



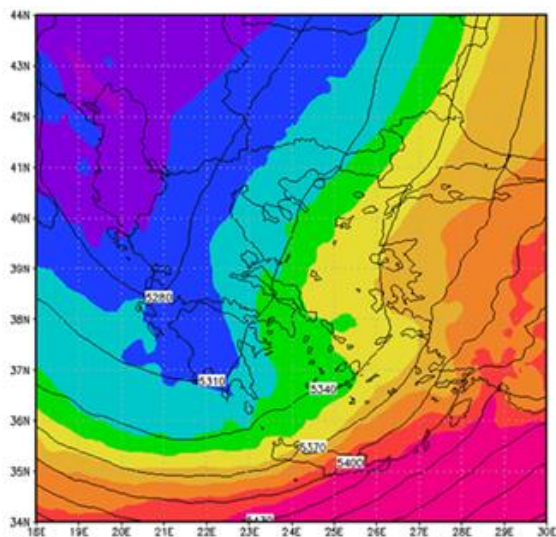
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΕΝΤΣΙΟΥ Ι. ΒΑΣΙΛΕΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΠΑΓΕΤΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΠΕΝΤΣΙΟΥ Ι. ΒΑΣΙΛΕΙΑ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5457

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΠΑΓΕΤΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Εργαστήριο
Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων

Αναπληρωτής καθηγητής: Πυθαρούλης Ιωάννης



© Πέντσιου Ι. Βασιλεία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΠΑΓΕΤΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ – *Διπλωματική Εργασία*

© Vasileia I. Pentsiou, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2020

All rights reserved.

STUDY OF THE STRUCTURE OF THE TROPOSPHERE DURING FROST EVENTS IN THESSALONIKI – *Bachelor Thesis*



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.

Εικόνα Εξωφύλλου: Χάρτης 500hPa 07 Ιανουαρίου 2017 00UTC, Πέντσιου Βασιλεία



Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν και συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωσή της.

Πρώτο απ' όλους ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Πυθαρούλη, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας, αλλά και όλων των σπουδών μου.

Ακόμη, ευχαριστώ το Περιφερειακό Μετεωρολογικό Κέντρο Μακεδονίας (ΠΜΚΜ) για την παροχή δεδομένων καθώς επίσης και για τις γνώσεις που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης, διότι χωρίς αυτά δε θα μπορούσα να πραγματοποιήσω αυτή τη μελέτη. Συγκεκριμένα, τον υπεύθυνο της πρακτικής μου άσκησης, κ. Δημήτρη Μπρίκα, για τις σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του που με κατεύθυναν σ' ένα σωστό - επιστημονικό τρόπο σκέψης.

Σημαντική ήταν η συνεισφορά της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ), του Ευρωπαϊκού Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), του Δήμου Θεσσαλονίκης και του University of Wyoming για την παροχή δεδομένων.

Ιδιαίτερα, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους καθηγητές του τμήματος Γεωλογίας και σε αυτούς του τομέα Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας, οι οποίοι με ενέπνευσαν και με παρότρυναν να ασχοληθώ με το αντικείμενο της Μετεωρολογίας.

Τέλος, στην οικογένειά μου και στους φίλους μου, για τη διαρκή στήριξη και την κατανόησή τους, σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής ζωής μου.



Ευχαριστίες.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	10
1.1 Εισαγωγικές έννοιες	10
1.2 Παγετός Μεταφοράς.....	12
1.3 Παγετός Ακτινοβολίας	14
1.4 Σύγκριση των δύο ειδών παγετού.....	16
1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον παγετό.....	16
1.6 Χαρακτηριστικά αέριας μάζας	17
1.7 Επιπτώσεις του παγετού.....	18
1.7.1 Επιπτώσεις στη γεωργία.....	18
1.7.2 Επιπτώσεις στη ζωή των πολιτών.....	19
1.7.3 Άλλα προβλήματα	20
1.8 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΑΓΕΤΟ	21
1.8.1 Γενικά.....	21
1.8.2 Προστασία για τη γεωργία.....	22
1.8.3 Αντιμετώπιση του παγετού.....	22
1.9 Προηγούμενες μελέτες.....	23
1.10 Σκοπός της εργασίας	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	26
2.1 Δεδομένα	26
2.2 Μεθοδολογία.....	26



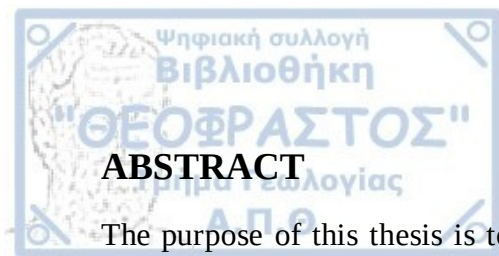
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΑΓΕΤΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΕΤΗ	28
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Ημέρες παγετού	29
3.3 Κατανομή ημερών παγετού.....	30
3.4 Κατανομή επεισοδίων παγετού	31
3.5 Ακολουθίες ημερών παγετού	32
3.6 Ελάχιστες θερμοκρασίες.....	33
3.7 Πιθανά αίτια για τις χαμηλές θερμοκρασίες στην Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017	34
3.8 Δομή της τροπόσφαιρας.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	38
4.1 Γενικά.....	38
4.2 Κατακόρυφη δομή του παγετού μεταφοράς.....	39
4.3 Κατακόρυφη δομή του παγετού ακτινοβολίας	42
4.4 Θερμοδυναμική ανάλυση των επεισοδίων παγετού	49
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	50
4.5 Σύγκριση πραγματικών ραδιοβολίσεων με κατακόρυφα προφίλ αναλύσεων ECMWF.....	51
4.6 Χαρακτηριστικά του παγετού	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

