεργοποιηθούν και που θα συμμετάσχουν στις διαδικασίες σχηματισμού των νεφοσταγονιδίων. Γενικά φαίνεται ότι η ύπαρξη σχετικά μεγάλων πυρήνων συμπύκνωσης ευνοεί το σχηματισμό μεγαλύτερων νεφοσταγόνων, οι οποίες, αφού ευνοήσουν τη διαδικασία της σύγκρουσης και συνένωσης, εγκαταλείπουν το νέφος, και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να φτάσουν στην επιφάνεια της γης, πριν εξατμιστούν. Αντίθετα, αν κατά το σχηματισμό των νεφοσταγονιδίων ενεργοποιηθούν πολλοί πυρήνες συμπύκνωσης μικρού μεγέθους, τότε οι σταγόνες που θα εγκαταλείψουν το νέφος θα είναι μεν περισσότερες, αλλά και μικρότερες, με μεγάλη πιθανότητα και δυνητικότητα να εξατμιστούν κατά την καθοδική τους κίνηση. Έτσι, με την έγκαιρη εισαγωγή μεγάλων τεχνητών πυρήνων συμπύκνωσης, συλλαμβάνεται

η διαθέσιμη υγρασία από αυτούς, εμποδίζοντας τους σχετικά περισσότερους και μικρότερους φυσικούς πυρήνες συμπύκνωσης να λάβουν μέρος στη διαδικασία σχηματισμού νετού. Οι τεχνητοί πυρήνες συμπύκνωσης προέρχονται από το υλικό σποράς, το οποίο διοχετεύεται, είτε στη βάση, είτε στην κορυφή των νεφών, με απώτερο στόχο την αύξηση της βροχόπτωσης.

Ως υλικά σποράς χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς διάφορα υγροσκοπικά σωματίδια, κυρίως όμως αλατούχες ενώσεις για την ανάπτυξη νεφοσταγονιδίων μέσω των διαδικασιών σύγκρουσης και συνένωσης (collision – coalescence) του «θερμού νέφους - warm rain» και Ιωδιούχος Άργυρος (AgI) μέσω των διαδικασιών του «ψυχρού νέφους – cold rain (Bergeron – Findeisen)» (Dennis, 1980). Ο AgI, λόγω της κρυσταλλικής του δομής, που μοιάζει με αυτή του πάγου, επικράτησε ως τεχνητός πυρήνας συμπύκνωσης και χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι και σήμερα, κυρίως για ορογραφικά νέφη. Σημειώνεται ότι για να θεωρηθούν αποτελεσματικοί οι πυρήνες συμπύκνωσης που εισάγονται, θα πρέπει να έχουν διάμετρο μερικών δεκάδων μικρομέτρων (μm) για να μπορεί να σχηματιστεί σταγονίδιο διαμέτρου τουλάχιστον ίσης με $38 \mu\text{m}$ (όριο Hocking).

Τα αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει η σπορά είναι, είτε μικροφυσικής, είτε δυναμικής, φύσεως. Κρίνεται ότι έχουν προκληθεί αλλαγές στη μικροφυσική δομή αν συμβαίνουν τα ακόλουθα:

- Σχηματισμός κατακρημνισμάτων. Η αλλαγή της μικροφυσικής δομής φαίνεται με τη βοήθεια του ραντάρ, όταν για ένα νέφος έχει καταγραφεί ανακλώμενο σήμα μετά τη σπορά, ενώ προηγουμένως δεν υπήρχε.
- Αύξηση του αριθμού κυττάρων που μπορούν να επιφέρουν βροχή.
- Αύξηση της διάρκειας βροχόπτωσης.
- Διεύρυνση της προσβαλλόμενης από βροχή περιοχής.
- Αύξηση του ποσού βροχής.

Μερικά από τα δυναμικά αποτελέσματα που μπορεί να επιφέρει η σπορά είναι τα παρακάτω:

- Αύξηση του μεγέθους του νέφους, τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια, διάσταση. Η οριζόντια επέκταση ενδιαφέρει κυρίως όταν οφείλεται σε ανάπτυξη νέου κυττάρου.
- Αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας στο εσωτερικό των κυττάρων που έτυχαν σπορά.

- Ενισχυμένη παράπλευρη διείσδυση αέρα σε ένα μεσαίο επίπεδο του νέφους (mid-level inflow) και ισχυρότερα καθοδικά ρεύματα.
- Μεγάλος αριθμός κυττάρων, που σχηματίζονται, λόγω αυξημένης σύγκλισης στο οριακό στρώμα στη βάση του νέφους (boundary layer flow).
- Αυξημένα ποσά βροχής από ανεξάρτητα τροποποιημένα νέφη.
- Αύξηση της διάρκειας βροχόπτωσης.
- Αύξηση του εμβαδού επιφάνειας που δέχεται τη βροχή από τα τροποποιημένα νέφη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να προκληθούν δυναμικά αποτελέσματα απαραίτητη προϋπόθεση είναι να αλλάξει η μικροφυσική δομή του νέφους. Το αντίθετο δεν ισχύει, για παράδειγμα, αν το ανοδικό ρεύμα εντός του νέφους ενισχυθεί, δεν είναι βέβαιο ότι θα αυξηθεί και το ποσό βροχής. Η εισαγωγή των τεχνητών πυρήνων συμπύκνωσης, έχει ακριβώς αυτό το στόχο, την τροποποίηση δηλαδή των μικροφυσικών και κατ' επέκταση των δυναμικών χαρακτηριστικών του νέφους, και την αύξηση τελικά της βροχόπτωσης.

Στη χώρα μας, η έννοια της τροποποίησης του καιρού χρησιμοποιήθηκε από το Εθνικό Πρόγραμμα Χαλαζικής Προστασίας (Ε.Π.Χ.Π), με σκοπό την καταστολή του χαλαζιού (Karacostas, 1984). Για την επίτευξή του, χρησιμοποιείται η μέθοδος σποράς των νεφών που χαρακτηρίζονται ως καταιγιδόφορα. Ο καθορισμός της ύπαρξης ή μη καταιγιδόφρου δραστηριότητας πραγματοποιείται κάθε ημέρα με τη χρήση του δείκτη CDC (Convective Day Category) (Strong and Wilson, 1983), ο οποίος κυμαίνεται από -3, για ένδειξη απουσίας δραστηριότητας, έως και +5, για περιπτώσεις που αναμένονται ισχυρές χαλαζοπτώσεις με τη διάμετρο των χαλαζοκόκκων να ξεπερνούν τα 5 εκατοστά.

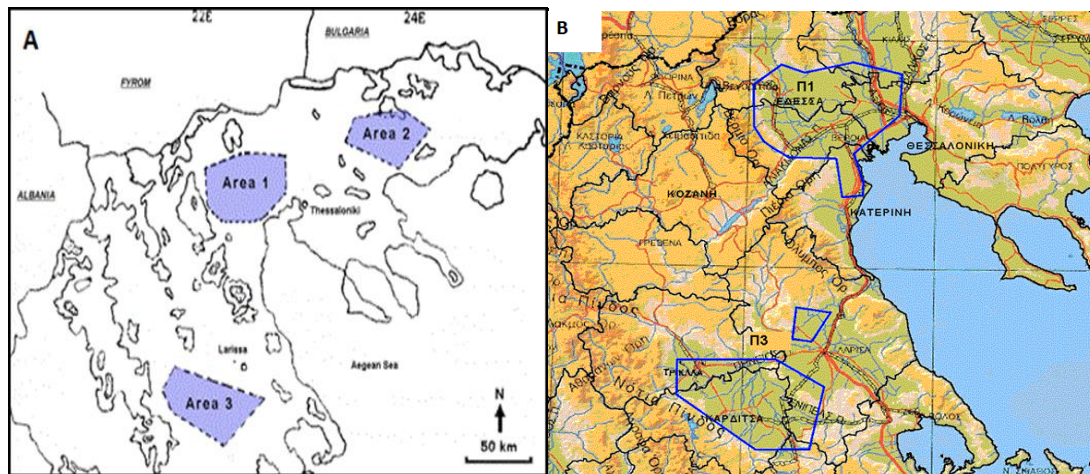
Σκοπός του Προγράμματος αποτελεί η προστασία των αγροτικών περιοχών από το χαλάζι, το οποίο προκαλεί εκτεταμένες ζημιές στις καλλιέργειες. Το πρόγραμμα υλοποιείται στο Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών (ΚΕ.Μ.Ε.), το οποίο βρίσκεται στο αεροδρόμιο "Μακεδονία" στη Θεσσαλονίκη.

Ο αρμόδιος οργανισμός του ΕΛΓΑ αναφέρει ότι η διαδικασία της σποράς ξεκινά έπειτα από την έγκυρη και έγκαιρη πρόγνωση του φαινομένου από έμπειρους μετεωρολόγους, οι οποίοι εκτελούν την επιχείρηση με τη βοήθεια δύο μετεωρολογικών ραντάρ (Huschke, 1959). Η επιχείρηση προϋποθέτει οι μετεωρολόγοι να κατευθύνουν

ειδικά εξοπλισμένα αεροσκάφη εντός των καταιγιδοφόρων νεφών, όπου και γίνεται σπορά με πυρόκαυστα φυσίγγια Ιωδιούχου Αργύρου (AgI).

Λόγω του συχνού φαινομένου των χαλαζοπτώσεων στην Κεντρική Μακεδονία, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο, το ΕΠΧΠ σχεδιάστηκε το 1983 και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1984 (Karacostas, 1984). Το πρόγραμμα εξακολουθεί να εφαρμόζεται με επιτυχία (Karacostas, 2002) μέχρι και σήμερα, έχοντας ως αντικειμενικό σκοπό την προστασία των καλλιεργειών από το χαλάζι.

Από την έναρξη του μέχρι και το 1988 εκτός από την επιχειρησιακή του λειτουργία για την προστασία από τις χαλαζοπτώσεις περίπου 4.000 km², χρησιμοποιήθηκε και για ερευνητικούς σκοπούς. Στο Σχήμα 1.1 (Α) απεικονίζονται οι τρεις περιοχές προστασίας του ΕΠΧΠ των καλλιεργειών. Στην περιοχή της Ημαθίας-Πέλλας (Περιοχή 1) το πρόγραμμα λειτούργησε και ως ερευνητικό, ενώ στις άλλες δύο περιοχές, δηλαδή των Σερρών-Δράμας και Καρδίτσας Τρικάλων (Περιοχές 2 και 3), ως αποκλειστικά επιχειρησιακό. Αργότερα οι περιοχές έγιναν δύο, η μια στην Κεντρική Μακεδονία (Ημαθία-Πέλλα) και η άλλη στη Θεσσαλία, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1 (Β).



Σχήμα 1.1. Οι περιοχές εφαρμογής και προστασίας του ΕΠΧΠ: (Α) από το 1984 έως και το 1988, και (Β) από το 1989 έως και σήμερα.

1.4 Αντικειμενικός σκοπός, σημασία της μελέτης και ανασκόπηση αυτής

1.4.1. Αντικειμενικός σκοπός

Βασικός σκοπός στην εργασία αυτή είναι να μελετηθεί η δυνητικότητα εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης υετού (βροχής ή/και χιονιού) στο Βόρειο Ελλαδικό χώρο, και μάλιστα πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας, πάνω από τον ορεινό όγκο του όρους Βερμίου. Μια τέτοιου είδους δυνατότητα θα αποτελούσε έναν αρκετά σπουδαίο -και ίσως μελλοντικά απαραίτητο- εναλλακτικό τρόπο αύξησης της διαθέσιμης ποσότητας νερού, στις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες λόγω λειψυδρίας.

Η επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού επιχειρείται με τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων και κυρίως με τη χρήση των πολύτιμων δεδομένων του ραντάρ καιρού (C-band) του Φιλύρου, κατά τη διάρκεια ολοκλήρου του έτους (εκτός Ιανουαρίου, λόγω τεχνικών προβλημάτων), για μια περίοδο μελέτης πέντε (5) ετών, από το 2006 έως και 2010.

Μελετώνται τα ορογραφικά νέφη που δημιουργήθηκαν, αναπτύχθηκαν και δομήθηκαν, μέσω μηχανικών -ή/και θερμικών- μηχανισμών, μέτριων ζωνικών ή και έντονων ανέμων, με αέριες μάζες υψηλής ή μέτριας υγρασίας, που προηγούνται ή και έπονται μιας ατμοσφαιρικής διαταραχής της ανώτερης ατμόσφαιρας. Η επικρατούσα ροή του ανέμου κάθετα προς την οροσειρά του Βερμίου, αυξάνει το ρυθμό της μηχανικής ανύψωσης, που με την επικουρική βοήθεια λόγω της θέρμανσης του ορεινού όγκου και της εξαναγκασμένης θερμικής ανωμεταφοράς, συντελούν στην εκτόνωση της αέριας μάζας, στην ψύξη αυτής και τελικά στο σχηματισμό των ορογραφικών νεφών.

Τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών αυτών νεφών παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς σχηματίζονται και κατά τη διάρκεια των ψυχρών, αλλά και των ενδιάμεσων μηνών του έτους. Αυτή η σχεδόν ετήσια παρατήρηση και μελέτη των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών αποτελεί μια πρωτοτυπία, αλλά και συγχρόνως παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον στον τομέα της Τροποποίησης του Καιρού.

Γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού, διαχωρισμού, παρατήρησης και φυσικής σημασίας και σχέσης των χαρακτηριστικών των ορογραφικών και μη ορογραφικών (γειτονικών) νεφών, καθώς και σύγκριση αυτών, με την έννοια της κατηγοριοποίησης στα κινηματικά (ταχύτητα κίνησης, χρόνος παραμονής, κλπ), δυναμικά

(ανακλαστικότητα, ύψος, μάζα, όγκος, κλπ), θερμοδυναμικά (υγρασία, θερμοκρασία κορυφής, κλπ), μικροφυσικά (υετίσιμο νερό, πυρήνες, κλπ) και χρονικά (ώρα εμφάνισης, χρονική κατανομή, κλπ) κριτήρια και παραμέτρους.

1.4.2. Σημασία της μελέτης

Κάθε μελέτη που αποβλέπει στη διαδικασία εφαρμογής θεωρητικών γνώσεων στην πράξη, δε μπορεί παρά να είναι σημαντική. Πόσο μάλλον, όταν η δυνητικότητα εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης υετού σε μια περιοχή όπως αυτή της Κεντρικής Μακεδονίας, μπορεί να επηρεάσει τη ζωή και την ευημερία των ανθρώπων και κατ' επέκταση της οικονομίας της χώρας.

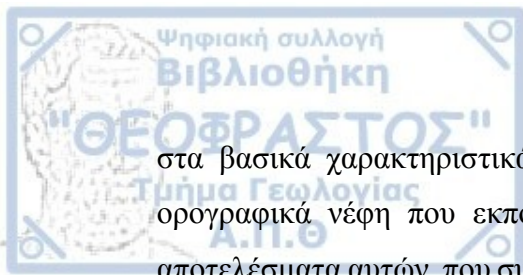
Η περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας χαρακτηρίζεται από δυναμικές καλλιέργειες (οπωροφόρα δέντρα, σιτηρά, καπνά, λαχανικά, κ.ά.), που αποτελούν τη βασική και μοναδική πηγή βιοπορισμού για ένα σημαντικό μέρος των κατοίκων της περιοχής. Επιπλέον, τα αντίστοιχα αγροτικά προϊόντα δεν καλύπτουν μόνο τις ανάγκες της περιοχής, αλλά διακινούνται στις αγορές άλλων περιοχών της Ελλάδας, και σε αρκετές περιπτώσεις και του εξωτερικού, με αποτέλεσμα οι καλλιέργειες αυτές να είναι σημαντικές, τόσο για την τοπική, όσο και για την εθνική οικονομία.

Επομένως, η δυνητικότητα εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη θα μπορούσε, επικουρικά να μετριάσει το πρόβλημα της λειψυδρίας, το οποίο φαίνεται να γίνεται εντονότερο με την κλιματική μεταβολή, και να επιδράσει θετικά στην ψυχολογία του αγρότη, συμβάλλοντας στην αναβάθμιση της γεωργίας και αποφέροντας σημαντικά οικονομικά οφέλη σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

1.4.3. Ανασκόπηση της μελέτης

Για μια ολοκληρωμένη θεώρηση και αντιμετώπιση του σύνθετου αυτού θέματος ακολουθείται μια πορεία προσπάθειας κατανόησης του θεωρητικού αντικειμένου, μέσου των εφαρμοσμένων προγραμμάτων αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη, διαχρονικά, ανά τον κόσμο.

Η διαδικασία αυτή, για την καλύτερη παρουσίασή της, περιγράφεται τμηματικά σε πέντε κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά σε κάποια ιστορικά στοιχεία της Τροποποίησης του Καιρού, στις στοιχειώδεις έννοιες σχεδιασμού προγραμμάτων αύξησης υετού, ως προς την τεκμηριωμένη σωστή επιλογή των περιοχών εφαρμογής και χρονικών περιόδων διάρκειας αυτών. Έμφαση δίδεται



στα βασικά χαρακτηριστικά των ερευνητικών προγραμμάτων αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη που εκπονήθηκαν διαχρονικά, ανά τον κόσμο, καθώς και στα αποτελέσματα αυτών, που συνέθεσαν τις συμπερασματικές έννοιες των εφαρμοσμένων ερευνητικών προγραμμάτων στα ορογραφικά νέφη.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και τα χαρακτηριστικά των νεφών που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του ραντάρ καιρού, η μεθοδολογία καταγραφής, επεξεργασίας και απεικόνισης των δεδομένων του ραντάρ, δηλαδή το σύστημα TITAN (Thunderstorm Identification, Analysis and Nowcasting), καθώς και τα χαρακτηριστικά εκείνων των ορογραφικών νεφών που μελετώνται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων μελέτης. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών που εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν πάνω από την ορεινή περιοχή του Βερμίου, υποδηλώνοντας εμμέσως τη δυνητικότητα εφαρμογής προγράμματος αύξησης υετού. Τα χαρακτηριστικά αυτά των ορογραφικών νεφών συγκρίνονται με τα αντίστοιχα γειτονικών και μη ορογραφικών νεφών, πιστοποιώντας την παραπάνω δυνητικότητα.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα επιμέρους και τα γενικά συμπεράσματα, τεκμαίροντας τη δυνητικότητα εφαρμογής προγράμματος αύξησης υετού στην περιοχή της Βόρειας Ελλάδας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ

2.1 Γενικά ιστορικά στοιχεία

Η τροποποίηση του καιρού υπήρξε το ανθρώπινο όνειρο μιας και η παρουσία του ανθρώπου στον πλανήτη ήταν και είναι άμεσα εξαρτημένη από τις «διαθέσεις» του. Από τους προϊστορικούς χρόνους, το δέος μπροστά στα καιρικά φαινόμενα οδήγησε τον άνθρωπο σε τελετουργικά εξευμενισμού για τον «κακό καιρό». Οι μαγικές και θρησκευτικές πρακτικές για να «ελεγχθεί» ο καιρός βεβαιώνονται σε πολλούς πολιτισμούς. Οι χοροί βροχής (με στοιχεία αποκρυφισμού) από αυτόχθονες Αμερικανούς είναι θρυλικοί. Τίποτα όμως δεν είναι γνωστό για την αποτελεσματικότητα "των επεμβάσεων" αυτού του είδους! Θυσίες, λιτανείες και άλλα τελετουργικά συμπληρώνουν την εικόνα που πέρα από τα πιστεύω του καθενός, δίνουν τη διάθεση και την επιθυμία του ανθρώπου να μπορεί να αλλάξει, προς όφελος του, τον «καιρό» και κυρίως τον «κακό καιρό». Κοινό στοιχείο όλων των τελετουργικών η καύση και η δημιουργία καπνού, είτε πρόκειται για θυσίες, ή χριστιανικές λιτανείες, τυχαίο άραγε;

Μέχρι το 19ο αιώνα, οι ατμοσφαιρικές επιστήμες ήταν σε παρατεταμένη παιδική ηλικία και η συνολική κατανόηση των ατμοσφαιρικών διαδικασιών δεν ήταν, απλά, διαθέσιμη. Η μετεωρολογία εκείνης της ηλικίας δεν είχε, ούτε τη θεωρία, ούτε τις παρατηρήσεις, ούτε τα όργανα για να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για εφαρμογή στις ανθρώπινες επιδράσεις. Η εφεύρεση των μετεωρολογικών οργάνων και η εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες ήταν το έναυσμα για την κατακόρυφη άνοδό της. Οι καρποί της

επιστημονικής επανάστασης του Newton στη φυσική, άρχιζαν να γίνονται αισθητοί σε όλη την κοινωνία. Η επιστήμη χρησιμοποιούταν όλο και περισσότερο για να εξυπηρετήσει τις ανθρώπινες ανάγκες και η τεχνολογία που αναπτυσσόταν θα μπορούσε να ασκήσει μεγάλες επιδράσεις στο φυσικό κόσμο. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που επέτρεψε τη λύση των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη βασική, τη συμβατική φυσική της ατμόσφαιρας, έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρηθούν, να υπολογιστούν και να προβλεφθούν οι κινήσεις και οι ατμοσφαιρικές διαδικασίες.

Τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα είναι τα «εκ των όντων ουκ άνευ» στη διαδικασία σχηματισμού υετού. Κάθε μόριο υδρατμού συμπυκνώνεται, όταν η αέρια μάζα φθάσει σε κατάσταση υπερκορεσμού, πάνω σε ένα πυρήνα συμπύκνωσης, που αυτός μπορεί να είναι από έναν απλό κόκκο σκόνης, μέχρι κόκκους διαφόρων αλατούχων ενώσεων, ή πυρήνες Ιωδιούχου Αργύρου (AgI). Η επάρκεια και η ποιότητα (μέγεθος, δομή και σύσταση) των πυρήνων αυτών αποτελούν, υπό συνθήκες, το κλειδί ενεργοποίησης του μηχανισμού σχηματισμού υετού.

Η διαταραχή του υδρολογικού κύκλου στο παρεδάφιο τόξο, οφειλόμενη στην υπερκατανάλωση του νερού λόγω αύξησης του πληθυσμού και αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών, η μείωση των υπογείων αποθεμάτων λόγω εντατικοποίησης των καλλιεργειών (διπλές και τριπλές καλλιέργειες μέσα σε ένα έτος), μοιάζει με την εξάντληση του καταθετικού λογαριασμού μας σε φυσικούς πόρους. Η διαφανόμενη κλιματική μεταβολή, με βροχές που για την ώρα απλά εμφανίζονται πιο άναρχες, με μεγαλύτερες εντάσεις, που αγγίζουν τα άκρα, ουσιαστικά βροχές απορροής και εν ολίγοις «άχρηστες», μας ωθούν στην ανάγκη προγραμματισμού από τώρα -αν δεν είναι ήδη αργά- στην αποταμίευση νερού και επανεξαγωγή από τα συρτάρια των επιστημονικών μελετών για τη δυνητικότητα σχεδιασμού και εφαρμογής προγραμμάτων αύξησης υετού.

Η δυνατότητα αύξησης του φυσικά εμφανιζόμενου υετού μέσω της σποράς νεφών χρονολογείται από το τέλος της δεκαετίας του '40, της εποχής του «πρόωρου ενθουσιασμού»! Μερικές τυχαίες ανακαλύψεις και πειράματα, που πραγματοποιούνται πρώτα στο εργαστήριο και μετά στην ατμόσφαιρα, οδηγούν σε εφαρμογή ερευνητικών και επιχειρησιακών προγραμμάτων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50. Σπορά ορογραφικών νεφών κατά τη διάρκεια του χειμώνα έχει γίνει στην άνω και κάτω λεκάνη ποταμών του Κολοράντο από τη δεκαετία του '60, σε επιχειρησιακή και

ερευνητική βάση. Από μία άποψη, η δυνατότητα της σποράς των νεφών υπερεκτιμήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Πρόσθετες έρευνες και διαδικασίες που αρχίζουν στη δεκαετία του '60 πραγματοποιήθηκαν με ρεαλιστικότερες προσδοκίες και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Κάποιος σκεπτικισμός παραμένει σχετικά με την αποτελεσματικότητα της σποράς νεφών, αν και στους επιστημονικούς κύκλους που ασχολούνται σοβαρά με την τροποποίηση του καιρού, είναι κοινά αποδεκτό, ότι η αύξηση νετού το χειμώνα, στις ορεινές περιοχές, από ορογραφικά νέφη, μπορεί να είναι τουλάχιστον της τάξεως του 10%-20%. Η αναμενόμενη αυτή αύξηση, όχι πάντοτε απόλυτα τεκμηριωμένη εξ αιτίας του μικρού ποσοστού, που στο ευρύ και μη ειδικό κοινό δεν φαντάζει ως τίποτα το ιδιαίτερο, μπορεί μελλοντικά να είναι αρκετά ελκυστική, συνυπολογιζόμενης και της διαφαινόμενης κλιματικής μεταβολής.

2.2 Γενικά στοιχεία σχεδιασμού προγράμματος αύξησης νετού ορογραφικών νεφών

Ο σχεδιασμός ενός προγράμματος αύξησης νετού ορογραφικών νεφών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της εφαρμογής αυτού. Πρέπει να ληφθούν αποφάσεις προκειμένου το πρόγραμμα να αποδώσει στο μέγιστο δυνατό βαθμό και να εξασφαλιστούν ευνοϊκές συνθήκες αντικειμενικής αξιολόγησης. Τα στάδια σχεδιασμού ενός προγράμματος αύξησης νετού ορογραφικών νεφών είναι τα ακόλουθα:

1. Ανάλυση, επισκόπηση και αξιολόγηση των κλιματολογικών χαρακτηριστικών και των συνοπτικών καταστάσεων που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος.
2. Προσδιορισμός και πολύ καλή γνώση των χαρακτηριστικών του είδους και τύπου των νεφών που εν δυνάμει θα τροποποιηθούν.
3. Ανάπτυξη και υιοθέτηση των κριτηρίων σποράς.
4. Προσδιορισμός της μεθοδολογίας σποράς: α) υλικό σποράς, β) μέθοδο διάχυσης του υλικού σποράς στο νέφος (αεροσκάφος, γεννήτριες εδάφους, κ.α.), γ) επίπεδο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η σπορά στο νέφος, καθώς και δ) ρυθμό σποράς και διάρκεια σποράς.
5. Τεχνολογικός εξοπλισμός (κέντρο επιχειρήσεων, μετεωρολογικός εξοπλισμός, ειδικά εξοπλισμένα αεροσκάφη σποράς και έρευνας, γεννήτριες εδάφους,

μετεωρολογικό ραντάρ, επιστημονικό προσωπικό (μετεωρολόγοι, πληρώματα αεροσκαφών, τεχνικοί, κ.ά)).

6. Απαραίτητες, ακριβείς και επί τόπου (*in-situ*) μετεωρολογικές μετρήσεις (από ραντάρ καιρού, αεροσκάφη, δορυφόρους, κ.ά).

Από τα παραπάνω, καθίσταται φανερό ότι το δεύτερο στάδιο είναι το απολύτως απαραίτητο, διότι χωρίς «κατάλληλα» για σπορά νέφη, κανένα πρόγραμμα τροποποίησης του καιρού δεν θα μπορούσε να έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, έμφασης δίδεται στα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών, τα οποία και μελετώνται στη διατριβή αυτή.

2.3 Γενικά στοιχεία επιλογής περιοχής και περιόδου μελέτης ερευνητικών προγραμμάτων αύξησης υετού ορογραφικών νεφών

Η επιλογή της περιοχής εφαρμογής ενός προγράμματος αύξησης βροχόπτωσης αποτελεί ίσως μία από τις κρισιμότερες αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν, αφού η προτεινόμενη περιοχή θα πρέπει να ικανοποιεί, τόσο τις μετεωρολογικές απαιτήσεις, όσο και τους οικονομικούς περιορισμούς, κατά το μέγιστο δυνατό. Συνεπώς θα πρέπει:

- Η περιοχή να είναι, από μετεωρολογικής άποψης, γνωστή. Αυτό συνεπάγεται ένα προϋπάρχον δίκτυο σταθμών, από τους οποίους να είναι συστηματικά διαθέσιμα, όσο το δυνατόν περισσότερα επίγεια δεδομένα, αλλά και δεδομένα της ανώτερης ατμόσφαιρας.
- Να υφίσταται πρόβλημα λειψυδρίας και ξηρασίας. Στην περίπτωση αυτή η ανάγκη για οποιαδήποτε προσπάθεια αύξησης του διαθέσιμου νερού είναι αναμφισβήτητα επιτακτική. Ακόμα όμως κι αν κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται, η ήδη αυξημένη κατανάλωση νερού αποτελεί επαρκές κίνητρο για την προσπάθεια αύξησής του.
- Να ικανοποιούνται οι ευνοϊκές συνθήκες για σπορά. Κατ' επέκταση απαιτείται αυξημένη συχνότητα εμφάνισης των ζητούμενων μετεωρολογικών συνθηκών (δυναμικών, θερμοδυναμικών και συνοπτικών), καθώς και ευνοϊκή μορφολογία εδάφους.
- Να υπάρχουν διαθέσιμες υδροσυλλογές, προς αποφυγή πρόκλησης ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων, ή απορροής νερού.

- Να είναι μια αγροτική περιοχή. Με την επιλογή μιας αγροτικής περιοχής ως ζώνη εφαρμογής, σημαντικές ποσότητες ύδατος, που αναπόφευκτα θα απέρρεαν, θα αξιοποιούνται άμεσα και θα εξοικονομείται νερό.
- Να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στην περιοχή. Η προϋπόθεση αυτή είναι απαραίτητη για δύο κυρίως λόγους. Το αεροπλάνο που θα συμμετάσχει στην επιχείρηση σποράς θα πρέπει να μεταβεί από τη θέση ετοιμότητας στο χώρο σποράς στο συντομότερο χρονικό διάστημα. Η θέση ετοιμότητάς του δεν μπορεί να είναι άλλη από το πλησιέστερο αεροδρόμιο. Ο δεύτερος λόγος αναφέρεται στον εξοπλισμό που θα τοποθετηθεί και θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επιχείρησης. Ο εξοπλισμός αυτός απαιτεί συχνό έλεγχο και ανανέωση και επομένως, η εύκολη πρόσβαση στην περιοχή θα διευκολύνει το έργο.
- Τέλος, τυχόν προϋπάρχον εγκατεστημένος εξοπλισμός, κέντρο επιχειρήσεων και έμπειρο προσωπικό στην περιοχή, έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του προϋπολογισμού ενός προγράμματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες, κριτήρια, περιορισμούς και προϋποθέσεις, μπορεί να ειπωθεί ότι, για τις περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας, και εν γένει της Βόρειας Ελλάδας, θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένα πρόγραμμα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη. Στις περιοχές αυτές επικρατούν ημίξηρες κλιματικές συνθήκες (Φλόκας 1997), ενώ η φυσική ροή του νερού, η αποθήκευση νερού στο χώμα, καθώς και οι τεχνητές υδροσυλλογές δε μπορούν να ικανοποιήσουν πλήρως τις ανάγκες της περιοχής σε νερό. Σημειώνεται επίσης μια αυξητική τάση των αναγκών της περιοχής σε νερό, η οποία συνδέεται με την αύξηση του πληθυσμού, τις αρδευτικές απαιτήσεις των σύγχρονων καλλιεργειών της περιοχής, τις οικιακές ανάγκες, την ανάπτυξη της βιομηχανίας, το πρόβλημα της ποιότητας του νερού, του σχεδιασμού αυξημένου πλήθους προγραμμάτων άρδευσης, καθώς και των διακυβερνητικών συγκρούσεων -όσον αφορά τα δικαιώματα- επί του συνολικού διαθέσιμου ύδατος.

Γενικά, μπορεί να ειπωθεί, ότι, ακόμα και με τον πιο πλήρη, ενθαρρυντικό ή και συντηρητικό σχεδιασμό, και τις πιο σύγχρονες τεχνικές διαχείρισης του νερού, η φυσική πηγή νερού δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις σημερινές απαιτήσεις της περιοχής. Η τροποποίηση του καιρού αποτελεί μια συμπληρωματική διαδικασία παροχής επιπλέον νερού, ίσως τη μοναδική σήμερα στο χώρο ενδιαφέροντος, τόσο για

2.4 Προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη

Πολλά προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη έχουν σχεδιαστεί και πραγματοποιηθεί διεθνώς. Τα προγράμματα αυτά σχεδιάστηκαν με στόχο να αυξήσουν τον υετό από τις ορογραφικές καταιγίδες. Πράγματι, τα περισσότερα από αυτά και κυρίως αυτά που σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν στις δυτικές Η.Π.Α., έχουν δώσει ενδείξεις αύξησης υετού στη περιοχή εφαρμογής, μεγέθους 10-20%, σε σχέση με τον υετό που θα εμφανιζόταν φυσιολογικά.

Στα τέλη του 1940, οι Schaefer και Vonnegut μετά από πειράματα ανακάλυψαν ότι με την προσθήκη ξηρού πάγου, ή AgI, στα νέφη ενεργοποιείται η διαδικασία μετατροπής του υπέρψυχρου νερού του νέφους σε πάγο (Καρακώστας, 2007). Μετά την ανακάλυψη αυτή, άρχισαν τα πρώτα πειράματα τροποποίησης του καιρού. Έμφασης δόθηκε στα ορογραφικά νέφη, κυρίως λόγω του μεγαλύτερου χρόνου ζωής αυτών, και επομένως της δυνητικότητας της επέμβασης από επιστημονικής πλευράς, καθώς και της τυχαίας ύπαρξης φυσικών ταμιευτήρων στις ορεινές περιοχές.

Το πρόγραμμα Cirrus ξεκίνησε το 1947. Μέσω της εφαρμογής του προγράμματος αυτού, εμμέσως πραγματοποιούνταν σπορά σε ορογραφικά και στρατόμορφα νέφη, τα αποτελέσματα του οποίου ήταν αρκετά ενθαρρυντικά για την εποχή εκείνη.

Οι Bergeron και Ludlam υπέθεσαν ότι τα ορογραφικά νέφη με σπορά κατάλληλου υλικού μπορούν να τροποποιηθούν με σκοπό την αύξηση του υετού. Με βάση αυτή την υπόθεση σχεδιάστηκαν τα προγράμματα Climax I και Climax II τη δεκαετία 1960 από το Lewis Grant και τους συνεργάτες του για την περιοχή των Βραχωδών Ορέων στην Πολιτεία του Colorado των ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων Climax έδειξαν ότι όταν η θερμοκρασία στο επίπεδο των 500 hPa είναι μεγαλύτερη (θερμότερη) από -21 °C, η ποσότητα του υετού των ορογραφικών νεφών μπορεί να αυξηθεί (Rauber et al., 1986).

Στο Climax του Κολοράντο εφαρμόστηκαν δύο τυχαιοποιημένα προγράμματα, το Climax I και το Climax II τα οποία διήρκησαν περίπου πέντε χρόνια, το καθένα: Climax I (1960-1965) και Climax II (1965-70). Τα πειράματα αυτά θεωρήθηκαν αρχικά υψηλής αξιοπιστίας. Μία από τις αναλύσεις των δεδομένων του Climax I υπολόγισε τη

θερμοκρασία στα 500 hPa, που συνήθως βρίσκεται η κορυφή του νέφους των χειμερινών ορογραφικών νεφών του κεντρικού Κολοράντο (Grant and Mielke, 1967).

Τα αποτελέσματα του προγράμματος υποστήριξαν ότι η σπορά του AgI με γεννήτριες εδάφους, είναι πιθανόν να αυξήσουν τις χιονοπτώσεις σε περίπτωση που τα 500 hPa βρίσκονται σε θερμοκρασία -21°C και θερμότερες.

Η έρευνα περιλάμβανε τυχαιοποιημένα πειράματα σποράς, χρησιμοποιώντας γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI), και παράλληλες μελέτες των φυσικών χαρακτηριστικών των νεφών. Κατά το Climax I διαπιστώθηκε μια θετική αύξηση της βροχόπτωσης κατά 6%, ενώ κατά το Climax II η αύξηση ήταν περίπου 18%, συμπεριλαμβανομένης και της πιθανής φυσικής μεταβλητότητας. Τα ποσοστά επιτυχίας είχαν αποδεδειγμένα φθάσει στα 25%, όταν στα προς σπορά ορογραφικά συστήματα επικρατούσαν υψηλότερες θερμοκρασίες των ορογραφικών νεφών (η θερμοκρασία στα 500 hPa να είναι θερμότερη των -20°C), σύμφωνα με τους: Mielke et al. (1971) και Mielke et al., (1981). Βέβαια, κατά καιρούς, διατυπώθηκαν και αρκετές αντιδράσεις στα παραπάνω. Έτσι, οι μετέπειτα αναλύσεις του Climax I και Climax II, που εκπονήθηκαν από τους Rangno και Hobbs (1987, 1993) έδωσαν μεν χαμηλότερα ποσοστά επιτυχίας, παρόλα αυτά όμως, θετικά.

Μία επιπρόσθετη έρευνα στα αποτελέσματα του προγράμματος Climax στην υπήνεμη πλευρά (down wind) της περιοχής εφαρμογής της σποράς και ενδιαφέροντος, απέδειξε ότι ένα μεγάλο μέρος της Πολιτείας του Κολοράντο παρουσίασε κάποιες θετικές ανωμαλίες νετού τις ημέρες σποράς του Climax. Ο Mielke (1979) επιχείρησε να αναλύσει τα δεδομένα της προσήνεμης πλευράς (up wind) της περιοχής εφαρμογής της σποράς, όπου παρουσιάστηκαν επιτυχή αποτελέσματα σε ημέρες που πνέουν ΒΔ άνεμοι. Τα αποτελέσματα αυτά είναι μικρότερης σημαντικότητας από τα παραπάνω. Σε τελική ανάλυση, αποδείχθηκε ότι οι ημέρες σποράς με νοτιοδυτική ροή ανέμου, παρουσιάζουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα στην περιοχή εφαρμογής από ότι οι ημέρες με βορειοδυτική ροή.

Το Colorado River Basin Pilot Project (CRBPP) ήταν ένα πενταετές πειραματικό πρόγραμμα σποράς ορογραφικών νεφών στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στα βουνά του San Juan του νοτιοδυτικού Colorado, με απώτερο σκοπό να πιστοποιηθούν κατά κάποιο τρόπο οι επιχειρησιακές διαδικασίες που εφαρμόστηκαν στο προηγούμενο πρόγραμμα Climax. Η σπορά, όπως αναμενόταν, πραγματοποιήθηκε με γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI). Από τη στατιστική ανάλυση, που βασίστηκε σε

24-ώρες τιμές βροχόπτωσης προερχόμενες από 71 ημέρες σποράς και 76 ημέρες χωρίς σπορά για μάρτυρα, δεν διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά. Ωστόσο, οι εκ των υστέρων αναλύσεις που βασίζονται σε συντομότερα χρονικά διαστήματα (6-ώρες μετρήσεις βροχόπτωσης), απέδειξαν ότι έντονα θετικά αποτελέσματα αύξησης βροχόπτωσης θα μπορούσαν να επιτευχθούν αν οι κορυφές των ορογραφικών νεφών ήταν πιο θερμές, όπως αυτές κατά την εφαρμογή του προγράμματος Climax (Elliott et al., 1978). Μάλιστα τα αποτελέσματα μιας εκ των υστέρων ανάλυσης (a posteriori) των (Elliott et al., 1978) αποδεικνύουν ότι ένα καλοσχεδιασμένο πρόγραμμα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη θα μπορούσε να προκαλέσει αύξηση του υετού κατά περίπου 10% -12%.

Σύμφωνα με τους Karacostas (1978) και Marwitz (1980), τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις 24-ώρες τιμές βροχόπτωσης, μπορεί να έχουν επηρεαστεί αρνητικά από τις δυσκολίες μεταφοράς, διάχυσης και στόχευσης του υλικού σποράς κατά την επικράτηση συνθηκών ευστάθειας σε περιοχές των ορογραφικών νεφών. Γενικά, πιστεύεται ότι, στο Colorado River Basin Pilot Project (CRBPP) απέτυχαν να παρουσιάσουν οποιαδήποτε αύξηση υετού, λόγω και των πιθανών προγνωστικών λαθών και στις δυσκολίες που εμφανίστηκαν στην εφαρμογή των προγραμμάτων, σύμφωνα με το σχεδιασμό. Επίσης εκτιμήθηκε, ότι μια εμπεριστατωμένη γνώση σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τη δομή των ορογραφικών νεφών θα μπορούσε να παρακάμψει τα παραπάνω προβλήματα και να δώσει και θετικά και καλύτερα αποτελέσματα (Καρακώστας, 2007).

Ένα άλλο τυχαίοποιημένο εξερευνητικό (exploratory) πρόγραμμα αύξησης βροχής έλαβε χώρα στο Bridger Range της νοτιοδυτικής Montana κατά τους χειμερινούς μήνες της περιόδου 1969-72 (Super και Heimbach, 1983). Ο τρόπος σποράς ήταν γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI). Στην περίπτωση αυτή, οι γεννήτριες εδάφους τοποθετήθηκαν σε υψηλότερες περιοχές για να αποφευχθούν οι παγιδεύσεις του υλικού σποράς στα χαμηλότερα ευσταθή στρώματα (Καρακώστας, 2007). Η δειγματοληψία αερομεταφερόμενου αέρα (airborne) και ο εντοπισμός αργύρου στο νερό και στο χιόνι, παρείχαν αποδείξεις της επιτυχούς στόχευσης του υλικού σποράς. Σύμφωνα με τους Super και Heimbach (1983), σε μια εκ των υστέρων στατιστική ανάλυση, που βασίστηκε σε δεδομένα περιοχών ελέγχου και μάρτυρα, έδειξε μία αύξηση κατά περίπου 15%.

Η North American Weather Consultants (NAWC) εκπόνησε μια σειρά προγραμμάτων αύξησης υετού (χιονιού) στην Πολιτεία Utah, από τα μέσα της δεκαετίας του '70 (Griffith et al., 1991; Griffith et al., 1997; Stauffer, 2001). Και στα έργα αυτά χρησιμοποιήθηκαν γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI) που τοποθετήθηκαν και σε πεδινές και σε ορεινές περιοχές. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των μετρήσεων στις περιοχές εφαρμογής και μάρτυρα, συνοψίζονται και κυμαίνονται από 9% έως 21%.