Η παρούσα εργασία μελετάει τη δομή της τροπόσφαιρας σε δύο περιπτώσεις παγετού, ακτινοβολίας και μεταφοράς, στη Θεσσαλονίκη, δίνοντας έμφαση στα συνοπτικά και θερμοδυναμικά τους χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα σταθμών, ραδιοβολίσεις και επιχειρησιακές πλεγματικές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF).

Μετά από ανάλυση των περιπτώσεων παγετού των τελευταίων 5 ετών (2015-2019), επιλέχθηκε για περαιτέρω μελέτη το πολύ ισχυρό ψυχρό επεισόδιο της περιόδου 6 έως 13 Ιανουαρίου 2017. Αυτό το επεισόδιο χαρακτηρίστηκε από εκτεταμένο παγετό, ο οποίος ήταν αρχικά παγετός μεταφοράς και στη συνέχεια ακτινοβολίας. Στη δυτική Ευρώπη είχε αναπτυχθεί ένα σύστημα υψηλών πιέσεων με αποτέλεσμα να μεταφερθούν πολικές αέριες μάζες στην κεντρική και την ανατολική Ευρώπη. Στο επίπεδο των 500 hPa εμφανίστηκε πάνω από τη νοτιοανατολική Ευρώπη ένα χαμηλό των υψών και στη Βαλκανική χερσόνησο μια λίμνη ψυχρού αέρα λόγω μεταφοράς. Η ελάχιστη θερμοκρασία 2μ στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης έπεσε στους -9.95°C . Έντονες θερμοκρασιακές αναστροφές παρατηρήθηκαν στην κατώτερη τροπόσφαιρα κατά τη διάρκεια του παγετού ακτινοβολίας.

Η επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων των σταθμών έδειξε πως στην ημιαστική περιοχή (αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης) ο παγετός ακτινοβολίας σχετίστηκε με χαμηλότερες θερμοκρασίες από εκείνες του παγετού μεταφοράς, λόγω έντονης νυχτερινής ψύξης σε ανέφελες συνθήκες με άπνοια, σε συνδυασμό με τη μεγάλη λευκαύγεια λόγω των χιονοπτώσεων των προηγούμενων ημερών. Στο πολεοδομικό συγκρότημα ισχύει το αντίθετο, με την επίδραση του παγετού ακτινοβολίας να είναι μικρότερη στο εσωτερικό της πόλης. Κατά τη διάρκεια του παγετού μεταφοράς η ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή του αεροδρομίου ήταν μέχρι 1.5 βαθμό θερμότερη από ότι στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη σύντομη διέλευση των αερίων μαζών, υπό την επίδραση των Βόρειων ανέμων, πάνω από τη θάλασσα του Θερμαϊκού Κόλπου πριν επηρεάσουν το αεροδρόμιο.

Λέξεις-κλειδιά: Παγετός, Παγετός μεταφοράς, Παγετός ακτινοβολίας, Τροπόσφαιρα, ECMWF, Θεσσαλονίκη, Opengrads.



ABSTRACT

The purpose of this thesis is to investigate the structure of the troposphere in two cases of frost, radiation and advection, in Thessaloniki and focus on their synoptic and thermodynamic characteristics. The data included meteorological station measurements, radiosondes and operational gridded analyses of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

After the analysis of the frost cases of the last 5 years (2015-2019) at Thessaloniki, the very strong cold episode of the period 6 to 13 January 2017 was selected for further study. This episode was characterized by extended frost, which was initially due to advection frost and then radiation frost. A high pressure system had developed over Western Europe resulting to the advection of polar air masses to Central and Eastern Europe. A low prevailed at 500 hPa over southeastern Europe and a lake of cold air developed in the Balkan Peninsula due to transport. The minimum 2m air temperature dropped to -9.95 °C at Thessaloniki airport. Strong temperature inversions were observed in the lower troposphere during the radiation frost.

The processing of the available data of the stations showed that in the semi-urban area (Thessaloniki airport) the radiation frost was associated with lower temperatures than those of the advection frost, due to intense nocturnal cooling in cloud-free and low wind speed conditions, combined with the high albedo due to the snowfall of the previous days. The result was the opposite in the urban complex because of the lower effect of radiation frost in the city center. During the advection frost, the minimum temperature at the airport was up to 1.5 degrees warmer than in the city of Thessaloniki. This may have occurred because of the short passage of the air masses, steered by the northerly winds, over the sea of Thermaikos Gulf before they affect the airport.

Keywords: Frost, Advection frost, Radiation frost, Troposphere, ECMWF, Thessaloniki, Opengrads

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Εισαγωγικές έννοιες

Ο παγετός ανήκει στις ακραίες τιμές της θερμοκρασίας, και επιστημονικά ορίζεται ως το φαινόμενο πτώσης της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια της κάτω από την τιμή των 0°C (Φλόκας, 1997). Σύμφωνα με τους Heino et al. (1999), τα ακραία καιρικά φαινόμενα ορίζονται ως οι προς τα άνω ή προς τα κάτω αποκλίσεις από μία οριακή τιμή των τιμών των μετεωρολογικών παραμέτρων και εμφανίζονται με σχετικά μικρή συχνότητα ή έχουν σημαντική επίδραση στην κοινωνία ή στο οικοσύστημα.

Ο παγετός διακρίνεται:

-Ανάλογα με την εποχή που σημειώνεται σε:

- Πρώιμο ή φθινοπωρινό
- Χειμερινό
- Ανοιξιάτικο ή όψιμο

Οι ανοιξιάτικοι παγετοί δεν έχουν την ένταση και τη συχνότητα των χειμερινών ωστόσο είναι καταστροφικοί, επειδή τα φυτά εκείνη την εποχή βρίσκονται στα πρώτα στάδια εξέλιξής τους και είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε ζημιές (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010).

- Ανάλογα με τη διάρκεια σε:

- Ολικό παγετό: όταν η μέγιστη θερμοκρασία όλης της ημέρας είναι μικρότερη ή ίση των 0°C
- Μερικό παγετό όταν η ελάχιστη θερμοκρασία στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου είναι μικρότερη ή ίση των 0°C (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).



Στην Ελλάδα ο μερικός παγετός είναι συνηθέστερος και είναι το ίδιο καταστροφικός κυρίως όταν συμβαίνει κατά την άνοιξη που τα φυτά βρίσκονται στο στάδιο της βλάστησης (Θεοχάρης και Μυριούνης, 2015).

-Ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας σε: (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010)

- Παγετό μεταφοράς
- Παγετό ακτινοβολίας

-Ανάλογα με την ένταση σε:

- Ελαφρύ (0 έως -2°C)
- Μέτριο (-2 έως -4°C)
- Ισχυρό (κάτω των -4°C)

Η διαδικασία πτώσης της θερμοκρασίας γίνεται εντονότερη με τη δύση του ήλιου, με αποτέλεσμα τότε το έδαφος και ο αέρας πάνω από αυτό να ψύχονται λόγω ακτινοβολίας. Επειδή το έδαφος σε σχέση με τον αέρα είναι καλύτερος πομπός θερμότητας, ψύχεται ταχύτερα με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους ή ο αέρας με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή να ψύχεται κατά τις πρώτες νυχτερινές ώρες, καθώς η ενέργεια που χάνει είναι περισσότερη από αυτή που δέχεται. Με αυτό τον τρόπο, μετά τη δύση του ήλιου, η επιφάνεια του εδάφους είναι ελαφρώς πιο ψυχρή από τον υπερκείμενο αέρα (Αναγνωστοπούλου, 1999).

1.2 Παγετός Μεταφοράς

Οι παγετοί μεταφοράς, οφείλονται σε έντονη εισβολή ψυχρών αερίων μαζών, που συνήθως ακολουθούν τη διέλευση ενός ψυχρού μετώπου. Στην Ελλάδα παρατηρούνται, συνήθως, κατά την ψυχρή περίοδο και αποδίδονται στην επέκταση της δράσης των αντικυκλώνων της Δυτικής Ευρώπης ή στην κάθοδο του σιβηρικού αντικυκλώνα. Είναι παγετοί, οι οποίοι συνοδεύονται με άνεμο και έχουν σχετικά μεγάλη ένταση και διάρκεια (Μπαλαφούτης και Μαχαίρας, 1985). Αυτοί δημιουργούνται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας στις αέριες μάζες. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας ζεσταίνεται. Τα παρεδάφια στρώματα αέρα έχουν υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα υπερκείμενα. Μετά τη δύση του ηλίου και κατά τη διάρκεια της νύχτας το έδαφος χάνει την θερμότητά του και έτσι οι αέριες μάζες μετακινούνται και τα θερμότερα στρώματα ανεβαίνουν προς τον ουρανό και τα ψυχρότερα κατεβαίνουν στο έδαφος. Οι θερμότερες αέριες μάζες σταθεροποιούνται σε κάποιο ύψος και δημιουργείται η θερμοροφή ενώ οι ψυχρότερες δημιουργούν παγετό στην επιφάνεια του εδάφους με καταστροφικές συνέπειες για τα φυτά. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει συνήθως σε κοιλάδες που περιβάλλονται από βουνά. Από τις κορυφές των βουνών κατεβαίνουν ψυχρές αέριες μάζες και εγκλωβίζουν τον αέρα δημιουργώντας ένα θύλακα (Σχήμα 1.1).

Όπως θα προκύψει και σε επόμενα κεφάλαια, τις παραπάνω περιπτώσεις τις συναντάμε κατά κανόνα στην ύπαιθρο γιατί στο αστικό περιβάλλον υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι διαφοροποιούν το σκηνικό.