Επίσης, η NAWC εφάρμοσε πρόγραμμα για την άνω λεκάνη απορροής του ποταμού Gunnison που βρίσκεται στο δυτικό και κεντρικό Colorado για τους χειμερινούς μήνες της περιόδου 2002-2005. Οι διαδικασίες σποράς των ορογραφικών νεφών βασίστηκαν σε γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI). Σύμφωνα με τους Griffith et al., (2004) και Griffith et al., (2005), υπολογίσθηκε μια μέση αύξηση του υετού κατά περίπου 12-14%. Παρόμοιο πρόγραμμα εκπονήθηκε από την NAWC στην περιοχή του ποταμού Colorado, στις δυτικές πλαγιές των Βραχωδών Ορέων για τους χειμερινούς μήνες της περιόδου 2002-2004. Σύμφωνα με τους Solak et al., (2003) υπολογίσθηκε μια αύξηση του υετού στην περιοχή εφαρμογής κατά 15 με 16%.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να τονιστεί ότι, μελέτες, τόσο των ορογραφικών νεφών, όσο και των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, έχουν αποδείξει ότι αν οι κορυφές τους είναι ψυχρότερες από -25°C, τότε έχουν επαρκώς μεγάλες συγκεντρώσεις φυσικών παγοπυρήνων και παγοκρυστάλλων, έτσι ώστε, η τυχόν σπορά δεν θα έχει καμία ευεργετική επίδραση στην αύξηση της βροχόπτωσης (Grant and Elliott, 1974; Grant, 1986; Gagin and Neumann, 1981; Gagin et al., 1985).

Επίσης, υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις σύμφωνα με τους: Gagin and Neumann (1981), Grant and Elliott (1974) και Cooper and Lawson (1984), ότι υφίσταται και ένα θερμό όριο θερμοκρασίας, που έχει κυρίως να κάνει με την αποτελεσματικότητα του υλικού σποράς. Αυτό πιστεύεται ότι κυρίως οφείλεται στη χαμηλή απόδοση της δημιουργίας κρυσταλλικών πυρήνων (παγοπυρήνων) του Ιωδιούχου Αργύρου (AgI) σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των -4 με -5 °C, αλλά και στους σχετικά χαμηλούς ρυθμούς αύξησης των παγοκρυστάλλων μέσω της διαδικασίας της εναπόθεσης (ice crystal vapor deposition growth) σε συγκριτικά υψηλές θερμοκρασίες (Καρακώστας, 2007). Έτσι, προκύπτει ένα "παράθυρο θερμοκρασίας", από περίπου -5 °C έως -25 °C, όπου τα νέφη ανταποκρίνονται αρκετά ευνοϊκά σε σπορά με Ιωδιούχο Άργυρο (AgI).

Η πολιτεία του Wyoming, μέσω της Επιτροπής Ανάπτυξης Νερού (Wyoming Water Development Commission), ενέκρινε και εκπόνησε ένα πενταετές πρόγραμμα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη πάνω από τις οροσειρές των Wind River, Medicine Bow και Sierra Madre (Breed et al., 2014; Rasmussen et al., 2018). Το κόστος αυτού του προγράμματος ξεπέρασε τα 8,8 εκατομμύρια δολάρια. Η κύρια συνιστώσα του προγράμματος ήταν η επιστημονική έρευνα, συμπεριλαμβάνοντας τα state-of-the-science αριθμητικά μοντέλα νεφικών καταιγίδων και πρόγνωσης καιρού, μοντέλα σποράς νεφών, μοντέλα διάχυσης και διασποράς του υλικού σποράς, καθώς και οι τεράστιες δυνατότητες στις in-situ παρατηρήσεις και μετρήσεις, μέσω αεροσκαφών έρευνας και αεροσκαφών σποράς, airborne μετεωρολογικών ραντάρ τελευταίας τεχνολογίας, τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε φάσεις αξιολόγησης, για τη δυνητικότητα εκπόνησης ανεξάρτητων αξιολογήσεων της φαινομενικής αποτελεσματικότητας των διαδικασιών και δραστηριοτήτων σποράς των νεφών.

Πολλά ερευνητικά προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη εκπονήθηκαν στις ορεινές περιοχές της California.

Σύμφωνα με τους Elliott and Lang (1967), κάνοντας έλεγχο των αποτελεσμάτων του προγράμματος σποράς ορογραφικών νεφών στην περιοχή του San Joaquin River στη Καλιφόρνια συμπέραναν μια αύξηση της απορροής του ποταμού κατά 8.5%, για μια χρονική περίοδο δεκαπέντε ετών.

Μία σειρά από τυχαιοποιημένα προγράμματα σε ορογραφικά νέφη εκπονήθηκαν στην περιοχή της Santa Barbara της Καλιφόρνιας, τα οποία όμως δεν κατέληξαν σε ουσιαστικά συμπεράσματα λόγω των διαφορετικών πειραματικών διαδικασιών σποράς που υιοθετήθηκαν, αλλά και των παραμέτρων-εκτιμητών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη στατιστική αξιολόγηση, για την εκτίμηση της τυχόν αύξησης της βροχόπτωσης (Καρακώστας, 2007).

Ο Elliott το 1962 παρατήρησε, ότι κάνοντας σπορά σε ορογραφικά νέφη με ενσωματωμένες περιοχές με ανοδικές κινήσεις, αυξάνεται η ποσότητα βροχόπτωσης κατά 50% έως και 100%, δηλαδή έως και διπλασιάζεται. Επίσης οι Dennis and Kriege (1966) απέδειξαν, ότι οι ασταθείς αυτές ενσωματωμένες περιοχές στα ορογραφικά νέφη μπορούν να παρουσιάσουν πολύ αξιόλογες αυξήσεις στο ποσοστό της βροχόπτωσης. Υποστηρίχθηκε μάλιστα ότι οι ενσωματωμένες περιοχές με ανοδικές κινήσεις είναι ικανές να μεταφέρουν τους πυρήνες του AgI από τις γεννήτριες εδάφους

σε υψόμετρο όπου η θερμοκρασία είναι περίπου στους -5°C , με αποτέλεσμα το υπέρψυχρο νερό να μπορεί να μετατραπεί σε graupel ή παγοκρύσταλλο, και να δώσει μια δυναμική υπόσταση (Dynamic seeding) στις διαδικασίες της σποράς (Καρακώστας, 2007) .

Ένα τυχαίοποιημένο πείραμα εφαρμόστηκε στη Santa Barbara County για το χρονικό διάστημα 1966 - 1968. Η σπορά έγινε με πυροτεχνικές γεννήτριες εδάφους και από αεροσκάφη σποράς. Τα αποτελέσματα σποράς συγκρίθηκαν με τα δεδομένα μίας περιοχής όπου δεν εφαρμόστηκε το πρόγραμμα (μάρτυρας). Από το πείραμα προέκυψε ότι το ποσοστό του νετού στις ζώνες των κατακόρυφων ανοδικών κινήσεων μπορεί να αυξηθεί κατά 50 με 100%, με αποτέλεσμα να παρατηρηθούν αυξήσεις στο ποσοστό επιτυχίας έως και 25 με 50 % (Brown et al., 1976), επιβεβαιώνοντας την ευνοϊκή ύπαρξη και αποτελεσματικότητα των ζωνών αυτών των κατακόρυφων ανοδικών κινήσεων.

Το Snow Precipitation Enhancement Research Project (SPERP), είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα διάρκειας έξι (6) ετών σποράς ορογραφικών νεφών στην περιοχή των Snow Mountains των New South Wales στην Αυστραλία. Σκοπός αυτού του προγράμματος ήταν η διερεύνηση της οικονομικής και περιβαλλοντικής σκοπιμότητας της αύξησης βροχής και χιονιού για την κάλυψη των αναγκών σε νερό. Το πρόγραμμα εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών από το 2004 έως το 2009, χρησιμοποιώντας 12 γεννήτριες εδάφους Ιωδιούχου Αργύρου (AgI). Στη συγκεκριμένη περιοχή, για την περίοδο 1955-1960, είχε εφαρμοστεί ένα πρόγραμμα αύξησης βροχής, χρησιμοποιώντας αεροσκάφος σποράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση νετού κατά 19%.

Σύμφωνα με τους Smith et al., (1971) και Smith (1974), στην Tasmania εφαρμόστηκε ένα άλλο ερευνητικό πρόγραμμα, όπου χρησιμοποιήθηκαν περιοχές ελέγχου και μάρτυρα. Αυτό λειτούργησε από το 1964 έως και το 1970. Βρέθηκε ότι για κάθε χρόνο σποράς υπήρξε αύξηση της βροχόπτωσης κατά 15 με 20 % για το φθινόπωρο και το χειμώνα, ενώ δεν παρατηρήθηκαν αυξήσεις κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τα συμπεράσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με αυτά των Αυστραλών ερευνητών.

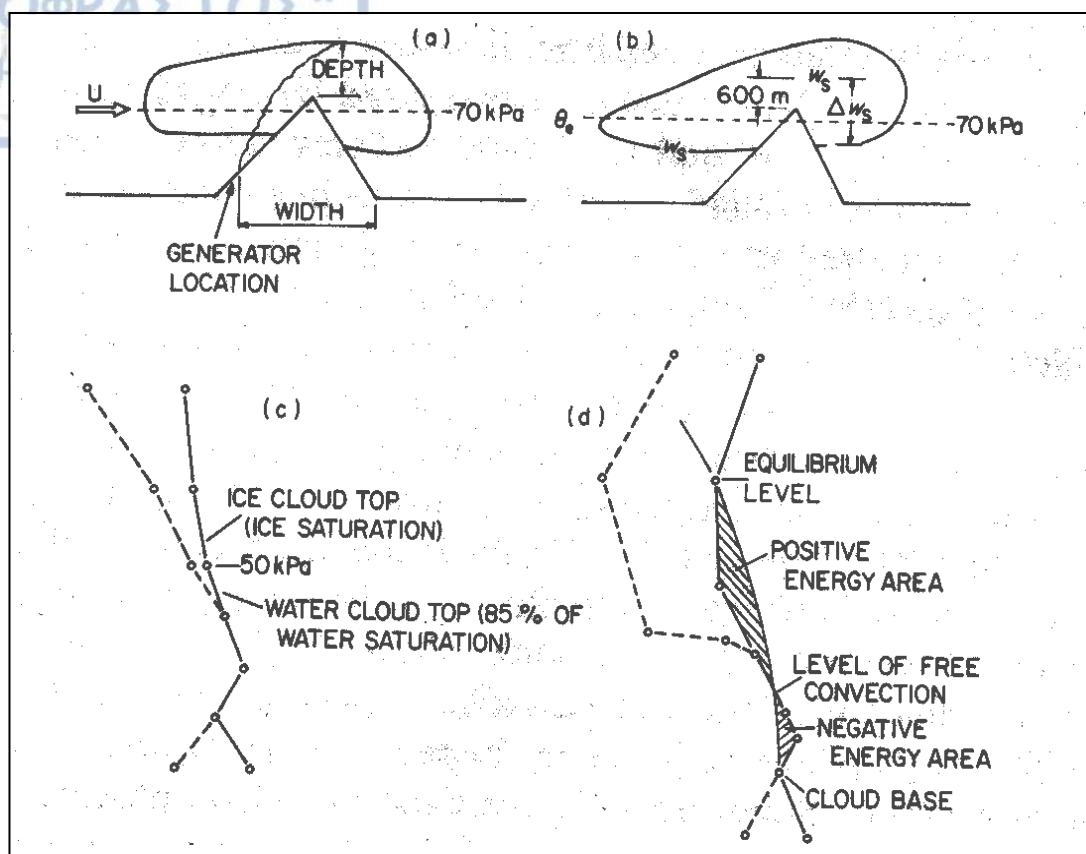
Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα των προγραμμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τόσο από τα ερευνητικά, όσο και από τα επιχειρησιακά προγράμματα, που

διεξήχθησαν στην ευρύτερη περιοχή των Βραχωδών Ορέων, των ορεινών περιοχών της Καλιφόρνιας, καθώς και των αντίστοιχων περιοχών της Αυστραλίας και αλλού, παρουσιάζουν μια επιστημονικά αναμενόμενη και τεκμηριωμένη αύξηση των χειμερινών βροχοπτώσεων από ορογραφικά νέφη της τάξης των 10 με 20%, εφόσον βέβαια τα προγράμματα είναι σωστά σχεδιασμένα και εφαρμόστηκαν σύμφωνα με το σχεδιασμό τους. Αυτό το εύρος αυξήσεων υετού από ορογραφικά χειμερινά νέφη είναι συνεπές, και μέσα στο πλαίσιο που διατυπώνεται από: American Meteorological Society, Weather Modification Association και World Meteorological Organization.

2.5 Γενικές συμπερασματικές έννοιες από την εφαρμογή προγραμμάτων αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη

Από τα παραπάνω αναφερθέντα ερευνητικά προγράμματα αύξησης υετού από ορογραφικά νέφη, καθώς και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από τη σπορά αυτών με Ιωδιούχο Άργυρο (AgI), μπορούν να διατυπωθούν κάποια γενικά μετεωρολογικά χαρακτηριστικά των προς σπορά ορογραφικών νεφών, που δυνητικά θα είχαν θετική συνεισφορά στην αύξηση του υετού. Επομένως, τα ορογραφικά νέφη, φαίνονται να εξαρτώνται από τη ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα κίνησης αυτών, τη θερμοκρασία στην κορυφή του ορογραφικού νέφους, το ύψος του ορεινού όγκου, τις συνθήκες ευστάθειας/αστάθειας και κατακόρυφες κινήσεις στο νέφος, το διαθέσιμο υετίσιμο νερό του νέφους, την υφιστάμενη ποσότητα πυρήνων συμύκνωσης και άλλες συνθήκες.

Οι Vardiman and Moore (1977, 1978) έκαναν μια μεγάλη προσπάθεια και σύγκριναν τα αποτελέσματα πολλών ερευνητικών προγραμμάτων αύξησης υετού από ορογραφικά συστήματα νεφών, με σκοπό να καταλήξουν σε κάποια κοινά συμπεράσματα. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται εποπτικά, σε κατακόρυφη τομή, τα χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζονται με τις διαδικασίες της σποράς των νεφών. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται και κάποια ποσοτικά χαρακτηριστικά των περιπτώσεων μελέτης, συνθηκών ευστάθειας/αστάθειας,



Σχήμα 2.1. Μία κατακόρυφη τομή που φανερώνει τους παράγοντες που επηρεάζονται από τη σπορά των νεφών (Από Vardiman and Moore (1978))

	Region		
	Upwind	Crest	Downwind
Stable storms			
Number cases	140	132	129
S/NS ratio	0.97	1.22	1.12
Significance level	0.11	0.02	0.10
Unstable storms			
Number cases	194	190	187
S/NS ratio	1.38	1.57	1.58
Significance level	0.06	0.01	0.10
Unstable "blow-over" storms			
Number cases	45	45	45
S/NS ratio	0.60	0.38	0.32
Significance level	0.002	0.001	0.002

Πίνακας 2.1. Αποτελέσματα των ερευνητικών προγραμμάτων αύξησης βροχής από ορογραφικά νέφη σύμφωνα με τους Vardiman and Moore (1978).

θέσεις ορογραφικών νεφών ως προς τον ορεινό όγκο και στοιχείων στατιστικής αξιολόγησης. Κάποια επιπρόσθετα στοιχεία που ερευνήθηκαν και αξίζει να αναφερθούν, είναι: το διαθέσιμο νερό του νέφους, ο χρόνος σχηματισμού υετού, η ύπαρξη και δημιουργία παγοπυρήνων, καθώς και οι περιοχές τυρβώδους ροής και ανοδικών κινήσεων για να προσδιορισθούν οι βέλτιστες περιοχές σποράς.

Σύμφωνα με τους Vardiman and Moore (1978), τρία είναι τα πιο ουσιαστικά και σημαντικά αποτελέσματα:

1. Τα ευσταθή ορογραφικά νέφη, με κίνηση προς την κορυφή του ορεινού όγκου, με μέτρια περιεκτικότητα διαθέσιμου νερού, και με τη θερμοκρασία της κορυφής του ορογραφικού νέφους να κυμαίνεται από -10 έως και -30 °C, εκτιμήθηκε να δίνουν μία αύξηση υετού περίπου 18% στην κορυφή του ορεινού όγκου, ύστερα από σωστά εκτελεσμένες διαδικασίες σποράς.
2. Τα μέτρια, μη ευσταθή ορογραφικά νέφη, με κίνηση προς την κορυφή του ορεινού όγκου, με μέτρια έως υψηλή περιεκτικότητα διαθέσιμου νερού, και με τη θερμοκρασία της κορυφής του ορογραφικού νέφους να κυμαίνεται από -10 έως -30 °C, εκτιμήθηκε να δίνουν μία αύξηση υετού κατά 52% στην κορυφή του ορεινού όγκου, ύστερα από σωστά εκτελεσμένες διαδικασίες σποράς.
3. Τα ασταθή ορογραφικά νέφη με μεταβαλλόμενη πορεία κίνησης, με χαμηλή περιεκτικότητα διαθέσιμου νερού, και με τη θερμοκρασία της κορυφής του νέφους κάτω από τους -30 °C, εκτιμήθηκε να δίνουν μία αύξηση υετού κατά 54%, ύστερα από σωστά εκτελεσμένες διαδικασίες σποράς.

Θα πρέπει να τονιστεί, ότι η πιθανότητα να εμφανιστούν δυναμικά αποτελέσματα από τη σπορά (dynamic seeding) των ορογραφικών συστημάτων, δεν μπορεί να αποκλειστεί. Τα δυναμικά αποτελέσματα μπορεί να είναι ένας από τους καλύτερους τρόπους για να αυξηθεί το ποσό της Αύξησης του υετού ακόμη περισσότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Το ραντάρ καιρού

Το ραντάρ καιρού αποτελεί ένα σύγχρονο όργανο τηλεπισκόπησης και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) τα οποία προκαλούνται κυρίως από νέφη σωρειτόμορφης ανάπτυξης ή στρωματόμορφα νέφη με ενσωματωμένες περιοχές σωρειτόμορφων χαρακτηριστικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μικρού μήκους κύματος, στην ατμόσφαιρα και την σκέδαση αυτής στα υδρομετέωρα που θα συναντήσει. Το ραντάρ σαρώνει την γύρω περιοχή με διάφορες τεχνικές, οριζόντια (2km έως και 18km έκταση) και κάθετα, και όταν σταματήσει η εκπομπή της ακτινοβολίας, ο δέκτης του ραντάρ δέχεται τα σήματα από τη σκέδαση. Έτσι, το σήμα από τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία αποθηκεύεται σε κατάλληλα μέσα και αφού γίνει επεξεργασία από το κατάλληλο λογισμικό και διορθωθούν τυχόν λάθη, δημιουργούνται μετεωρολογικά προϊόντα που αφορούν τα χαρακτηριστικά των νεφών όπως ταχύτητα κίνησης, ένταση και υετό. Τα μετεωρολογικά ραντάρ αποτελούνται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

- Τον πομπό που παράγει την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.
- Την κεραία που κατευθύνει την ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και λαμβάνει την ανακλώμενη ακτινοβολία.
- Έναν δέκτη που εντοπίζει και ενισχύει το σήμα της ακτινοβολίας.

- Το σύστημα καταγραφής και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Η κεραία του ραντάρ προστατεύεται από ένα θόλο και μπορεί να περιστρέφεται κατά 360° οριζόντια στην ατμόσφαιρα και κατά 20° κατακόρυφα. Καθώς περιστρέφεται, τα σήματα που εκπέμπει έχουν ταχύτητα συγκρίσιμη με την ταχύτητα του φωτός, διαρκούν 0,00000157sec με συχνότητα κάθε 0,00099843sec. Η διαδικασία της σκέδασης των κυμάτων από το στόχο και η επιστροφή τους στο ραντάρ, επαναλαμβάνεται 1300 φορές/δευτερόλεπτο. Ακόμη, καταγράφεται ο χρόνος εκπομπής και σκέδασης των κυμάτων μέχρι την επιστροφή τους στο ραντάρ και, έτσι, από το φαινόμενο Doppler υπολογίζονται διάφορα χαρακτηριστικά της καταιγίδας, όπως η απόσταση και η κατεύθυνση της.

Τα μετεωρολογικά ραντάρ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το εύρος συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν:

- S-band, που χρησιμοποιεί συχνότητες 2700-2900MHz και χρησιμοποιούνται σε περιοχές με τροπικούς κυκλώνες και μουσωνικό κλίμα.
- C-band, για την ανίχνευση υετοφόρων και χαλαζοφόρων νεφών σε συχνότητες 5600-5650MHz.
- X-band, λειτουργούν στα 9300-9500MHz και χρησιμοποιούνται σε μικρότερης κλίμακας υδρολογικές και μετεωρολογικές εφαρμογές.

Το μετεωρολογικό ραντάρ εκτελεί σάρωσεις σε όλο τον όγκο της περιοχής που καλύπτει και τα δεδομένα αποθηκεύονται και προωθούνται περαιτέρω επεξεργασία. Για την ευκολότερη επεξεργασία τα δεδομένα μετατρέπονται από το σύστημα πολικών συντεταγμένων στο καρτεσιανό σύστημα. Το εύρος της σάρωσης είναι 360° , διαρκεί περίπου 3,5 λεπτά και καλύπτει περιοχή οριζόντιας ακτίνας 200km περιμετρικά της θέσης του ραντάρ και ύψους 19 km. Κατά τη σάρωση δεν καλύπτεται μια κωνική περιοχή πάνω από το ραντάρ την οποία δεν μπορεί να καταγράψει λόγω κατασκευής. Η περιοχή αυτή λέγεται κώνος της σιωπής (cone of silence) και αποτελεί μειονέκτημα των μετεωρολογικών ραντάρ καθώς ότι βρίσκεται σε αυτήν την περιοχή δεν καταγράφεται (Σχήμα 3.1).