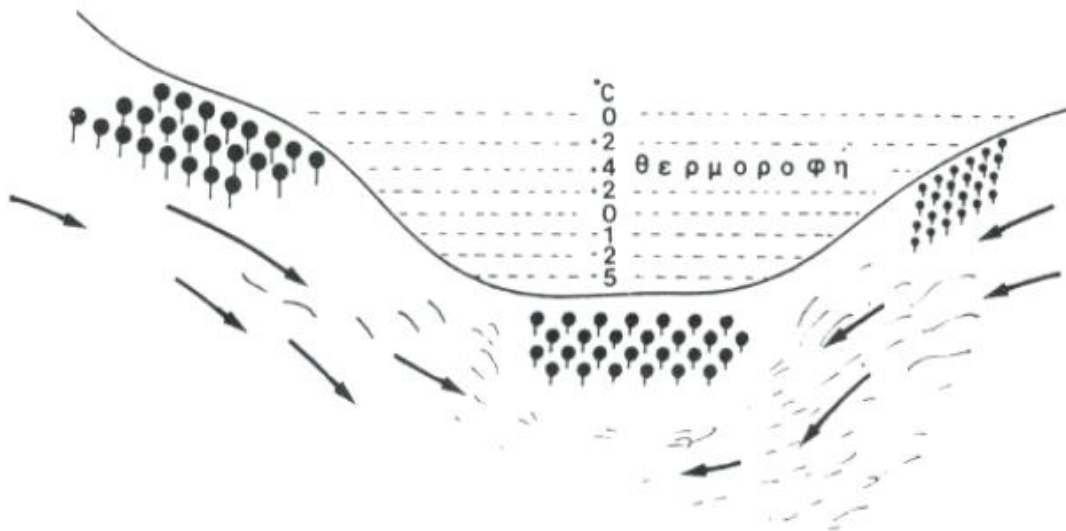
Οι μικρότερες θερμοκρασίες επιτυγχάνονται όταν το ψυχρό ρεύμα αέρα ακολουθείται από μια ήρεμη και αίθρια περίοδο, που επιφέρει παραπέρα ψύξη του αέρα εξαιτίας της νυχτερινής ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του συνδυασμού των δύο τύπων παγετού (Αναγνωστοπούλου, 1999).

Οι εισβολές ψυχρού αέρα στην περιοχή της Μεσογείου οδηγούν σε ανοδικές κινήσεις, εξαιτίας της αστάθειας που δημιουργείται από τη θέρμανση των κατώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων (convective instability).

Η εισβολή θαλάσσιων πολικών αερίων μαζών (mP) που καθίστανται ασταθείς καθώς θερμαίνονται από κάτω, είναι αρκετά συχνή αν συγκριθεί με τις Αρκτικές αέριες μάζες

(mA), που είναι σπάνιες (5-8 περιπτώσεις ετησίως). Η εισβολή των πολικών αερίων μαζών δημιουργεί σωρειτόμορφα νέφη έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης και είναι ουσιαστική για το σχηματισμό των μεσογειακών υφέσεων. Η δημιουργία των υφέσεων αυτών συνδέεται με ένα κλάδο του πολικού αεροχειμάρρου, το πολικό μέτωπο. Ο αεροχείμαρρος αυτός εμφανίζεται σε φάσεις χαμηλού δείκτη κυκλοφορίας, οπότε οι δυτικοί άνεμοι επάνω από τον ανατολικό Ατλαντικό εκτρέπονται προς τα βόρεια από ένα σύστημα εμποδισμού, που πρόκειται για έναν θερμό αντικυκλώνα. Η εκτροπή αυτή μεταφέρει τον αέρα του Ατλαντικού μέσα στην αρκτική περιοχή και ανατολικά αυτού του εμποδισμού παρατηρείται μια έντονη ροή ψυχρού αρκτικού αέρα, που κινείται νοτιανατολικά προς τη νότια Ευρώπη. Ο μεγάλος παγετός που κυριάρχησε στην Ελλάδα του Ιανουάριου του 1963, είχε ως αίτιο ένα τέτοιο σύστημα εμποδισμού (Μπαλαφούτης και Μαχαίρας, 1985)

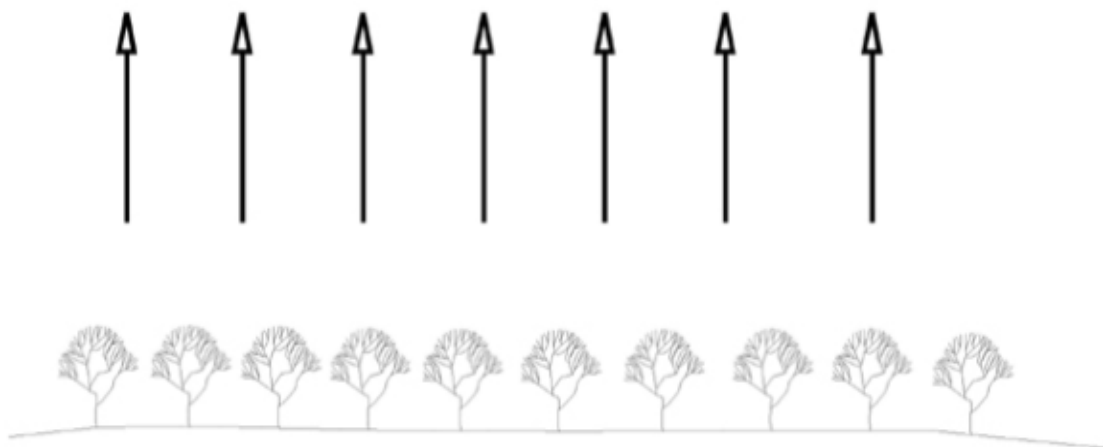
Οι Feidas et al. (2004) θεωρούν ότι η αρνητική τάση της ελάχιστης θερμοκρασίας το χειμώνα συνδέεται με ροή βόρειας συνιστώσας πάνω από την Ελλάδα γεγονός που συνδέεται με αύξηση της συχνότητας και τη διάρκεια των αντικυκλώνων που επηρεάζουν την Ελλάδα (Maheras et al., 2000).



Σχήμα 1.1: Σχηματισμός παγετού μεταφοράς. ΠΗΓΗ: (Δαλέζιος, 2015)

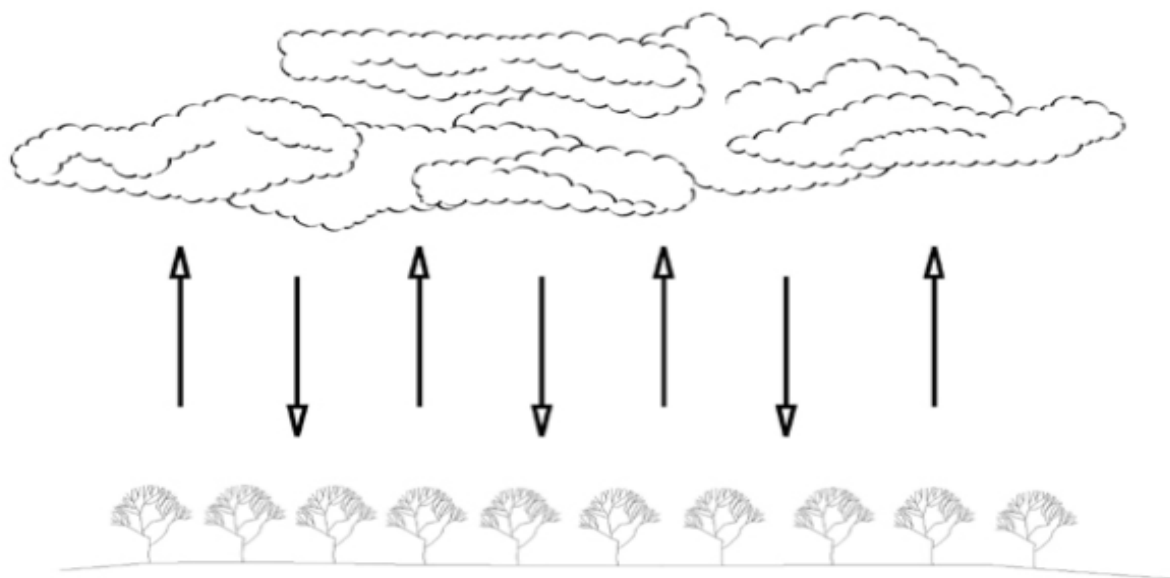
1.3 Παγετός Ακτινοβολίας

Σύμφωνα με τους Χρονοπούλου-Σέρελη και Φλόκα (2010) οι πιο συνηθισμένοι παγετοί στην Ελλάδα είναι οι παγετοί ακτινοβολίας οι οποίοι δημιουργούνται, κυρίως, όταν επικρατεί νηνεμία, αντικυκλωνικές καταστάσεις, χαμηλή-μέτρια σχετική υγρασία και αίθριος ουρανός. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το έδαφος δέχεται περισσότερη θερμότητα από ότι αποβάλλει με ακτινοβολία, ενώ, αντίθετα, τη νύχτα ο αέρας χάνει πολύ περισσότερη θερμότητα από ότι προσλαμβάνει (Σχήμα 1.2), με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος. Πρόκειται, δηλαδή, για μια θερμοκρασιακή αναστροφή λόγω ακτινοβολίας. Η αναστροφή αυτού του είδους ονομάζεται αναστροφή ακτινοβολίας εμφανίζεται τόσο κατά τις ανέφελες χειμερινές ή εαρινές νύχτες των μέσων γεωγραφικών πλατών, όσο και κατά το συνεχή χειμώνα των μεγάλων γεωγραφικών πλατών. Είναι επίσης συχνή επάνω από τα χιονοσκεπή εδάφη και σπάνια σχηματίζεται επάνω από υδάτινες επιφάνειες. Οι αναστροφές αυτές συνήθως αρχίζουν από την επιφάνεια του εδάφους και για το λόγο αυτό ονομάζονται και αναστροφές επιφανείας. Οι αναστροφές αυτές εν γένει δεν έχουν μεγάλη διάρκεια και διαλύονται μόλις αρχίσει η θέρμανση του εδάφους από τον ήλιο (Μπαλαφούτης και Μαχαίρας, 1985). Έτσι, οι παγετοί ακτινοβολίας εμφανίζονται, συνήθως, τις πρώτες πρωινές ώρες, π.χ. κατά την άνοιξη, και είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικοί για τα φυτά, καθώς τότε αναπτύσσεται ο βλαστός. Ωστόσο, η παρουσία νεφών και υψηλής σχετικής υγρασίας τη νύχτα δρουν αποτρεπτικά για το σχηματισμό παγετού γιατί μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει πίσω στη γη. Επίσης, ο ισχυρός άνεμος τη νύχτα αποτρέπει το σχηματισμό παγετού διότι αναμιγνύει τα ψυχρά στρώματα του αέρα κοντά στο έδαφος με θερμότερο αέρα από υψηλότερα στρώματα (Δαλέζιος, 1999).