Η διαδικασία μέτρησης της ισχύος του σήματος που επιστρέφει στο ραντάρ διέπεται από μία εξίσωση που συνδέει την ισχύ με την ενεργό διατομή του στόχου. Σύμφωνα με τον Battan (1973), για σωματίδια σφαιρικού σχήματος, με μέγεθος μικρότερο από το

μήκος κύματος της ακτινοβολίας από το ραντάρ, η μέση επαναλαμβανόμενη ισχύς υπολογίζεται από την εξίσωση (3.1):

$$P_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \frac{P_t G^2 \Theta^2 \tau}{\lambda^2} \frac{\|K\|^2}{r^2} Z \quad (3.1)$$

Όπου,

P_r , η ισχύς (Watt) του σήματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που επιστρέφεται από τον στόχο πίσω στην κεραία του ραντάρ.

P_t , το μέγιστο της ισχύος (Watt).

G , η απολαβή της ισχύος από την κεραία.

τ , η χρονική διάρκεια του παλμού.

r , η απόσταση (m) μεταξύ του στόχου και του ραντάρ.

λ , το μήκος κύματος (m) της ακτινοβολίας που εκπέμπει το ραντάρ.

Θ , η γωνία της δέσμης.

$\ln 2$, διορθωτικός παράγοντας για την ατμόσφαιρα.

$\|K\|^2$, διηλεκτρική παράμετρος που εξαρτάται από το υλικό του στόχου, τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

c , η ταχύτητα του φωτός $3 \cdot 10^8$ m/s.

Z , παράγοντας ανακλαστικότητας.

Τα μετεωρολογικά ραντάρ είναι το βασικό μέσο για την παρατήρηση των χαλαζοκαταιγίδων και την έναρξη της επιχείρησης καταστολής τους.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται όλες οι βασικές και παράγωγες τιμές του ραντάρ του Φιλύρου, σε διάφορες χρονικές στιγμές μέσα στην ημέρα και σε διαφορετικές αποστάσεις από το ραντάρ. Βέβαια, η ανακλαστικότητα του ραντάρ είναι αντιπροσωπευτική για τον εντοπισμό των αναπτυσσόμενων κυττάρων μιας καταιγίδας ως προς την θέση, το μέγεθος των χαλαζόκοκκων και την ισχύ τους.

Τα καταλλήλως επεξεργασμένα δεδομένα του μετεωρολογικού ραντάρ, αποτελούν πολυτιμότατο εργαλείο στη μελέτη και στον ακριβή προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, που αναπτύσσονται πάνω από περιοχές ενδιαφέροντος, τα οποία και αποτελούν το βασικό και ίσως τελικό προϊόν μελέτης και έρευνας.



Σχήμα 3.1. Μετεωρολογικό ραντάρ και απεικόνιση της περιοχής του κώνου της σιωπής (Πηγή: Μπαμπζέλης, 2013).

3.2 Δεδομένα μετεωρολογικού ραντάρ

Τα δεδομένα του μετεωρολογικού ραντάρ, εφόσον επεξεργαστούν και αναλυθούν με τον κατάλληλο τρόπο, μπορούν να αποκαλύψουν τα χαρακτηριστικά των νεφών που αναπτύσσονται πάνω από μία περιοχή.

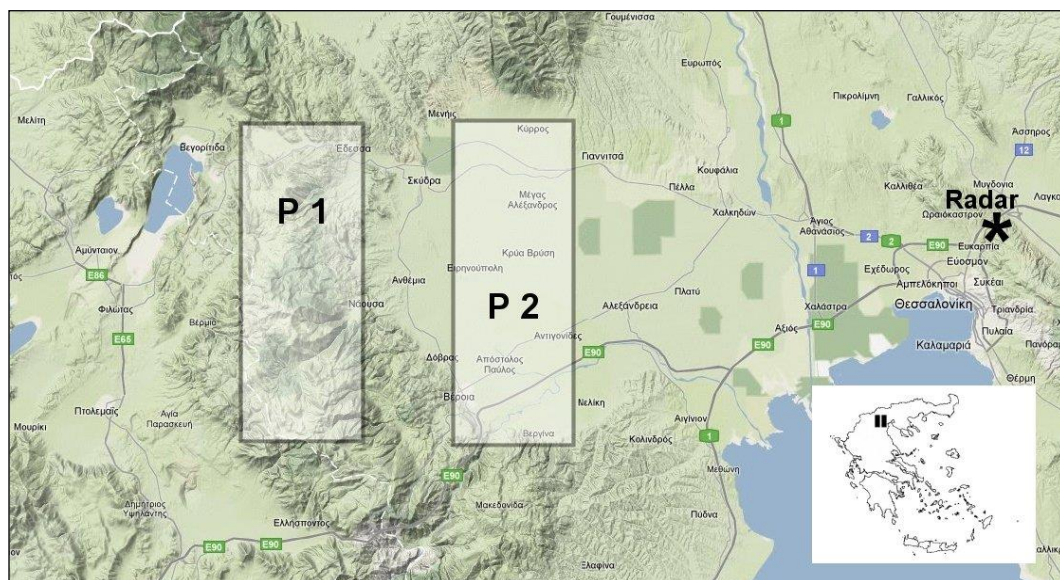
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούνται από εικόνες ανακλαστικότητας που προέρχονται από το μετεωρολογικό ραντάρ που βρίσκεται τοποθετημένο στο βουνό Φίλυρο (40.672° N, 23.014° E) βορειοανατολικά της πόλης της Θεσσαλονίκης. Τα δεδομένα καλύπτουν ένα διάστημα πέντε (5) ετών λειτουργίας του μετεωρολογικού ραντάρ, από το Φεβρουάριο του 2006 έως και τον Δεκέμβριο του 2010 (εκτός του Ιανουαρίου), που κατά το πλείστον, το ραντάρ καιρού λειτουργεί στο πλαίσιο του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των Καλλιεργειών του ΕΛΓΑ για τους μήνες Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο κάθε έτους. Παρόλα αυτά, το μετεωρολογικό ραντάρ λειτούργησε και κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών της παραπάνω περιόδου για τις ανάγκες και της μελέτης αυτής.

Η περιοχή της ανάλυσης των ορογραφικών νεφών εστιάζεται σε μία παραλληλόγραμμη επιφάνεια (30×35 Km) συνολικού εμβαδού 1.050 km^2 η οποία περιλαμβάνει κυρίως τον ορεινό όγκο του Βερμίου, και προεκτείνεται βόρεια και νότια

αυτού, περιλαμβάνοντας και τις κλιτύς αυτού. Η περιοχή μελέτης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Για τη σύγκριση των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών της ορεινής περιοχής του Βερμίου με τα χαρακτηριστικά των σωρειτόμορφων νεφών που αναπτύσσονται στη γειτονική ανατολική πεδινή περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν δύο περιοχές ως εξής:



Σχήμα 3.2. Περιοχή ανάλυσης ορογραφικών νεφών (Πηγή: Tympanidis et al., 2017).



Σχήμα 3.3. Περιοχές P1 και P2 σύγκρισης χαρακτηριστικών ορογραφικών νεφών (P1) και καταιγιδοφόρων νεφών (P2) (Πηγή: Tympanidis et al., 2012).

Η περιοχή (με το όνομα P1) είναι η ορεινή δυτική περιοχή (μέσο υψόμετρο 927 μέτρα) και η περιοχή (με το όνομα P2) η πεδινή ανατολική περιοχή της Ημαθίας-

Πέλλας (μέσο υψόμετρο 51 μέτρα). Για λόγους ομοιομορφίας και σύγκρισης οι περιοχές P1 και P2 είναι ίσης έκτασης 150km² η καθεμία. Επιπλέον η ορεινή περιοχή P1 είναι υποπεριοχή της αρχικής περιοχής μελέτης των ορογραφικών νεφών. Οι περιοχές P1 και P2 εμφανίζονται στο Σχήμα 3.3.

3.3 Μεθοδολογία καταγραφής, επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων μετεωρολογικού ραντάρ

Για την ανάλυση των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών και την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιείται το σύστημα TITAN (Thunderstorm Identification, Analysis and Nowcasting), (Dixon and Wiener 1993). Το σύστημα αυτό αναλύει νέφη αλλά και συμπλέγματα νεφών και είναι σε θέση να αναγνωρίσει, να εντοπίσει και να κάνει πρόγνωση της κίνησης των νεφών με βάση τις μετρήσεις ανακλαστικότητας από το μετεωρολογικό ραντάρ.

Η χρησιμότητα του είναι μεγάλη ιδιαίτερα σε προγράμματα τροποποίησης καιρού. Η ποιότητα των δεδομένων των ραντάρ είναι πολύ υψηλή δίχως να περιέχουν την υποκειμενικότητα του ερευνητή, και ακόμη ο όγκος των δεδομένων που καταγράφεται είναι αδύνατο να καταγραφούν από τον χρήστη.

Το σύστημα εντοπισμού TITAN κατασκευάστηκε για την αναγνώριση και πρόγνωση καταιγίδων και βασίζεται σε μετρήσεις ανακλαστικότητας από το ραντάρ. Ο αλγόριθμος του συστήματος ορίζει την τρισδιάστατη περιοχή όπου υπάρχει κάποιο κύτταρο καταιγίδας που ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι ανακλαστικότητας. Επιπλέον, ο όγκος της περιοχής πρέπει να ξεπερνά μια τιμή κατωφλίου. Γίνεται πρόγνωση για τις πιθανές τροχιές που θα ακολουθήσει το κύτταρο λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της καταιγίδας αλλά και την απόσταση που μπορεί να διανύσει για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τέλος, διακρίνονται τα απλά κύτταρα από τα σύνθετα τα οποία συγχωνεύονται ή διαχωρίζονται μεταξύ τους.

Για να θεωρηθεί ένα κύτταρο καταιγίδας έγκυρο θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις που αφορούν τα χαρακτηριστικά του, τη διάρκεια και την τοποθεσία. Τα κριτήρια που έχουν οριστεί σε προηγούμενες εργασίες από διάφορους ερευνητές (Καρακώστας, 2007; Goudenko et al., 2010; Bampzelis 2013) αποσκοπούν κυρίως στον εντοπισμό κυττάρων καταιγίδας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για τη μελέτη των ορογραφικών νεφών τα κριτήρια διαφοροποιούνται ώστε να είναι δυνατή

η μελέτη περισσότερων νεφών και είναι τα ακόλουθα:

1. Η διάρκεια ζωής των νεφών να είναι τουλάχιστον 15 λεπτά.
2. Να μην υπάρχουν ελλειπείς μετρήσεις μεταξύ του χρόνου έναρξης και λήξης στη διάρκεια ζωής ενός νέφους .
3. Η κορυφή του νέφους πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3,5km, η ανακλαστικότητα μεγαλύτερη από 30 dBz και να καταλαμβάνει όγκο τουλάχιστον 15km³ .

Νέφη τα οποία πληρούν όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις θεωρούνται έγκυρα από τον αλγόριθμο και αποτελούν τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Σε κάθε περίπτωση, ο καλύτερος τρόπος πιστοποίησης της εγκυρότητας των νεφών που αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο του συστήματος είναι η οπτική επαλήθευση αυτών (Goudenhoofdt et al., 2010).

3.4 Χαρακτηριστικά νεφών

Τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο του συστήματος συνοψίζονται παρακάτω ως εξής (Bampzelis, 2013):

1. Χρόνος πρώτης ανίχνευσης του νέφους Start T
2. Χρόνος διάρκειας νέφους Dur
3. Ταχύτητα κίνησης νέφους S
4. Διεύθυνση κίνησης νέφους D
5. Ο όγκος του νέφους Vol
6. Η μάζα του νέφους Mass
7. Η επιφάνεια του νέφους A
8. Η επιφάνεια υετού του νέφους PA
9. Μέγιστο ύψος κορυφής του νέφους Max H
10. Διανυόμενη Έκταση Swath Area
11. Ροή υετού Pflux
12. Ρυθμός Υετού Prate
13. Μέγιστη Ανακλαστικότητα του νέφους Max dBz
14. Συνολικός Υετός στο Έδαφος P

Η αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των νεφών, ο τρόπος υπολογισμού τους από τον αλγόριθμο του συστήματος καθώς και διάφορες παραδοχές περιγράφονται παρακάτω και είναι:

Χρόνος πρώτης ανίχνευσης του νέφους Start T(Hour UTC).

Είναι η χρονική στιγμή μέσα στο εικοσιτετράωρο κατά την οποία ανιχνεύεται ένα έγκυρο νέφος (όπως ορίζεται ανωτέρω) στο οποίο η ανακλαστικότητα ξεπερνά την προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου. Το σύστημα TITAN λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο UTC αποθηκεύοντας όλες τις πληροφορίες σε αυτό τον χρόνο. Ο χρόνος πρώτης ανίχνευσης των κυττάρων δίδει τη χρονική κατανομή κατά την οποία ένα νέφος αναπτύσσει εκείνα τα χαρακτηριστικά ώστε να χαρακτηριστεί έγκυρο από τον αλγόριθμο του συστήματος.

Χρόνος διάρκειας νέφους Dur(min).

Ο χρόνος ζωής ενός νέφους είναι το χρονικό διάστημα από την πρώτη ανίχνευση και καταγραφή του στο σύστημα TITAN έως τη διάλυσή του. Η διάλυση ενός νέφους καθορίζεται με αντίστοιχο τρόπο όπως και η δημιουργία του δηλαδή το νέφος παύει να θεωρείται έγκυρο τη στιγμή που η ανακλαστικότητα πέσει κάτω από την τιμή κατωφλίου που έχει οριστεί και όχι όταν διαλυθεί πλήρως το νέφος.

Ο όγκος του νέφους Vol(Km³).

Προσδιορίζεται αθροιστικά από τον αριθμό συνεχόμενων περιοχών στις οποίες η ανακλαστικότητα ξεπερνά την τιμή κατωφλίου που έχει δοθεί. Επιπλέον το νέφος για να θεωρείται έγκυρο πρέπει ο όγκος αυτός να υπερβαίνει τα 15km³. Ο όγκος του νέφους προσδιορίζεται από το μέσο όρο των επιμέρους όγκων ανά ανίχνευση από το μετεωρολογικό ραντάρ.

Η μάζα του νέφους Mass(ktons).

Η μάζα M του νέφους προσδιορίζεται από τη σχέση μάζας - ανακλαστικότητας (Z-M) του μετεωρολογικού ραντάρ:

$$Z = aM^b$$

όπου για την περίπτωση του μετεωρολογικού ραντάρ στο Φίλυρο έχουν χρησιμοποιηθεί ως τιμές στις παραμέτρους $a=200$ και $b=1,3$. Η μάζα του νέφους είναι

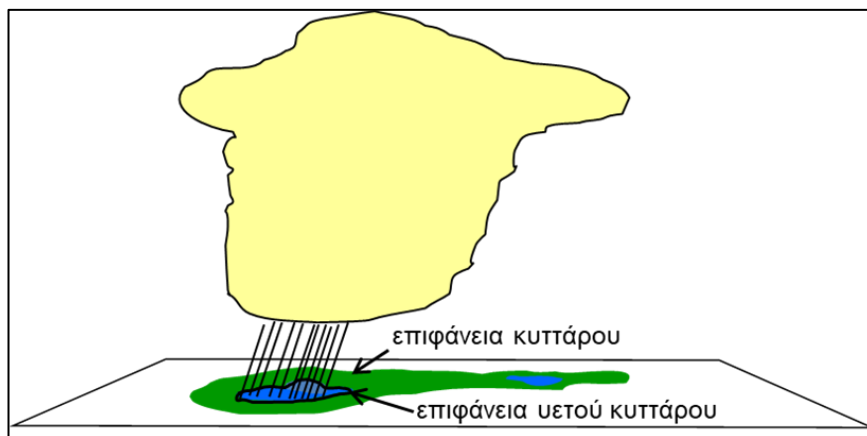
το ολοκλήρωμα της μάζας του νερού που υπάρχει στην μονάδα του όγκου, για όλες τις περιοχές στις οποίες η ανακλαστικότητα ξεπερνά την τιμή κατωφλίου, όπως αντίστοιχα ορίζεται και ο όγκος, και δίνεται από τη σχέση:

$$Mass = \int Md(Vol)$$

Η μάζα του νέφους προκύπτει συνολικά από το νερό που υπάρχει μέσα στο νέφος και όχι από τη μάζα των υδροσταγονιδίων, καθόσον, το μετεωρολογικό ραντάρ τύπου C που χρησιμοποιείται δεν έχει τη διακριτική ευκρίνεια να «δει» υδροσταγονίδια. Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι, επειδή τα ανώτερα στρώματα του νέφους αποτελούνται συνήθως από παγοκρύσταλλα, η μάζα που υπολογίζεται από τη ανωτέρω σχέση περιλαμβάνει συνολικά το νερό τόσο σε υγρή όσο και σε στερεή κατάσταση.

Η επιφάνεια του νέφους $A(km^2)$

Προσδιορίζεται από την προβολή της τρισδιάστατης περιοχής του νέφους στην επιφάνεια του εδάφους όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Να επισημανθεί ότι ως νέφος θεωρείται το νέφος TITAN και όχι ολόκληρο το νέφος, το οποίο προβάλλεται σε προφανώς μεγαλύτερη έκταση στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3.4. Σχηματική απεικόνιση της επιφάνειας και της επιφάνειας υετού του νέφους (Από, Μπαμπζέλης, 2013).

Η επιφάνεια υετού του νέφους $PA(km^2)$

Προσδιορίζεται κατά αντίστοιχο τρόπο με αυτό της επιφάνειας του νέφους αλλά μόνο για την περιοχή που παρατηρείται υετός στο έδαφος.

Ροή υετού $Pflux(m^3/s)$

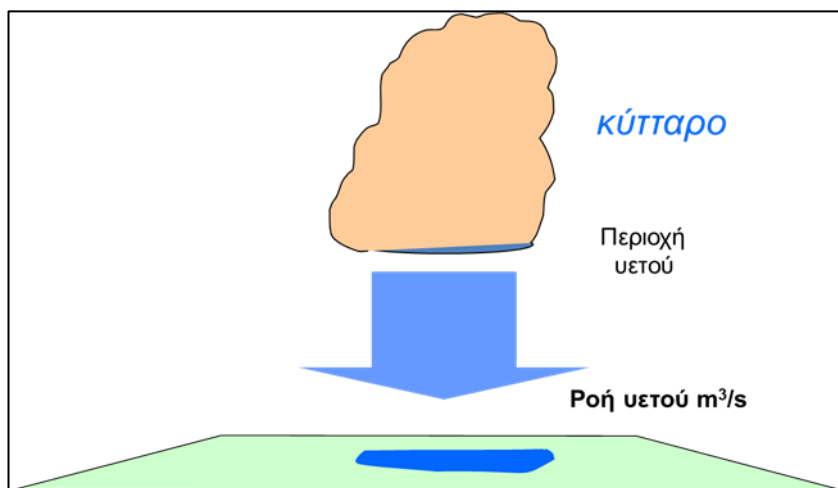
Ο υετός ο οποίος εμφανίζεται στη βάση του νέφους υπολογίζεται από την εξίσωση του ραντάρ

$$Z = aR^b$$

Όπου R είναι ο ρυθμός υετού (mm/hr^{-1}). Οι σταθερές a και b για την περιοχή της Θεσσαλίας παίρνουν τις τιμές $a=200$ και $b=1,3$. Εκτεταμένες έρευνες έχουν δείξει ότι η χρήση της σύνθετης ανακλαστικότητας (composite reflectivity) δίνει καλύτερη εκτίμηση του ρυθμού υετού από τη χρήση μόνο της ανακλαστικότητας στο κατώτερο στρώμα του νέφους. Ολοκληρώνοντας στη συνέχεια τον ρυθμό υετού στο σύνολο του νέφους προκύπτει η ροή υετού που πέφτει από ολόκληρο το νέφος. Η ροή υετού εκφράζεται από τον ακόλουθο τύπο:

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

όπου A, η περιοχή υετού του νέφους (km) όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Σχηματική απεικόνιση της ροής υετού (Pflux) από το νέφος (Πηγή: Μπαμπζέλης, 2013).

Ρυθμός Υετού $Prate(mm/hr)$

Είναι ο ρυθμός υετού του νέφους σε χιλιοστά ανά ώρα ο οποίος προσδιορίζεται από τη ροή υετού και την έκταση της επιφάνειας του υετού ανά ανίχνευση του μετεωρολογικού ραντάρ. Για πιο ρεαλιστική και ορθότερη έκφραση της παραμέτρου τέθηκε ο περιορισμός η επιφάνεια του υετού να είναι μεγαλύτερη των $2km^2$. Ο ρυθμός υετού εξάγεται ως μέσος όρος όλων των ρυθμών υετού που προκύπτουν το χρονικό διάστημα που το νέφος δίνει υετό και αποτελεί ένα μέτρο της έντασης ενός νέφους.

Μέγιστο ύψος κορυφής του νέφους $Max H(km)$

Είναι το μέγιστο ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα στο οποίο εκτείνεται ένα νέφος. Το μέγιστο ύψος του νέφους είναι το ύψος στο οποίο ανέρχεται εκείνη η περιοχή του νέφους, η οποία ορίζεται ως νέφος, με βάση την τιμή κατωφλίου της ανακλαστικότητας που έχει οριστεί και όχι η κορυφή του νέφους η οποία μπορεί να βρίσκεται υψηλότερα.

Μέγιστη Ανακλαστικότητα του νέφους $Max dBz(dBz)$

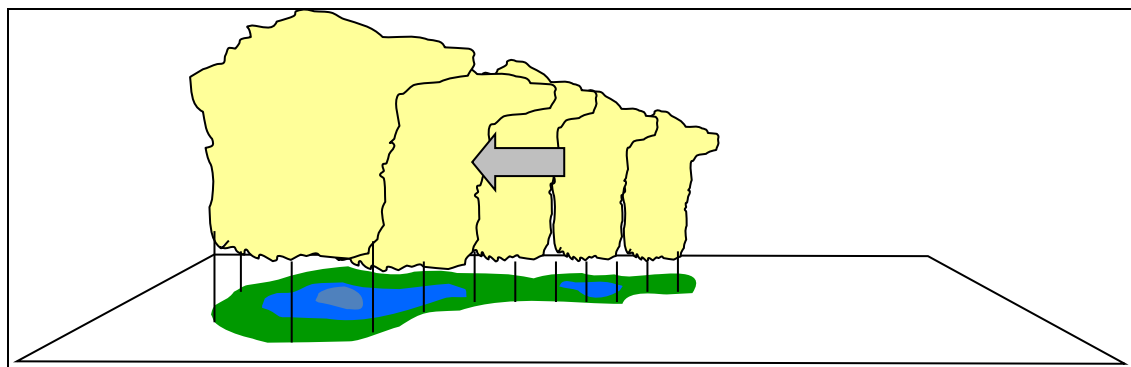
Είναι η μέγιστη τιμή ανακλαστικότητας που αναπτύσσει το νέφος ανεξάρτητα του ύψους ή της χρονικής στιγμής που παρατηρείται. Η μέγιστη ανακλαστικότητα αποτελεί ένα μέτρο της έντασης του νέφους.

Συνολικός Υετός στο Έδαφος $P(mm)$

Η εκτίμηση της ποσότητας του νετού που φτάνει στο έδαφος σύμφωνα με τον αλγόριθμο του προγράμματος από τα δεδομένα του μετεωρολογικού ραντάρ.

Διανύμενη Έκταση $Swath Area(km^2)$

Είναι συνολικά η επιφάνεια στο έδαφος που διανύει ένα νέφος από τη στιγμή της δημιουργίας του έως ότου διαλυθεί (παύσει να θεωρείται νέφος TITAN). Με τον τρόπο αυτό δίνεται μία εικόνα της συνολικής έκτασης που μπορεί να καλύψει ένα νέφος στη διάρκεια της ζωής του όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.6. Η διανύμενη έκταση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα κίνησης του νέφους, από το χρόνο ζωής του και από την προβολή του όγκου του στο έδαφος.



Σχήμα 3.6. Η διανύμενη έκταση ενός νέφους στο έδαφος σε διαδοχικές χρονικές στιγμές (Πηγή: Μπαμπζέλης, 2013). .

Ταχύτητα κίνησης νέφους $S(\text{km/hr})$

Η ταχύτητα κίνησης ενός νέφους προσδιορίζεται συγκρίνοντας τη θέση του κέντρου βάρους ενός αναγνωρισμένου νέφους μεταξύ δύο διαδοχικών ανιχνεύσεων του μετεωρολογικού ραντάρ. Με τον τρόπο αυτό ως ταχύτητα κίνησης θεωρείται η οριζόντια απόσταση που έχει διανύσει το νέφος στον χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών ανιχνεύσεων.

Διεύθυνση κίνησης νέφους $D(^{\circ})$

Κατά αντίστοιχο τρόπο ορίζεται και η διεύθυνση κίνησης του νέφους σε μοίρες με βάση τη φορά του διανύσματος κίνησής του.

3.5 Χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών

Ένα είδος σχηματισμού των ορογραφικών νεφών στην περιοχή ενδιαφέροντος συνδέεται με δυτικής συνιστώσας ανέμους (SW έως NW), που επικρατούν πάνω από την περιοχή. Η δομή της κυκλοφορίας και κίνησης των αερίων μαζών πάνω από μια, συνήθως δισδιάστατης οροσειράς, καθώς και τα θερμοδυναμικά και μικροφυσικής κλίμακας χαρακτηριστικά, έχουν μεγάλη σπουδαιότητα και πρωταρχικά συνεισφέρουν στη δημιουργία –και κατ' επέκταση μελέτη- των ορογραφικών νεφών. Αυτά τα νέφη δημιουργούνται και προσδιορίζονται ως αποτέλεσμα μέτριων ζωνικών ή και έντονων ανέμων, με αέριες μάζες με υψηλή υγρασία, που προηγούνται ή έπονται μιας ατμοσφαιρικής διαταραχής στην ανώτερη ατμόσφαιρα, που διέρχεται από την περιοχή ενδιαφέροντος. Τέτοιες διαταραχές συνήθως αυξάνουν τη ροή ανέμου κάθετα προς την οροσειρά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός της μηχανικής ανύψωσης λόγω της ορογραφίας, την εκτόνωση της αέριας μάζας και τελικά την ψύξη αυτής.

Με αυτό τον τρόπο, μεγάλες ποσότητες υγρού αέρα μεταφέρονται. Τα προκύπτοντα, από τη διαδικασία αυτή, ορογραφικά νέφη, ονομάζονται «blanket clouds», και παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τη μελέτη αυτή, καθώς αυτά τα νέφη σχηματίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια των ψυχρών και ενδιάμεσων εποχών του έτους, παρουσιάζοντας τις πολύ επιθυμητές ενσωματωμένες στα ορογραφικά νέφη ανοδικές κινήσεις «embedded convection», που συνεισφέρουν τα μέγιστα στη

δυναμικότητα σχηματισμού βροχόπτωσης και που αναγνωρίζονται σχετικά εύκολα από το ραντάρ καιρού (Grant and Kahan, 1974).

Ένα άλλο είδος διαφορετικού τύπου ορογραφικού νέφους είναι αυτό που προκύπτει από τις ανοδικές κινήσεις (convection) που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της θέρμανσης του ορεινού όγκου και της εξαναγκασμένης θερμικής ανωμεταφοράς. Αυτά τα ορογραφικά νέφη εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους, καθώς τόσο τα μηχανικά αίτια όσο και τα θερμικά, επενεργούν ταυτόχρονα για την ανύψωση της αέριας μάζας με στόχο τον κορεσμό αυτής. Εάν η θερμική δομή της ατμόσφαιρας είναι ασταθής, η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης (condensation, 2500 J/gr), μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια, που μαζί με τη υφιστάμενη αστάθεια και την παρουσία του ορεινού όγκου, συνεισφέρει στην περεταίρω ανάπτυξη του ορογραφικού νέφους (Καρακώστας, 2007).

Τονίζεται ότι, τα ορογραφικά νέφη που είναι συνδεδεμένα και δημιουργούνται ως αποτέλεσμα οργανωμένων συστημάτων και μετωπικών καταστάσεων δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη, διότι τέτοια νέφη, αν και μπορούν να θεωρηθούν ως ορογραφικά, παρουσιάζουν μια διαφορετική, ιδιόρρυθμη και πολύπλοκη συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί, ότι τα παραπάνω περιγραφόμενα είδη ορογραφικών νεφών είναι αυτά που εξετάζονται και μελετώνται.

Εφαρμόζοντας μια αυστηρή διαδικασία παρακολούθησης και ανάλυσης από τα δεδομένα ραντάρ καιρού (Bampzelis and Karacostas, 2012), εξετάζονται και αναλύονται 77 επιλεγμένες περιπτώσεις (ημερών) ορογραφικών νεφών, από τον Απρίλιο του 2006 έως τον Δεκέμβριο του 2010 (Tympanidis et al., 2012). Παρόλο που οι περισσότερες περιπτώσεις προήλθαν από τη χρονική περίοδο Απρίλιος-Σεπτέμβριος, λόγω των συνεχών λειτουργιών του ραντάρ, ορισμένες πρόσθετες χειμερινές περιπτώσεις συμπεριλήφθηκαν -για πρώτη φορά- στη μελέτη της συμπεριφοράς των ορογραφικών νεφών και κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος-Μάρτιος, εκτός του Ιανουαρίου) του έτους.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στη μελέτη αυτή εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν αρκετές περιπτώσεις ορογραφικών νεφών στην περιοχή ενδιαφέροντος, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους, αλλά και κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, συνθέτοντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα (Tympanidis et al., 2012 και 2017). Όμως στη μελέτη αυτή δεν έχει συμπεριληφθεί ο μήνας Ιανουάριος όλων των ετών της ερευνητικής περιόδου, λόγω προγραμματισμένων τεχνικών διεργασιών του τεχνολογικού εξοπλισμού του ραντάρ καιρού. Επομένως, η σχεδόν ετήσια μελέτη των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, δίνει τη δυνατότητα μιας πιο ολοκληρωμένης ανάλυσης και μελέτης των χαρακτηριστικών τους, παρέχοντας συγχρόνως μια πρωτοτυπία. Σ' αυτό, θα πρέπει να τονιστεί και το γεγονός, ότι τα ορογραφικά νέφη εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν πολύ ικανοποιητικά από το ραντάρ καιρού κατά τη διάρκεια του χειμώνα, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ενσωματωμένων κυττάρων ανοδικών κινήσεων (convective cells), κυρίως μηχανικών λόγω της ορογραφίας και όχι θερμικών λόγω του χειμώνα (Πυθαρούλης, 2008).

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η επιλεγθείσα περιοχή ανάλυσης των δεδομένων και μελέτης, που καλύπτει 1.050 km² (ορθογώνιο 30 x 35 km), πάνω από την οροσειρά του Βερμίου στην Κεντρική Μακεδονία. Η χρονική περίοδος μελέτης είναι 2006 με 2010, εξαιρουμένου του μηνός Ιανουαρίου κάθε έτους. Στο Σχήμα 4.1 επίσης απεικονίζεται η θέση του μετεωρολογικού radar [Φύλуро (40.672 ° N, 23.014 ° E)], που βρίσκεται βορειοανατολικά της Θεσσαλονίκης και βόρεια του αεροδρομίου «Μακεδονία».

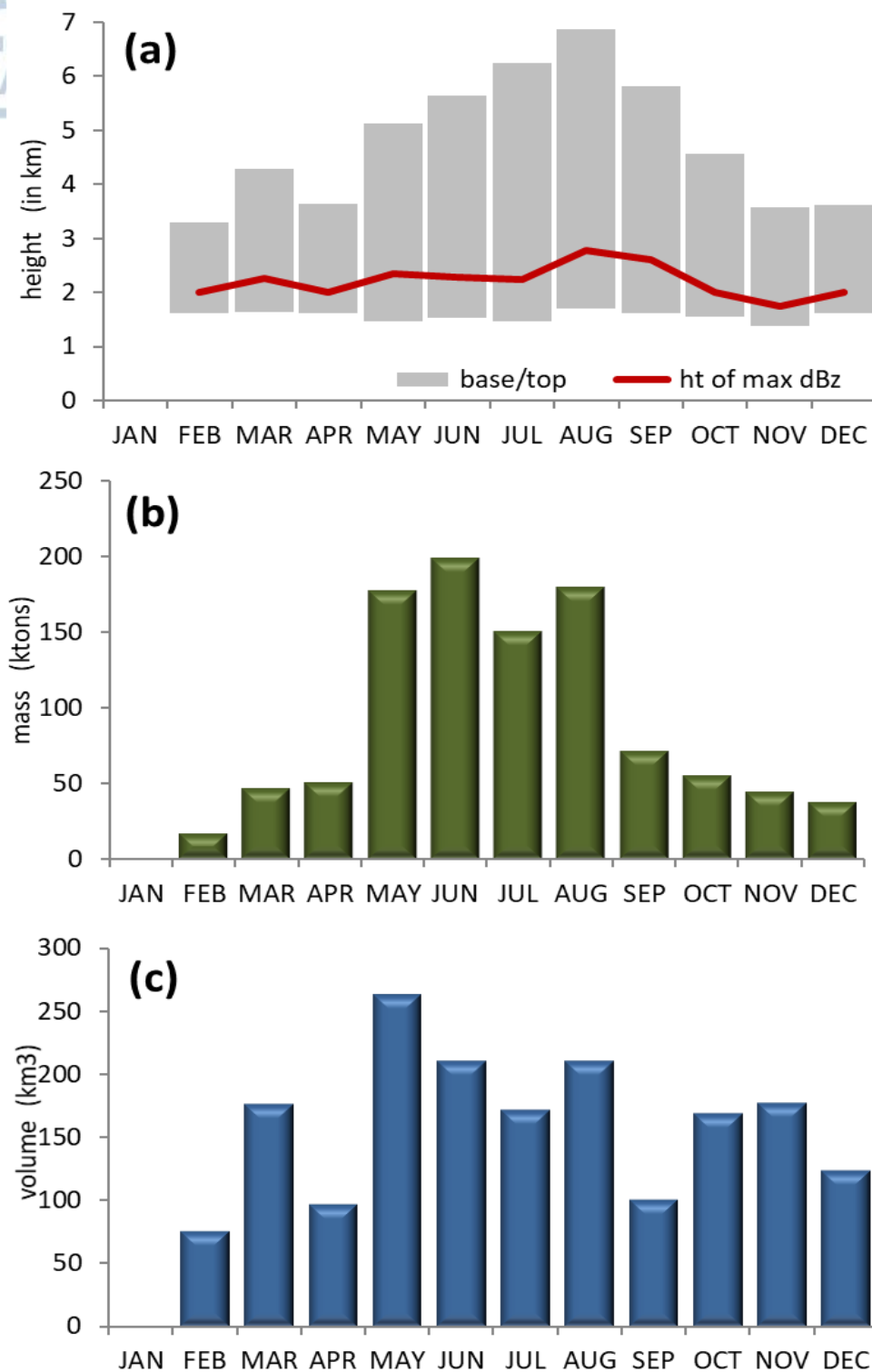


Σχήμα 4.1. Η περιοχή μελέτης των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν και μελετήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην Κεντρική Μακεδονία, για τη χρονική περίοδο 2006 με 2010 (Πηγή: Tympanidis et al., 2017).

4.2 Χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών

Τα Σχήματα 4.2, 4.3, 4.4 και 4.5 που παρουσιάζονται παρακάτω παρέχουν μια πολύ ολοκληρωμένη και εμπειριστωμένη εικόνα των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, στην ορεινή περιοχή του Βερμίου στην Κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται οι μηνιαίες κατανομές των δομικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 - 2010. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2(a) παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες κατακόρυφες εκτάσεις, δηλαδή τα μέσα μηνιαία ύψη της βάσης και της κορυφής των ορογραφικών νεφών, όπως αυτά καταγράφηκαν για πέντε (5) χρόνια (2006-2010), από το Φεβρουάριο έως και το Δεκέμβριο. Το ύψος της βάσης των ορογραφικών νεφών κυμαίνεται από περίπου 1,4 km το Νοέμβριο έως 1,7 km τον Αύγουστο. Οι κορυφές των ορογραφικών νεφών διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα με τους μήνες και την εποχή σχηματισμού αυτών. Έτσι, κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, δηλαδή μεταξύ Οκτωβρίου και Απριλίου, οι κορυφές των νεφών σπάνια ξεπερνούν τα ύψη 4,5 km, ενώ κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, δηλαδή από το Μάιο έως και το Σεπτέμβριο, οι κορυφές νεφών μπορούν να φτάσουν μέχρι και 7 km

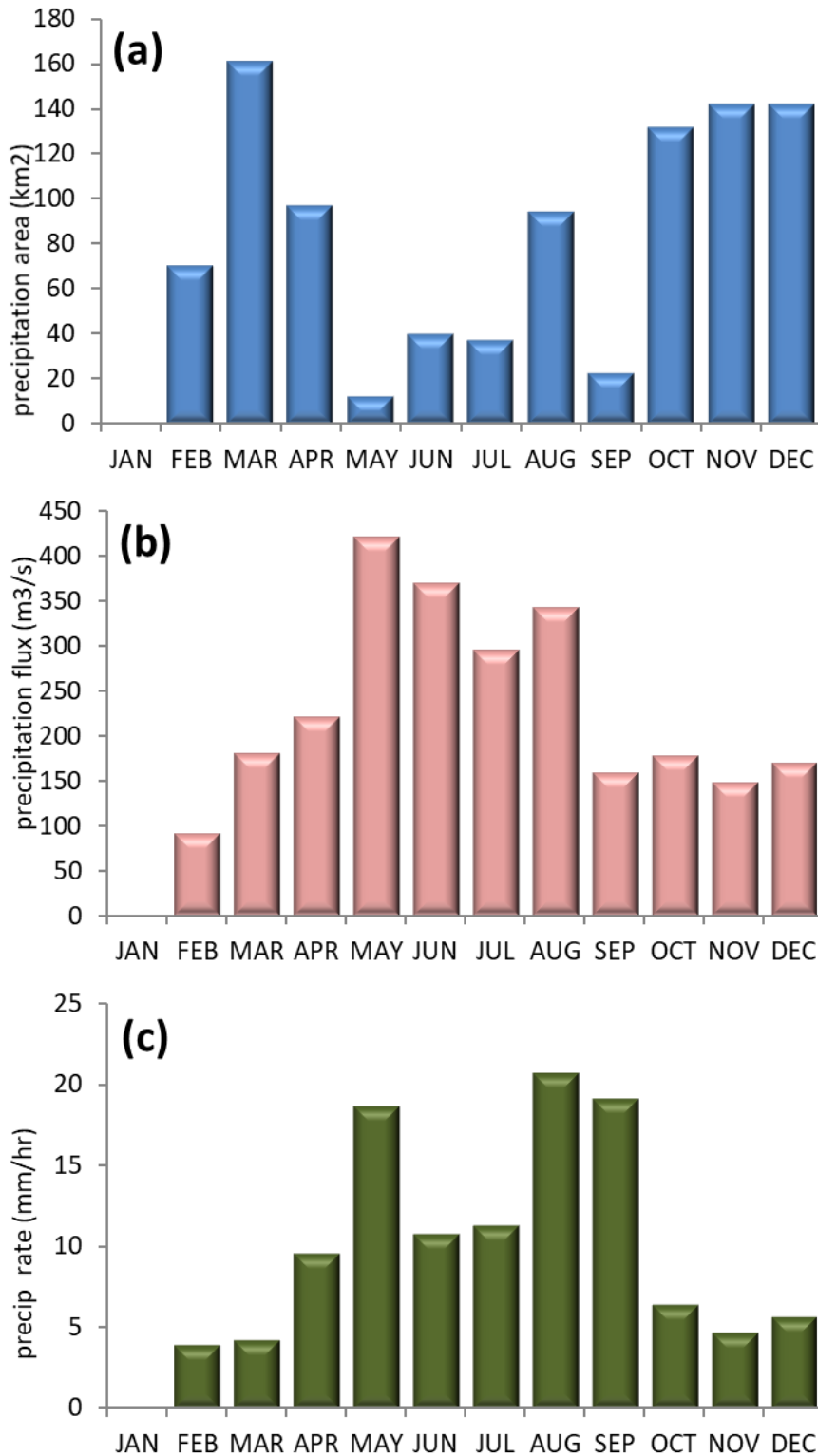


Σχήμα 4.2. Μηνιαίες κατανομές των δομικών και δυναμικών χαρακτηριστικών: (a) κατακόρυφης έκτασης (βάση/κορυφή) και ύψους μέγιστης ανακλαστικότητας, (b) μάζας και (c) όγκου, των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010.