Σχήμα 1.2: Σχηματισμός παγετού από αποβολή θερμότητας με ακτινοβολία κατά τις αίθριες νύχτες. ΠΗΓΗ: (Δαλέζιος, 2015)

Οι παγετοί ακτινοβολίας συμβαίνουν εξαιτίας της επαφής του αέρα με την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο ψύχεται λόγω εξερχόμενης μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας. Στην περίπτωση όμως που ο ουρανός είναι συννεφιασμένος τότε αντανακλάται μέρος αυτής και επιστρέφει προς τη γη (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Αντανάκλαση της γήινης ακτινοβολίας λόγω ύπαρξης νεφών. ΠΗΓΗ: (Δαλέζιος, 2015)

1.4 Σύγκριση των δύο ειδών παγετού

Οι καιρικές συνθήκες κατά τις οποίες πραγματοποιούνται οι παγετοί ακτινοβολίας και οι παγετοί μεταφοράς είναι τελείως διαφορετικές. Είναι όμως δυνατό μετά από ένα παγετό μεταφοράς να επικρατήσει νηνεμία και αίθριος ουρανός, οπότε να έχουμε νέα πτώση της θερμοκρασίας από ακτινοβολία.

Σε περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους, κοντά σε ορεινούς όγκους ή σε σχετικά μεγάλο υψόμετρο, κυρίως το φθινόπωρο και το χειμώνα, παρατηρούνται παγετοί μεταφοράς. Σε κοιλάδες οι οποίες περιβάλλονται από ψηλούς λόφους ή βουνά, συχνά και κυρίως την άνοιξη, παρατηρούνται παγετοί ακτινοβολίας. Εκεί ο αέρας και το έδαφος ψύχονται κατά τη διάρκεια της νύχτας από την απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και οι πυκνότερες - βαρύτερες ψυχρές αέριες μάζες κατέρχονται από τα τοιχώματα των ορεινών όγκων στο κατώτερο τμήμα της κοιλάδας, εκτοπίζοντας τις πιο ελαφριές θερμές μάζες προς τα πάνω. Έτσι, σχηματίζεται «θύλακας παγετού», όταν η απουσία ανέμων που θα αναμίγνυαν τις αέριες μάζες, οδηγεί στην παγίδευση των ψυχρών αερίων μαζών στο βάθος της κοιλάδας. Σπάνια παρατηρούνται παγετοί σε κοιλάδες κοντά σε υδάτινους όγκους, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού και της υψηλής ατμοσφαιρικής υγρασίας.

Οι ζημιές που προκαλούνται από τους παγετούς ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερες ωστόσο είναι πιο εύκολο να αντιμετωπιστούν, ενώ, αυτές που προκαλούνται από τους παγετούς μεταφοράς είναι πιο περιορισμένες ωστόσο είναι πιο δύσκολη η αντιμετώπισή τους.

1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον παγετό

Η εξέταση των δυναμικών αιτιών που δημιουργούν τον παγετό είναι αναγκαία, διότι με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει ταξινόμηση των διαφορετικών τύπων παγετού και κατά συνέπεια ευκολότερη αφ' ενός επιλογή της μεθόδου προστασίας και αφ' ετέρου πιο έγκυρη πρόγνωση του φαινομένου.

Σύμφωνα με την Αναγνωστοπούλου (1999) ο ετήσιος αριθμός ημερών παγετού ελαττώνεται από βορρά προς νότο και από την ήπειρο προς τα παράλια. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών παγετού είναι μικρότερος στις δυτικές ακτές απ' ότι στις ανατολικές και ιδιαίτερα στις βορειοανατολικές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους βόρειους ανέμους που επικρατούν στο

Αιγαίο κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, που είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των υψηλών πιέσεων της Βαλκανικής χερσονήσου και των χαμηλών πιέσεων της ανατολικής Μεσογείου. Έτσι, μεταφέρονται ψυχρές και ξηρές αέριες μάζες πάνω από την ανατολική Ελλάδα, ενώ, στη δυτική Ελλάδα επικρατούν νότιοι άνεμοι, πλούσιοι σε υδρατμούς.

1.6 Χαρακτηριστικά αέριας μάζας

Μία αέρια μάζα προσδιορίζεται από τα παρακάτω στοιχεία: (Φλόκας, 1997; Μαχαίρας και Μπαλαφούτης, 1997; Σαχσαμάνογλου και Μακρογιάννης, 1998; Μακρογιάννης κ.ά., 1998):

- α) από την πηγή της, δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος του τόπου πάνω από τον οποίο σχηματίστηκε (αρκτικές, πολικές, τροπικές, μεσογειακές, ισημερινές) και από το αν είναι ξηρά ή θάλασσα (ηπειρωτικές ή θαλάσσιες αέριες μάζες),
- β) τη θερμοκρασιακή της κατάσταση, δηλαδή αν είναι θερμότερη (θερμή αέρια μάζα) ή ψυχρότερη (ψυχρή αέρια μάζα) από την επιφάνεια του εδάφους ή από την αέρια μάζα που εκτοπίζει και καταλαμβάνει τη θέση της,
- γ) την υδροστατική της ευστάθεια ή αστάθεια (δίνει μία ένδειξη για τα φαινόμενα που θα πρέπει να αναμένονται με την άφιξη της συγκεκριμένης αέριας μάζας σε μία περιοχή),
- δ) τη διαδρομή που έχει ακολουθήσει και
- ε) την ηλικία της, δηλαδή το χρονικό διάστημα που πέρασε από τη στιγμή που έφυγε από την περιοχή που δημιουργήθηκε μέχρι τη στιγμή που φτάνει στην υπό μελέτη περιοχή.