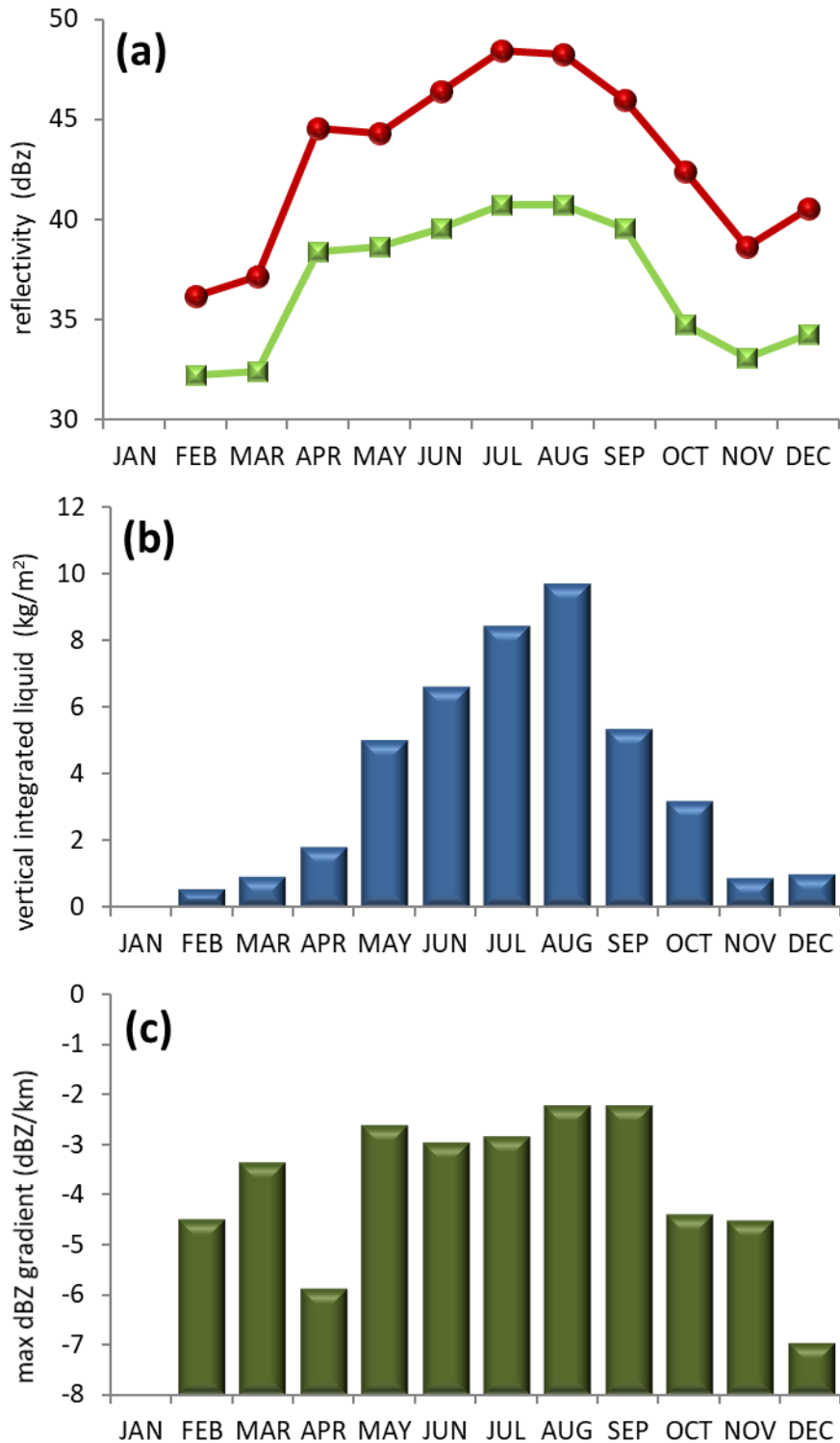
ύψος. Οι παραπάνω οριακές τιμές υποδηλώνουν, ότι τα αντίστοιχα ορογραφικά νέφη παρουσιάζουν μια κατακόρυφη ανάπτυξη (βάθος νέφους) που κυμαίνεται από 1,7 έως 3,0 km για την ψυχρή περίοδο και 3,7 έως 5,2 km για τη θερμή περίοδο. Οι κατακόρυφες αυτές αναπτύξεις φαίνονται να είναι αρκετά ικανοποιητικές, κυρίως για τη θερμή περίοδο. Η συνεχής-συμπαγή γραμμή αντιπροσωπεύει την ετήσια κατανομή του μέσου ύψους των μέγιστων τιμών ανακλαστικότητας που παρατηρήθηκε στα μελετώμενα ορογραφικά νέφη και που κυμαίνεται από 1,8 km το Νοέμβριο έως 2,8 km τον Αύγουστο. Τα ύψη αυτά, αν και είναι σχετικά μικρά, δεν υποδηλώνουν άμεσα την μη έντονη δυναμικότητα των ορογραφικών νεφών, καθώς θα μπορούσαν να τονίσουν ακόμη και το ύψος της περιοχής των κατακρημνισμάτων.

Από το συνδυασμό των Σχημάτων 4.2 (b) και (c) φαίνεται να επιτυγχάνεται η σύνθεση -και κατά κάποιο τρόπο- ο προσδιορισμός του Σχήματος 4.2 (a). Το 68,6% της συνολικής μάζας των ορογραφικών νεφών της περιόδου μελέτης καταγράφεται κατά τη θερμή περίοδο του έτους (Μάιος έως και Αύγουστος), ενώ μόνο το 31,4% κατά την περίοδο Σεπτεμβρίου – Απριλίου. Οι κατανομές του όγκου των ορογραφικών νεφών για τους 4 μήνες της θερμής περιόδου παρουσιάζουν βασικές ομοιότητες με αυτές της κατανομής της μάζας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να τονιστεί η ομοιότητα των κατανομών του όγκου και της κατακόρυφης ανάπτυξης των ορογραφικών νεφών κατά την περίοδο Φεβρουαρίου έως και Μαρτίου (Σχήματα 4.2 (c) και (a)).

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι μηνιαίες κατανομές των μικροφυσικών και δυναμικών χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι ετήσιες κατανομές: (a) της επιφάνειας υετού, (b) της ροής υετού και (c) του ρυθμού υετού, των υπό μελέτη ορογραφικών νεφών. Από το Σχήμα 4.3 (a) συνάγεται, ότι το 78,2 % της ετήσιας επιφάνειας βροχόπτωσης λαμβάνει χώρα κατά την ψυχρή περίοδο του έτους (Οκτώβριος έως και Φεβρουάριος), ενώ μόνο το 21,8 % κατά τη θερμή περίοδο, υποδηλώνοντας το διάσπαρτο και τοπικό χαρακτήρα των βροχοπτώσεων, αντίστοιχα. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 4.3 (b), όπου η ροή βροχόπτωσης, κατά την ψυχρή περίοδο, συνεισφέρει στο συνολικό ποσό μόνο κατά 29,8%, ενώ η συνεισφορά για τη θερμή περίοδο είναι 70,2 %. Παρόμοια κατανομή παρατηρείται και στο Σχήμα 4.3 (c), όπου ο ρυθμός υετού των ορογραφικών νεφών μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου και ελαχιστοποιείται κατά την ψυχρή περίοδο. Μάλιστα, το εύρος του ρυθμού βροχόπτωσης κυμαίνεται από 20,7 mm/hr τον Αύγουστο έως 4,0



Σχήμα 4.3. Μηνιαίες κατανομές των μικροφυσικών και δυναμικών χαρακτηριστικών: (a) επιφάνειας υετού, (b) ροής υετού και (c) ρυθμού υετού, των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010.

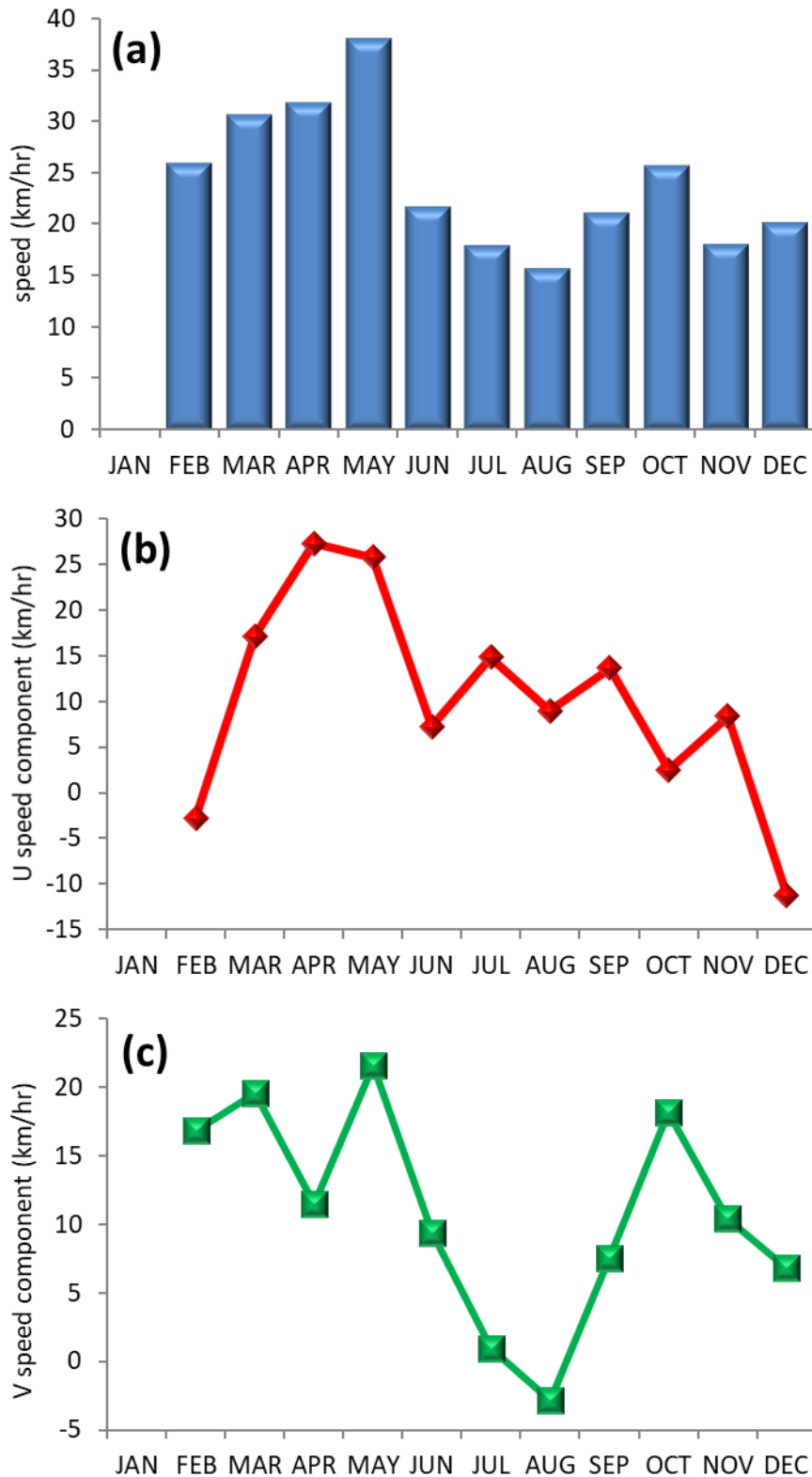


Σχήμα 4.4. Μηνιαίες κατανομές των μικροφυσικών και δυναμικών χαρακτηριστικών: (a) μέγιστης και μέσης ανακλαστικότητας, (b) υετίσιμου νερού ανά μονάδα επιφάνειας και (c) κλίσης της μέγιστης ανακλαστικότητας, των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010.

mm/hr το Φεβρουάριο. Οι σχετικά μεγάλες τιμές ρυθμού βροχόπτωσης κατά τη θερμή περίοδο, μάλλον υποδηλώνουν την ύπαρξη αυτών των πολύ επιθυμητών ενσωματωμένων στα ορογραφικά νέφη ανοδικών κινήσεων «embedded convection», που συνεισφέρουν τα μέγιστα στη δυνητικότητα σχηματισμού βροχόπτωσης.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι κατά μήνα κατανομές των μικροφυσικών και δυναμικών χαρακτηριστικών: (α) της μέγιστης και μέσης ανακλαστικότητας, (β) του υετίσιμου νερού ανά μονάδα επιφάνειας και (γ) της κλίσης της μέγιστης ανακλαστικότητας, των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης 2006 με 2010 (Tympanidis et al., 2017). Συγκεκριμένα, οι κατανομές στο (α) και (β) παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα. Χαρακτηριστικές είναι οι υψηλές τιμές της μέγιστης και μέσης ανακλαστικότητας, αλλά και του διαθέσιμου υετίσιμου νερού ανά μονάδα επιφάνειας, των ορογραφικών νεφών, για τους μήνες της θερμής περιόδου και όχι μόνο. Το εύρος της μέγιστης ανακλαστικότητας κυμαίνεται από 48,4 dBz τον Ιούλιο έως 36,2 dBz το Φεβρουάριο. Η παρουσία των επιθυμητών ενσωματωμένων στα ορογραφικά νέφη ανοδικών κινήσεων «embedded convection», γίνεται αισθητή στην παράμετρο του διαθέσιμου υετίσιμου νερού ανά μονάδα επιφάνειας, όπου η συνεισφορά αυτής κατά την ψυχρή περίοδο μόλις φθάνει στο 15,4 % του συνολικού ποσού, ενώ η συνεισφορά της παραμέτρου κατά τη θερμή περίοδο είναι 84,6 %. Η πολύ χαμηλή τιμή της κλίσης της μέγιστης ανακλαστικότητας των ορογραφικών νεφών (Σχήμα 4.4 (γ)) κατά το μήνα Απρίλιο φαίνεται να αντιστοιχεί απόλυτα με τη μεγάλη αύξηση της μέγιστης και μέσης ανακλαστικότητας μεταξύ Μαρτίου και Απριλίου.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι κατά μήνα ετήσιες κατανομές των κινηματικών χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010. Συγκεκριμένα απεικονίζονται: (α) η ταχύτητα κίνησης, (β) η ζωνική συνιστώσα και (γ) η μεσημβρινή συνιστώσα, της ταχύτητας κίνησης των ορογραφικών νεφών. Η ταχύτητα κίνησης των ορογραφικών νεφών φαίνεται να μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, όπως αναμενόταν, με ταχύτητες μεταξύ 25,9 km/hr (Φεβρουάριος) και 38,0 km/hr (Μάιος), ενώ η παρατηρούμενη ελάχιστη ταχύτητα ήταν 15,8 km/hr (Αύγουστος). Τα Σχήματα 4.5 (β)

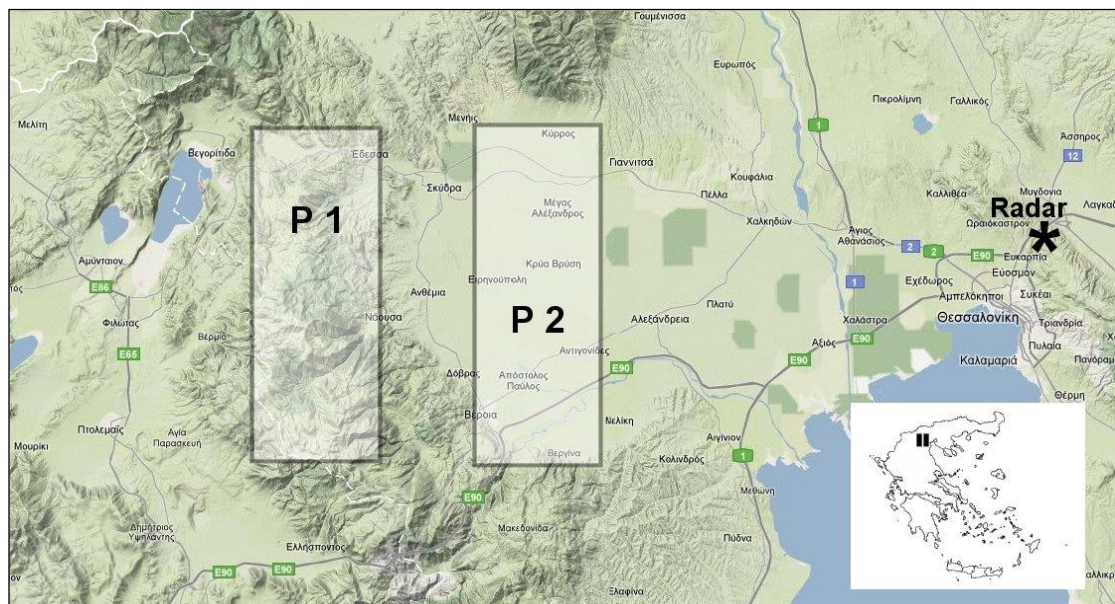


Σχήμα 4.5. Μηνιαίες κατανομές των κινηματικών χαρακτηριστικών: (a) ταχύτητας κίνησης, (b) ζωνικής συνιστώσας και (c) μεσημβρινής συνιστώσας, των ορογραφικών νεφών, που παρατηρήθηκαν πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην κεντρική Μακεδονία, για την περίοδο μελέτης, 2006 με 2010.

και (c), όπου απεικονίζονται η ζωνική και η μεσημβρινή συνιστώσα της κίνησης των ορογραφικών νεφών, φαίνονται να συνθέτουν ουσιαστικά την τελική κίνηση των συστημάτων. Χαρακτηριστικές είναι οι ασθενείς μεσημβρινές και μέτριες ζωνικές ταχύτητες, αντίστοιχα.

4.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία

Με αντικειμενικό σκοπό τη σύγκριση των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών με μη ορογραφικά νέφη γειτονικής περιοχής, επιλέχθηκαν δύο ισοδύναμες περιοχές, μία ορεινή (P1) και μία πεδινή (P2), της Κεντρικής Μακεδονίας, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6. Η περιοχή P1 είναι η περιοχή της οροσειράς του Βερμίου στην Κεντρική Μακεδονία, και καλύπτει 150 km² (μέσο υψόμετρο 927 μ.), ενώ η πεδινή περιοχή P2, που καλύπτει και αυτή 150 km², βρίσκεται ανατολικά και παράλληλα της P1, με μέσο υψόμετρο 51 μ. Επίσης, απεικονίζεται η θέση του μετεωρολογικού radar [Φίλυρο (40.672 ° N, 23.014 ° E)], που βρίσκεται βορειοανατολικά της Θεσσαλονίκης και βόρεια του αεροδρομίου «Μακεδονία» (Tympanidis et al., 2012).



Σχήμα 4.6. Οι γειτονικές περιοχές μελέτης των ορογραφικών νεφών (P1) και μη ορογραφικών νεφών (P2) της κεντρικής Μακεδονίας, για τη χρονική περίοδο 2008 με 2010 (Πηγή: Tympanidis et al., 2012).

Η συγκριτική μελέτη πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας δεδομένα του ραντάρ καιρού, που λαμβάνονται από το C-band ραντάρ που βρίσκεται στην περιοχή του Φυλίου, καθώς και το σύστημα TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting - NCAR) για την επεξεργασία και ανάλυση των παρατηρήσεων του ραντάρ (Dixon and Wiener, 1993; Μπαμπζέλης, 2013).

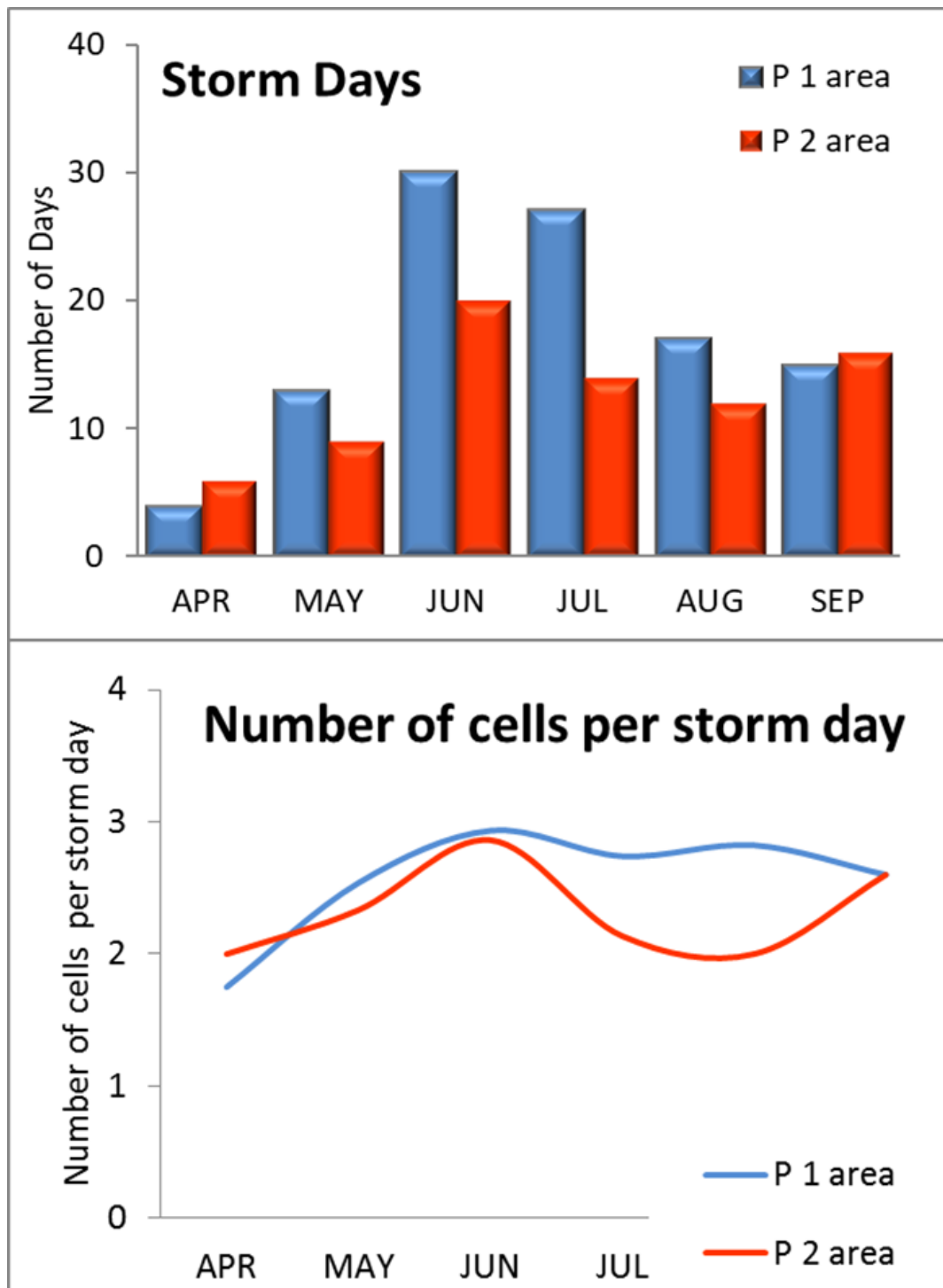
Ο αντικειμενικός στόχος είναι: να αναλυθούν, να περιγραφούν και να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών της περιοχής P1, με αυτά των μη ορογραφικών νεφών της περιοχής P2, και κατόπιν να εντοπιστούν οι μηνιαίες διαφορές μεταξύ τους. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια εντοπισμού και σύγκρισης των μηχανισμών που επηρεάζουν τη δημιουργία, ανάπτυξη, ένταση και κίνηση των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών των δύο επιλεγμένων περιοχών.

Η συγκριτική αυτή μελέτη εκπονείται κατά τη διάρκεια των μηνών Απρίλιος-Σεπτέμβριος για την τριετή περίοδο 2008 έως 2010. Οι μετρήσεις αυτές προέρχονται ως αποτέλεσμα της εκπόνησης του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των Καλλιεργειών (Karacostas, 1984; Karacostas, 1989).

4.3.1 Σύγκριση χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία

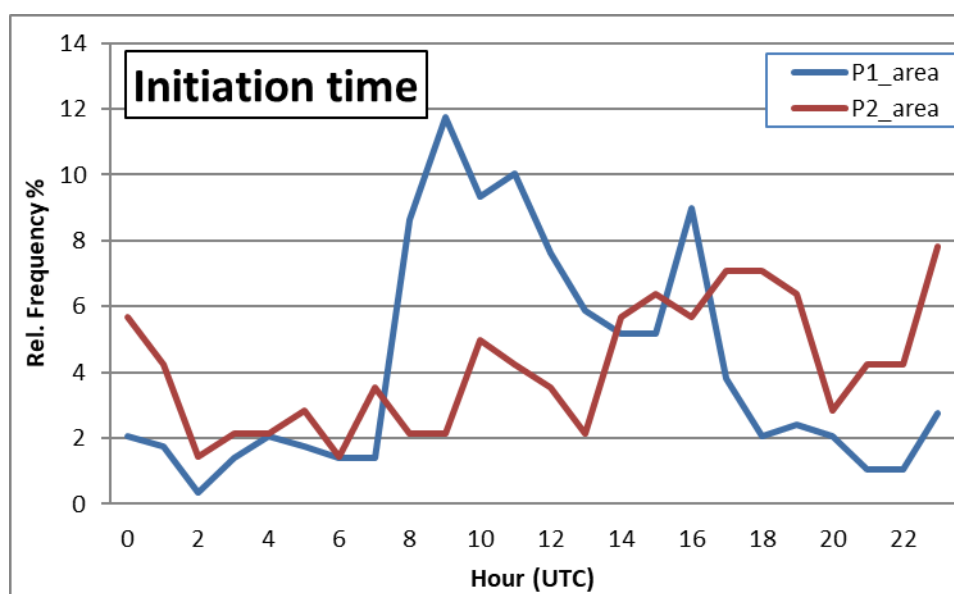
Με την εφαρμογή όλων των παραπάνω κριτηρίων, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 4.7, προκύπτουν συνολικά 106 ημέρες καταιγίδας με 289 διακριτά κύτταρα ανάπτυξης για την περιοχή P1 (ορεινή περιοχή) και 77 ημέρες καταιγίδας με 141 διακριτά κύτταρα για την περιοχή P2 (πεδινή περιοχή) (Tympanidis et al., 2012). Είναι προφανές ότι στην ορεινή περιοχή (P1) παρατηρούνται περισσότερες ημέρες καταιγίδας και πολλά περισσότερα κύτταρα ανάπτυξης από την πεδινή (P2). Από την μηνιαία κατανομή του αριθμού των ημερών καταιγίδας, αλλά και του αριθμού των κυττάρων που αναπτύχθηκαν ανά ημέρα καταιγίδας, παρατηρείται ότι η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό ίσως να οφείλεται στην περιορισμένη συνθήκη θερμικής αστάθειας στην περιοχή P2 και συγχρόνως στον υφιστάμενο μηχανισμό μηχανικής αστάθειας στην περιοχή P1, λόγω της παρουσίας της οροσειράς του Βερμίου. Ο αριθμός των κυττάρων ανά ημέρα καταιγίδας και για τις δύο περιοχές παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά, εκτός από τον Ιούλιο και τον Αύγουστο για τον προαναφερθέντα λόγο.

Για τη σύγκριση μεταξύ των δύο περιοχών P1 και P2, υπολογίστηκαν σχετικές συχνότητες για κάθε ημέρα καταιγίδας, για κάθε κύτταρο ανάπτυξης και για κάθε περιοχή. Το Σχήμα 4.8 απεικονίζει την ώρα εμφάνισης των ορογραφικών και μη ορο-



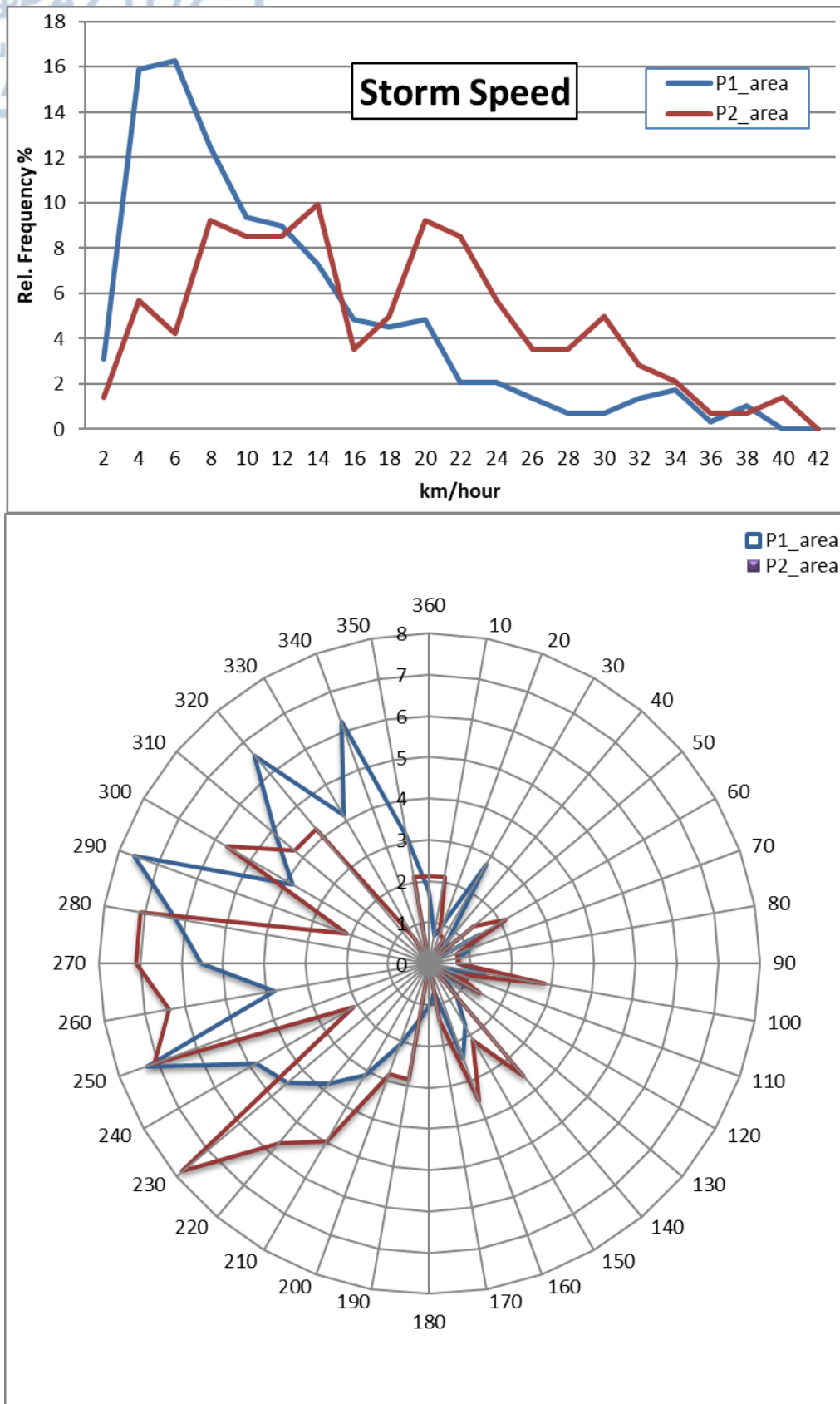
Σχήμα 4.7. Μηνιαία κατανομή του συνολικού αριθμού ημερών καταιγίδας (επάνω) και του αριθμού διακριτών κυττάρων που αναπτύχθηκαν ανά ημέρα καταιγίδας (κάτω), για περιοχές P1 και P2.

γραφικών νεφών στις δύο περιοχές ενδιαφέροντος. Γενικά παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές σε ορισμένα κυτταρικά χαρακτηριστικά και παρόμοιες συμπεριφορές με κάποια άλλα. Τα μελετώμενα κύτταρα ανάπτυξης εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά οι συχνότητες εμφάνισης μεγιστοποιούνται σε διαφορετικές ώρες. Όπως αναμενόταν, στην ορεινή περιοχή (P1) εμφανίζονται νωρίτερα από ότι στην πεδινή (P2). Το δευτερεύον μέγιστο για την περιοχή P2 (περίπου 00:00 UTC) πιθανότατα οφείλεται σε κύτταρα που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια της προηγούμενης ημέρας και συνεχίζουν να υπάρχουν μετά τα μεσάνυχτα.



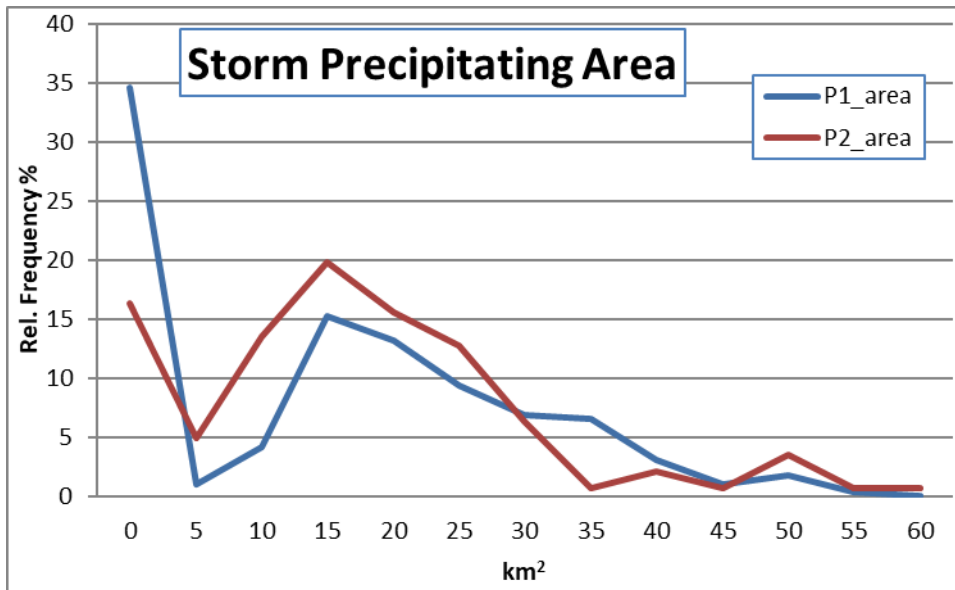
Σχήμα 4.8. Ωριαία κατανομή της ώρας εμφάνισης των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στις δύο περιοχές P1 και P2.

Η ταχύτητα κίνησης των κυττάρων των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, στις δύο υπό μελέτη περιοχές P1 και P2, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9 (επάνω). Η διαφορά κίνησης των συστημάτων μεταξύ των δύο περιοχών είναι αισθητή, καθώς τα περισσότερα ορογραφικά νέφη κινούνται με 6 km/hr, ενώ η συχνότητα κίνησης των μη ορογραφικών νεφών μεγιστοποιείται στα 14 και 20 km/hr, υποδηλώνοντας έτσι ότι η κίνηση στην ορεινή περιοχή είναι πιο αργή, πιθανώς λόγω των εδαφικών ανωμαλιών και των υφιστάμενων εμποδίων. Η διεύθυνση κίνησης των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, δηλαδή και για τις δύο περιοχές P1 και P2, είναι περίπου κοινή και κυρίως από νοτιοδυτικά και βορειοδυτικά προς βορειοανατολικά και νοτιοανατολικά (Σχήμα 4.9 (κάτω)).



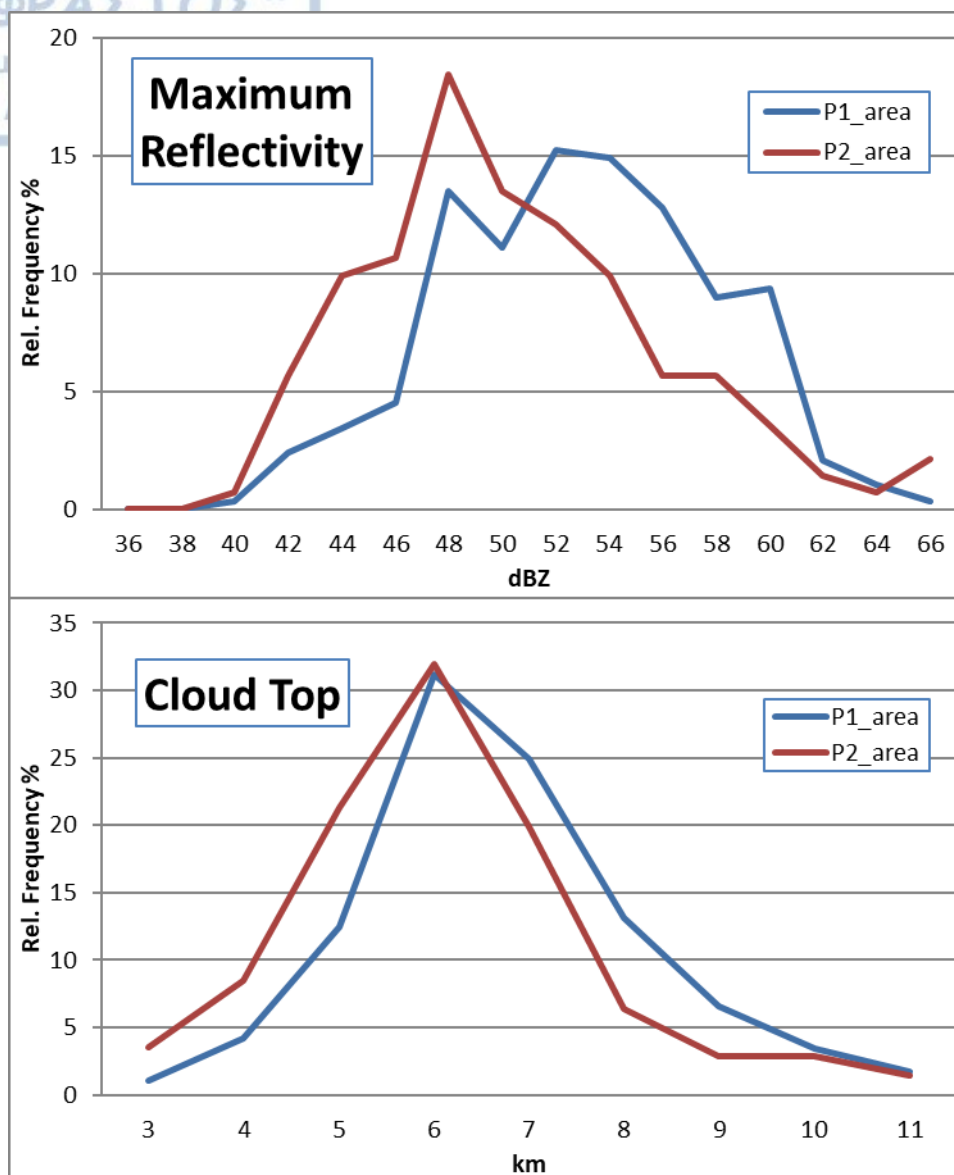
Σχήμα 4.9. Σχετικές συχνότητες της ταχύτητας κίνησης (επάνω) και διεύθυνσης της κίνησης των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στις δύο περιοχές P1 και P2.

Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται το εμβαδόν της περιοχής υετού των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, παρουσιάζοντας ορισμένες διαφορές. Συγκεκριμένα, το 35% των ορογραφικών νεφών (περιοχή P1) δεν έχουν τη δυνητικότητα παροχής υετού, ενώ για τα μη ορογραφικά νέφη (περιοχή P2) μόνο το 15%, υποδηλώνοντας ότι ένας ορισμένος αριθμός κυττάρων που αναπτύσσονται πάνω από την ορεινή περιοχή δεν είναι ικανά, από μόνα τους, να δώσουν βροχή.



Σχήμα 4.10. Σχετικές συχνότητες του εμβαδού της περιοχής υετού των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών για τις δύο περιοχές P1 και P2.

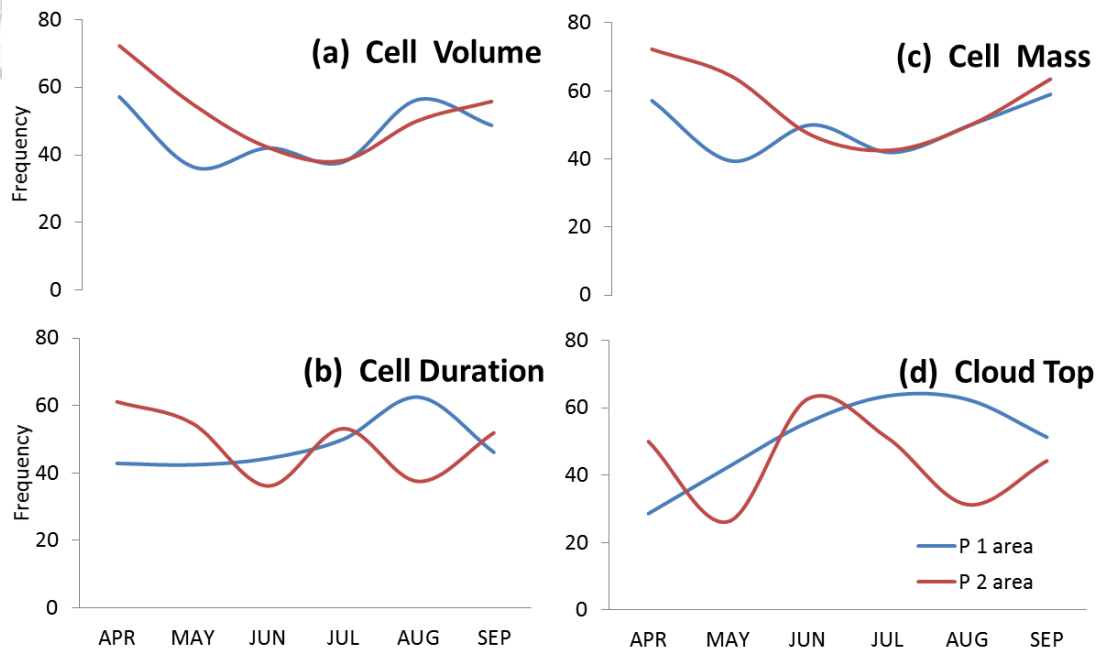
Σύμφωνα με το Σχήμα 4.11, μια άλλη αξιοσημείωτη διαφορά φαίνεται να υπάρχει ως προς τη μέγιστη ανακλαστικότητα και του ύψους των κορυφών των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών. Αν και η κατανομή των κορυφών των νεφών στις δύο περιοχές P1 και P2 φαίνεται να έχει παρόμοια συμπεριφορά, η κατανομή της μέγιστης ανακλαστικότητας διαφέρει, με τη σχετική συχνότητα να μεγιστοποιείται στα 52-54 dBz για την περιοχή P1 και στα 48 dBz για την περιοχή P2, υποδηλώνοντας ότι στην ορεινή περιοχή δημιουργούνται πολύ πιο έντονες καταιγίδες από την πεδινή.



Σχήμα 4.11. Σχετικές συχνότητες της μέγιστης ανακλαστικότητας και του ύψους της κορυφής των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών για τις δύο περιοχές P1 και P2 (Πηγή: Tympanidis et al., 2017). .

4.3.2 Μηνιαία σύγκριση των χαρακτηριστικών ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών στην Κεντρική Μακεδονία

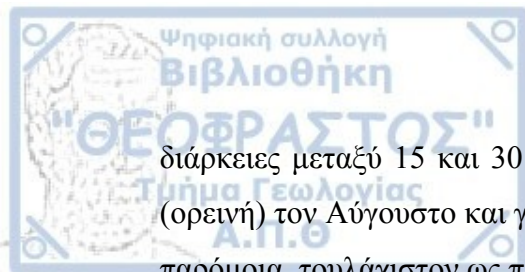
Τα χαρακτηριστικά των διακριτών κυττάρων, που δεν αποκάλυψαν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ των δύο περιοχών, αναλύονται περαιτέρω σε μια προσπάθεια σύγκρισης της μηνιαίας κατανομής αυτών των χαρακτηριστικών (Tympanidis et al., 2012). Συνεπώς, οι τιμές σχετικής συχνότητας των χαρακτηριστικών των διακριτών κυττάρων ομαδοποιούνται για κάθε περιοχή μελέτης και οι τελικές σχετικές συχνότητές τους συγκρίνονται, σε μηνιαία βάση.



Σχήμα 4.12. Μηνιαία κατανομή των σχετικών συχνοτήτων: (a) του όγκου, (b) της χρονικής διάρκειας, (c) της μάζας και (d) του ύψους της κορυφής των κυττάρων των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών για τις δύο περιοχές P1 και P2 (Πηγή: Tympanidis et al., 2012).

Με βάση τα παραπάνω, οι σχετικές συχνότητες των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών ομαδοποιούνται ως εξής: διάρκεια κυττάρου 15-30 λεπτά, όγκος κυττάρου 20-40 km³ και μάζα κυττάρου 10-30 ktons, για κάθε μία περιοχή (Tympanidis, 2012). Τα προκύπτοντα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.12. Από το διάγραμμα της μηνιαίας σύγκρισης των κατανομών των σχετικών συχνοτήτων, παρατηρείται ότι η μάζα και ο όγκος των κυττάρων έχουν σχεδόν ταυτόσημη γενική συμπεριφορά μεταξύ των δύο περιοχών P1 και P2. Έτσι, τα κύτταρα που έχουν όγκο μεταξύ 20-40 km³ και μάζα 10-30 ktons, εμφανίζονται να έχουν χαμηλότερες σχετικές συχνότητες στην περιοχή P1 (ορεινή) κατά τον Απρίλιο και το Μάιο, σε σχέση με την περιοχή P2 (πεδινή). Περαιτέρω ανάλυση αυτού δείχνει την ανάπτυξη περισσότερων κυττάρων με αυξημένο όγκο και μάζα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και για τις δύο περιοχές, αλλά αυτό το φαινόμενο είναι λίγο πιο έντονο για την περιοχή P2 προς το τέλος της θερμής περιόδου.