Σύμφωνα με τους Μαχαίρα και Μπαλαφούτη (1987), σε ετήσια βάση, οι πιο συχνές αέριες μάζες που επηρεάζουν την Ελλάδα είναι οι πολικές, τόσο οι θαλάσσιες όσο και οι ηπειρωτικές, σε ποσοστά 42% και 30%, αντίστοιχα. Οι μεσογειακές αέριες μάζες παρουσιάζουν μικρότερη συχνότητα, της τάξης του 18%, ενώ οι τροπικές και αρκτικές είναι ιδιαίτερα σπάνιες, καθώς και οι δύο μαζί αποτελούν το 10% των καταγεγραμμένων αερίων μαζών ανά έτος. Την ψυχρή περίοδο, οι θαλάσσιες πολικές αέριες μάζες προέρχονται από τη θαλάσσια περιοχή δυτικά και ανατολικά της Ισλανδίας. Εξαιτίας της διαδρομής που έχουν ακολουθήσει πάνω από Ευρώπη φτάνουν ψυχρές και ξηρές πάνω από την Ελλάδα. Αντίθετα,

την ίδια περίοδο, οι ηπειρωτικές τροπικές αέριες μάζες που κύρια πηγή τους είναι η βόρεια Αφρική, εμπλουτίζονται με υδρατμούς πάνω από τη Μεσόγειο και φτάνουν στην Ελλάδα υγρές και θερμές (Φλόκας, 1997; Φλόκας, 1984).

1.7 Επιπτώσεις του παγετού

1.7.1 Επιπτώσεις στη γεωργία

Ο παγετός ως φυσικός κίνδυνος μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα στις αγροτικές εκμεταλλεύσεις. Η ένταση του παγετού εξαρτάται από την τιμή της ελάχιστης θερμοκρασίας, αλλά και τη διάρκειά της, δηλαδή το χρονικό διάστημα που παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα των 0°C. Οι εαρινοί παγετοί, αν και μικρότερης συνήθως έντασης από τους χειμερινούς, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι καθώς μπορούν να εμφανιστούν στο στάδιο της βλάστησης και να προξενήσουν μεγάλες ζημιές κυρίως στις δενδρώδεις καλλιέργειες (Χατζή, 2016).

Σύμφωνα με τον Δαλέζιο (2015) σε μερικές πολυετείς καλλιέργειες, όπως τα εσπεριδοειδή, μπορεί ένας παγετός να μηδενίσει όχι μόνο την παραγωγή, αλλά και την αξία ολόκληρης της καλλιέργειας. Για κάθε είδος και ποικιλία φυτού υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος, πέρα του οποίου δεν μπορεί να επιβιώσει. Η έκθεση των φυτών σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια ευαίσθητων βλαστικών σταδίων των φυτών μπορεί να προκαλέσει από καθυστέρηση της ανάπτυξης, παρεμπόδιση της γονιμοποίησης μέχρι και νέκρωση ολόκληρου του φυτού. Εκτός από τις επιδράσεις στους φυτικούς ιστούς, παγετός προκαλεί επίσης φούσκωμα του εδάφους, λόγω παγώματος του εδαφικού νερού, που οδηγεί σε απώλεια της καλής επαφής των ριζών με το έδαφος και τραυματισμό τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται ικανότητα πρόσληψης νερού και θρεπτικών συστατικών από τα φυτά. Η κρίσιμη θερμοκρασία κάτω από την οποία υπάρχουν ζημιές στα φυτά εξαρτάται κυρίως από το στάδιο ανάπτυξης του φυτικού ιστού.

1.7.2 Επιπτώσεις στη ζωή των πολιτών

Ο παγετός, μπορεί να έχει επιπτώσεις στον άνθρωπο, καθώς πολλά θανατηφόρα ατυχήματα έχουν συμβεί σε παγωμένους δρόμους όπου παγετός θεωρείται ένας από τους κυριότερους παράγοντες του ατυχήματος. Δημιουργεί τεράστια προβλήματα στις μετακινήσεις, καθώς πολλά οχήματα παγιδεύονται στους αυτοκινητόδρομους, οι δημόσιες συγκοινωνίες σταματούν και πτήσεις αναβάλλονται.

Σύμφωνα με τους Walsh et al. (2001), οι έντονες ψυχρές εισβολές επηρεάζουν περισσότερους κατοίκους στα μέσα γεωγραφικά πλάτη από άλλα έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι τυφώνες και οι ανεμοστρόβιλοι.