Η σχετική συχνότητα της διάρκειας ζωής των κυττάρων, ως συνάρτηση των καλοκαιρινών μηνών για τις δύο περιοχές P1 και P2, αποκαλύπτει επίσης κάποιες διαφορές όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 4.12. Παρατηρείται δηλαδή ότι οι



διάρκειες μεταξύ 15 και 30 λεπτών είναι περισσότερο εμφανείς για την περιοχή P1 (ορεινή) τον Αύγουστο και για την περιοχή P2 (πεδινή) τον Απρίλιο και Μάιο. Σχεδόν παρόμοια, τουλάχιστον ως προς το σχήμα, είναι και η μηνιαία κατανομή των σχετικών συχνοτήτων για το ύψος της κορυφής των κυττάρων. Η μικρή διαφοροποίηση φαίνεται να είναι ως προς τη χρονική έκταση.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1 Σύνοψη

Αντικειμενικός στόχος στη μελέτη αυτή είναι, να μελετηθεί, κατά πόσο θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένα πρόγραμμα αύξησης βροχόπτωσης στο Βόρειο Ελλαδικό χώρο -και συγκεκριμένα στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας- ως εναλλακτικός τρόπος αύξησης της διαθέσιμης ποσότητας νερού και κατά συνέπεια της ικανοποίησης, μέχρι ενός σημείου, των αυξανόμενων αναγκών σε νερό λόγω λειψυδρίας και τυχόν κλιματικής μεταβολής.

Χρησιμοποιώντας όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα και κυρίως τα πολύ χρήσιμα δεδομένα του ραντάρ καιρού (C-band) κατά τη διάρκεια ολοκλήρου του έτους (εκτός Ιανουαρίου) και για πέντε (5) χρόνια (2006 – 2010), εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών πάνω από την ορεινή περιοχή του Βερμίου της Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και των γύρω περιοχών για συγκριτικούς σκοπούς.

Τα μελετώμενα ορογραφικά νέφη δημιουργήθηκαν, αναπτύχθηκαν και δομήθηκαν μέσω διάφορων μηχανικών -ή/και θερμικών- μηχανισμών, όπως μέτρων ζωνικών ή και έντονων ανέμων, με αέριες μάζες υψηλής υγρασίας, που προηγούνται -ή και έπονται- μιας ατμοσφαιρικής διαταραχής της ανώτερης ατμόσφαιρας. Τέτοιες

διαταραχές συνήθως αυξάνουν τη ροή του ανέμου, κυρίως κάθετα προς την οροσειρά, με αποτέλεσμα, να αυξάνεται ο ρυθμός της μηχανικής ανύψωσης λόγω της ορογραφίας, που με την επικουρική βοήθεια από τις ανοδικές κινήσεις (convection) που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της θέρμανσης του ορεινού όγκου και της εξαναγκασμένης θερμικής ανωμεταφοράς, συντελούν στην εκτόνωση της αέριας μάζας, στην ψύξη αυτής και τελικά στο σχηματισμό των ορογραφικών νεφών (Καρακώστας, 2007; Πυθαρούλης 2008). Τα χαρακτηριστικά αυτών των νεφών παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς σχηματίζονται και κατά τη διάρκεια των ψυχρών και ενδιάμεσων μηνών του έτους, παρουσιάζοντας τις πολύ επιθυμητές ενσωματωμένες στα ορογραφικά νέφη ανοδικές κινήσεις «embedded convection», που συνεισφέρουν τα μέγιστα στη δυνητικότητα σχηματισμού βροχόπτωσης.

5.2 Συμπεράσματα

Η ετήσια παρατήρηση, μελέτη και παρουσίαση των χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών, καθώς και η σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα των γειτονικών μη ορογραφικών νεφών, αποτελεί μια πρωτοτυπία, χωρικά και εθνικά. Συγχρόνως, παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον, προσδίδοντας μια ολοκληρωμένη δυνητικότητα εφαρμογής προγραμμάτων Τροποποίησης του Καιρού.

Τα θερμοδυναμικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών, όπως αναμενόταν, φαίνεται να είναι πιο έντονα κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους και λιγότερο -αλλά αρκετά ενδιαφέροντα από πλευράς Τροποποίησης του Καιρού- κατά τη διάρκεια της ψυχρής.

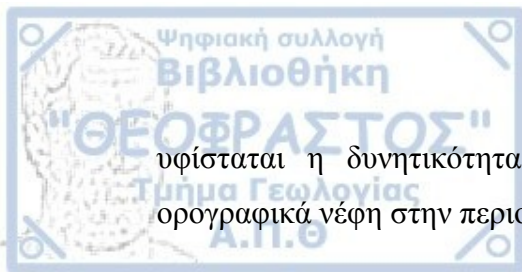
Οι πολύ επιθυμητές, ενσωματωμένες στα ορογραφικά νέφη ανοδικές κινήσεις «embedded convection», που συνεισφέρουν τα μέγιστα στη δυνητικότητα σχηματισμού βροχόπτωσης, φαίνεται να σχετίζονται με τα μελετώμενα ορογραφικά νέφη, ακόμη και με εκείνα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, παρέχοντας έτσι τη δυνητικότητα εφαρμογής προγραμμάτων αύξησης υετού, μέσω ορογραφικών νεφών, στην Βόρεια Ελλάδα.

Με βάση τη μελέτη των δομικών, θερμοδυναμικών, δυναμικών, μικροφυσικών και κινηματικών χαρακτηριστικών των ορογραφικών νεφών πάνω από τον ορεινό όγκο του Βερμίου της Κεντρικής Μακεδονίας, για την περίοδο 2006 έως και 2010 (εκτός του μηνός Ιανουαρίου), προκύπτει ότι:

Από τη συγκριτική μελέτη των χαρακτηριστικών των κυττάρων των ορογραφικών νεφών πάνω από τον ορεινό όγκο του Βερμίου (περιοχή P1) και των κυττάρων των μη ορογραφικών νεφών στην πεδινή περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας (περιοχή P2), προκύπτει ότι:

- Στην ορεινή περιοχή P1 απαντώνται πολύ περισσότερα κύτταρα και κατ' επέκταση πολλά περισσότερα ορογραφικά νέφη, από αυτά που εμφανίζονται στην πεδινή περιοχή P2, και ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.
- Τα κύτταρα που αναπτύσσονται πάνω από την ορεινή περιοχή P1, εμφανίζονται νωρίτερα μέσα στην ημέρα (1^ο μέγιστο 09:00-11:00 UTC, 2^ο μέγιστο 16:00 UTC), κινούνται πιο αργά (6 km/hr) και έχουν υψηλότερες μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας (52-54 dBz).
- Τα κύτταρα που αναπτύσσονται πάνω από την πεδινή περιοχή P2, εμφανίζονται αργότερα μέσα στην ημέρα (1^ο μέγιστο 14:00-19:00 UTC, 2^ο μέγιστο 23:00-01:00 UTC), κινούνται πιο γρήγορα (14 και 20 km/hr) και έχουν χαμηλότερες μέγιστες τιμές ανακλαστικότητας (48 dBz).
- Το 35% των διακριτών κυττάρων που αναπτύσσονται πάνω από την ορεινή περιοχή P1 δεν έχουν από μόνα τους τη δυνητικότητα παροχής νετού, δηλαδή θα μπορούσαν να είναι ευνοϊκά για εφαρμογή προγραμμάτων αύξησης βροχής, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για την πεδινή περιοχή P2 είναι μόνο 15%.
- Αν και ο όγκος και η μάζα των διακριτών κυττάρων, και κατ' επέκταση των ορογραφικών και μη ορογραφικών νεφών, δεν παρουσιάζουν εμφανείς διαφορές μεταξύ τους, μια πιο ενδελεχής έρευνα στις μηνιαίες σχετικές συχνότητες εμφάνισης των κυττάρων αποκαλύπτει την ανάπτυξη περισσότερων κυττάρων με αυξημένο όγκο και μάζα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και για τις δύο περιοχές (P1 και P2), αλλά αυτό το φαινόμενο είναι λίγο πιο έντονο για την πεδινή περιοχή P2 προς το τέλος της θερμής περιόδου.
- Η διάρκεια ζωής των κυττάρων είναι σχεδόν κοινή και στις δύο περιοχές (15 με 30 λεπτά), αλλά οι σχετικές συχνότητες εμφάνισης μεγιστοποιούνται τον Αύγουστο για την ορεινή περιοχή P1 και τον Απρίλιο για την πεδινή περιοχή P2.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω μετεωρολογικές πληροφορίες, τα συμπερασματικά αποτελέσματα της μελέτης και ενσωματώνοντας για πρώτη φορά τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των ορογραφικών νεφών και κατά τη χειμερινή περίοδο, δηλαδή έχοντας ένα πλήρες αρχείο των απαραίτητων δεδομένων, συμπεραίνεται ότι



υφίσταται η δυνητικότητα εφαρμογής προγράμματος αύξησης του νετού από ορογραφικά νέφη στην περιοχή ενδιαφέροντος της Βόρειας Ελλάδας.

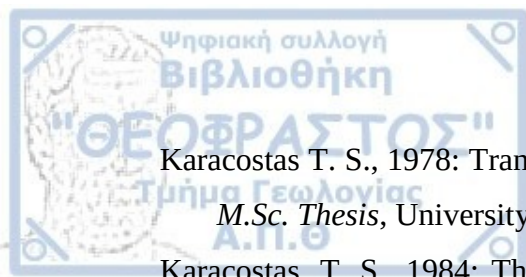
5.3 Προοπτικές

Επιπρόσθετα, η επιτυχής εφαρμογή του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των καλλιεργειών από το 1984 έως σήμερα, παρέχει τα εχέγγυα για την περεταίρω επιτυχή επέκταση προγραμμάτων Τροποποίησης του Καιρού, στην προκειμένη περίπτωση αύξησης βροχής, στην περιοχή ενδιαφέροντος της Βόρειας Ελλάδας. Το συμπέρασμα-πρόταση βασίζεται, στα παραπάνω αποτελέσματα της μελέτης, και επιπρόσθετα στην υφιστάμενη επιστημονική γνώση, στην υπάρχουσα εμπειρία, υποδομή, αλλά και στην απαραίτητη τεχνολογία. Όμως, βασική και απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκπόνηση μελετών: σκοπιμότητας, βιωσιμότητας και τεχνο-οικονομικής. Διότι, τέτοιου είδους προγράμματα, προγράμματα αύξησης νετού, κρίνονται απολύτως απαραίτητα, επειδή επιβοηθούν το πρόβλημα του αιώνα μας, τη λειψυδρία!

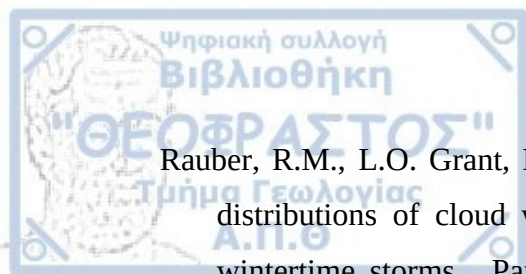


- Bampzelis D., T. S. Karacostas, 2012: Radar derived storm characteristics over central Greece. *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Springer Atmospheric Sciences*, 27-33, DOI 10.1007/978-3-642-29172-2_5.
- Battan, L. J., 1973: *Radar observation of the atmosphere*. The University of Chicago Press, 324 pp.
- Breed, D., R. Rasmussen, C. Weeks, B. Boe, and T. Deshler, 2014: Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 282–299, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0128.1>.
- Brown, K. J., Elliott, R. D., and J. R. Thompson, 1976: Paper presented at WMO Scientific Conf. Weather Modification, Boulter, 2nd, 1976, p. 465.
- Cooper, W. A., and P. Lawson, 1984: Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment. *AMS Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 523-540.
- Dennis, A. S., and D. F. Kriege, 1966: Analysis of the Santa Clara operations. *Journal of Applied Meteorology*, 5, 684-691.
- Dennis, A. S., 1980: *Weather Modification by Cloud Seeding*. International Geophysics Series, Vol. 24, Academic Press, New York, 267 pp.
- Dixon M., and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting: A radar-based methodology. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 10, 6, 785-797.
- Elliott, R. D., and W. A. Lang, 1967: Weather modification in the southern Sierra. *J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 5644, IR4, 45-49.
- Elliott, R. D., R. W. Scafer, A. Court and J. F. Hannaford, 1978: Randomized cloud seeding in the San Juan Mountains, Colorado. *Journal of Applied Meteorology*, 17, 1298-1318.
- Gagin, A., and J. Neumann, 1981: The second Israeli randomized cloud seeding experiment: evaluation of the results. *AMS Journal of Applied Meteorology*, 20, 1301-1311.

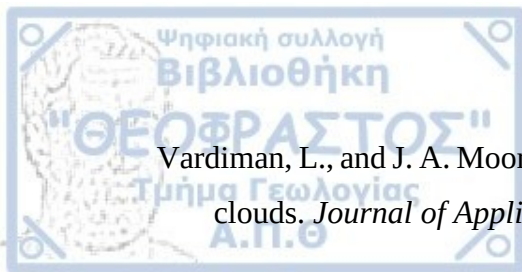
- Gagin A., D. Rosenfeld and R. E. Lopez, 1985: The relationship between height and precipitation characteristics of summertime convective cell in South Florida. *Journal of Atmospheric Science*, 42, 84-94.
- Goudenhoofdt E., M. Reyniers, L. Delobbe, 2010: Long term analysis of convective storm tracks based on C-band radar reflectivity measurements. *Sixth European Conference on radar in meteorology and hydrology*, Sibiu, Romania, 6-10 September 2010.
- Grant, L. O., and P. W. Jr., Mielke, 1967: Cloud seeding experiment at Climax, Colorado, 1960-65. *Proceedings of the Fifth Berkley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. V: Weather Modification Experiments (L. LeCam and J. Neyman, eds.), University of California Press, 115-131.
- Grant, L. O., and A. M. Kahan, 1974: Weather modification for augmenting orographic precipitation. In *Weather and Climate Modification*. W. Hess, John Wiley and Sons, Ed., 282-317.
- Grant, L. O. and R. D. Elliott, 1974: The cloud seeding temperature window. *AMS Journal of Applied Meteorology*, 13, 355-363.
- Grant, L., 1986: Hypotheses for the Climax wintertime orographic cloud seeding experiments. *Precipitation Enhancement – A Scientific Challenge, Meteorological Monograph, No. 43*, American Meteorological Society, 105-108.
- Griffith, D. A., J. R. Thompson and D. A. Risch, 1991: A Winter Cloud Seeding Program in Utah. *WMA Journal of Weather Modification*, 23, 27-34.
- Griffith, D. A., J. R. Thompson, D. A. Risch, and M. E. Solak, 1997: An update on a winter cloud seeding program in Utah. *WMA Journal of Weather Modification*, 29, 95-99.
- Griffith, D. A., D. P. Yorty and M. E. Solak, 2004: The Development, Conduct and Evaluation of a Cloud Seeding Program for the Gunnison River Basin, Colorado during the 2003-2004 Winter season. *North American Weather Consultants Report No. WM 04-3*. Gunnison County.
- Griffith, D. A., D. P. Yorty and M. E. Solak, 2005: The Conduct and Evaluation of a Cloud Seeding Program for the Gunnison River Basin, Colorado during the 2004-2005 Winter season. *North American Weather Consultants Report No. WM 05-2*. Gunnison County.
- Huschke, R. E., 1959: *Glossary of Meteorology*. Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, pp. 638.



- Karacostas T. S., 1978: Transport and Turbulent Diffusion over Mountainous Terrain, *M.Sc. Thesis*, University of Wyoming, School of Engineering, 116 pp.
- Karacostas, T. S., 1984: The design of the Greek Hail Suppression Program. *Ninth Conference on Weather Modification*. Amer. Meteor. Soc., Park City, Utah, U.S.A., 26-27.
- Karacostas, T. S., 1989: The Greek national suppression program: design and contact of the experiment, *Proc. 5st WMO Science Conference on weather modification and applied cloud physics*, 605-608.
- Kraus, E. B., and P. A. Squires, 1947: Experiments on the stimulation of clouds to produce rain. *Nature*, 159, 489-492.
- List, R., 1979: *Cloud Physics and Weather Modification*. WMO training workshop on weather modification for meteorologists (Lecture Notes), p.17-30
- Marwitz, J. D., 1980: Winter storms over the San Juan Mountains. Part I: dynamical processes., *Journal of Applied Meteorology*, 19 (8), 913-926.
- Mason, B. J., 1971: *The Physics of clouds*. Clarendon Press, Oxford, University Press, 671 pp.
- Mielke, P. W. (1979a). Commun. Statist. A-Theory Methods A8, 1083 – 1096
- Mielke, P. W., L. O. Grant and C. F. Chappell, 1971: An independent replication of the Climax wintertime orographic cloud seeding experiment. *AMS Journal of Applied Meteorology*, 10, 1198-1212.
- Mielke, P. W. Jr., L. O. Grant, G. J. Mulvey and P. N. Rosenzweig, 1981: A statistical reanalysis of the replicated CLIMAX I and II wintertime orographic cloud seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 20, 643-659.
- Rangno, A. L. and P. V. Hobbs, 1987: Reevaluation of the Climax cloud seeding experiments using NOAA published data. *AMS Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 757-762.
- Rangno, A. L. and P. V. Hobbs, 1993: Further analyses of the Climax cloud seeding experiments. *AMS Journal of Applied Meteorology*, 32, 1837-1847.
- Rasmussen, R. M., S. A. Tessendorf, L. Xue, C. Weeks, K. Ikeda, S. Landolt, D. Breed, T. Deshler and B. Lawrence, 2018: Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) Using Two Approaches: Traditional Statistics and Ensemble Modeling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57, 2639- 2660.



- Rauber, R.M., L.O. Grant, D. Feng and J.B. Snider, 1986: The characteristics and distributions of cloud water over the mountains of northern Colorado during wintertime storms. Part I: temporal variations. *AMS Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 469-488.
- Smith, E. J. (1974). In “Weather and Climate Modification” (W. N. Hess, ed), pp. 432-453. Wiley, New York.
- Smith, E. J., Adderley, E. E., Veitch, L., and Turton, E. (1971). Proc. Int. Conf. Weather Modification, Carderra, 1971, pp. 91.
- Solak, M. E., D. P. Yorty and D. A. Griffith, 2003: Target/Control Evaluation of the Denver Board of Water Commissioners Winter Snowpack Enhancement Project, 2002-2003. *NAWC Report No. WM 03-2*. Denver Board of Water Commissioners.
- Stauffer, N.E., Jr., 2001: Cloud Seeding – The Utah Experience. *WMA Journal of Weather Modification*, 33, 70-73.
- Strong, G. S., and W. D. Wilson, 1983: The synoptic index of convection, Part 2: Applications to regional forecasts of convective complexes. *17th CMOS Congr.*, Banff, Alberta, May 3-5, 18.
- Super, A.B., and J.A. Heimbach, Jr., 1983: Evaluation of the Bridger Range Winter Cloud Seeding Experiment Using Control Gages. *AMS Journal of Applied Meteorology*, 22, p. 1989-2011.
- Tympanidis, K., Theodore S. Karacostas and D. Bampzelis. 2017. Rain Enhancement Feasibility Potential of Orographic Clouds over Northern Greece. 323-328. In: *Perspectives on Atmospheric Sciences, Vol. 1*. Edited by: T. S. Karacostas, A. F. Bais and P. T. Nastos, Springer Atmospheric Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1259pp. ISBN 978-3-319-35094-3, ISBN 978-3-319-35095-0 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-35095-0.
- Tympanidis, K., D. Bampzelis, T. Karacostas and E. Chatzi, **2012**: A Comparison of Storm Characteristics between Mountainous and Plain Areas within Central Macedonia. 333-339. In: *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Vol. 1*. Edited by: C. G. Helmis and P. Nastos, Springer Atmospheric Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 839pp. ISBN 978-3-642-29172-5, ISBN 978-3-642-29172-2 (eBook), DOI 10.1007/978-3-642-29172-2.
- Vardiman, L., and J. A. Moore, 1977: *Skywater Monograph, No 1*, 91 pp., Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior, Denver. Colorado.



Vardiman, L., and J. A. Moore, 1978: Generalized criteria for seeding winter orographic clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 17, 1769-1777.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Καρακώστας, Θ. Σ., 2007: *Σημειώσεις Φυσικής των Νεφών και Τροποποίησης Καιρού*.

Α.Π.Θ., Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη, σελ. 76.

Καρακώστας, Θ., 2002: *Αξιολόγηση του Εθνικού Προγράμματος Χαλαζικής Προστασίας των Καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 128σελ.

Μπαμπζέλης, Δ. 2013: Διερεύνηση συνθηκών εφαρμογής προγραμμάτων αύξησης βροχής: εφαρμογή στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας. *Διδακτορική Διατριβή*, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Α.Π.Θ.

Πυθαρούλης, Ι., 2008: *Σημειώσεις Συνοπτικής Μετεωρολογίας*. Α.Π.Θ., Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.

Φλόκας, Α. Α., 1994: *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 465σελ.