Σημαντικές επιπτώσεις έχει και στις εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως τα δίκτυα νερού. Σύμφωνα με το Σύλλογο Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος στα σημεία που το δίκτυο διανομής είναι εκτεθειμένο, το νερό μπορεί να παγώσει. Ο πάγος που δημιουργείται έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη διακοπή της ροής του νερού, έως ότου να λιώσει ο πάγος
- Την καταστροφή των σωληνώσεων, κυρίως στις θέσεις σύνδεσης των σωλήνων και τη μετέπειτα διαρροή νερού

Προβλήματα εμφανίζονται:

- Στο δίκτυο διανομής
- Στα εσωτερικά δίκτυα των κτηρίων σε εκτεθειμένα τμήματα

Αντίστοιχα και στα δίκτυα θέρμανσης παρουσιάζονται ζημιές όπως:

- Δημιουργία πάγου στο δίκτυο διανομής θερμού νερού και διακοπή της ροής θερμικής ενέργειας προς το κτήριο
- Δημιουργία πάγου που οδηγεί σε ρήξη των σωληνώσεων ή και εξαρτημάτων των λεβήτων



- Δημιουργία πάγου στο σωλήνα απομάκρυνσης των συμπυκνωμάτων και διακοπή της λειτουργίας του λέβητα

- Αδυναμία λειτουργίας του λέβητα, καθώς δεν είναι δυνατή η πλήρωσή του με νερό, λόγω πτώσης πίεσης των δικτύων

Στα δίκτυα διανομής φυσικού αερίου οι ζημιές μπορεί να αφορούν:

- Αδυναμία χειρισμού βαλβίδων ή πρόσβασης σε αυτές
- Βλάβες από εξωγενείς παράγοντες (πάγος από νερά που έπεσαν σε βάνες κλπ)

Στα δίκτυα πυρόσβεσης με νερό είναι πιθανόν να παγώσουν τα εκτεθειμένα τμήματα των σωληνώσεων.

Προβλήματα παρουσιάζονται στην ηλεκτροδότηση των κτηρίων είτε:

- Λόγω βλαβών σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε
- Λόγω πτώσης δέντρων σε δίκτυα διανομής.

Στις εσωτερικές εγκαταστάσεις των κτηρίων δεν παρουσιάζονται ζημιές που οφείλονται στον παγετό.

1.7.3 Άλλα προβλήματα

A. Μεμονωμένα προβλήματα σε ηλεκτροϋδραυλικά συστήματα που βρέθηκαν εκτεθειμένα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από -5°C και υπέστη μεταβολές το μέσο μετάδοσης της κίνησης.

B. Υπερκατανάλωση πολύτιμου πόσιμου νερού, είτε από ανοιχτές βρύσες είτε από διαρροές λόγω αστοχίας σωληνώσεων.



Μετά τον παγετό:

- Προβλήματα στην υδροδότηση της πόλης, λόγω εργασιών, προκειμένου να ξαναγεμίσουν οι δεξαμενές της πόλης και λόγω εργασιών αποκατάστασης βλαβών.
- Μερικώς προβλήματα από ζημιές που προκαλούνται στα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας
- Έλλειψη ανταλλακτικών από την αγορά ειδών θέρμανσης
- Αισχροκέρδεια από μερίδα τεχνικών και εμπόρων

Το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το μέγεθος της καταστροφής, εξαρτάται από το μέγεθος και την ένταση του φυσικού φαινομένου, από το κατά πόσο είναι ευάλωτο ή τρωτό το σύστημα που θα υποστεί την εκδήλωση του φαινομένου και από την αξία του στοιχείου που εκτίθεται στον κίνδυνο (Μακρόπουλος, 2006).

1.8 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΑΓΕΤΟ

1.8.1 Γενικά

Ο παγετός αποτελεί ένα ιδιαίτερο καιρικό φαινόμενο, που επηρεάζει την καθημερινότητα των πολιτών, τις αγροτικές καλλιέργειες, την ενέργεια, τις μεταφορές, τις εγκαταστάσεις και γενικά τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η πρόγνωση τέτοιων καιρικών φαινομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς μπορεί να είναι καταστροφικά για τη γεωργία και την κτηνοτροφία και να προκαλέσουν διακοπή των συγκοινωνιών, υλικές ζημιές, αυτοκινητιστικά ατυχήματα, ακόμη και θανάτους. Γι' αυτούς τους λόγους η μελέτη του φαινομένου του παγετού είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να συμβάλλει στην πρόγνωσή του, η οποία κατ' επέκταση θα συμβάλει στη διευκόλυνση της ζωής των ανθρώπων.

1.8.2 Προστασία για τη γεωργία

Για την πρόληψη από τον παγετό έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές που εφαρμόζονται στη γεωργία και περιλαμβάνουν τόσο την αντιμετώπιση του φαινομένου, όσο και την ανάπτυξη έρευνας σε επίπεδο αντοχής των καλλιεργούμενων φυτών. Έχει παρατηρηθεί ότι ο καλύτερος χρόνος για την προστασία μιας περιοχής από τον παγετό είναι πριν ακόμα γίνει το φύτεμα. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να επιλεγούν το φυτικό είδος, η περιοχή, καθώς και ο χρόνος φυτέματος. Για τον περιορισμό των ζημιών στη γεωργία από παγετούς, εφαρμόζονται διάφορα μέτρα παθητικής ή ενεργητικής προστασίας. Τα μέτρα παθητικής προστασίας περιλαμβάνουν μικροκλιματολογική έρευνα πριν από την οποιαδήποτε χρήση ενός αγρού και την επιλογή της καταλληλότερης καλλιέργειας για την κάθε περιοχή. Αντίθετα, με τα μέτρα της ενεργητικής προστασίας επιδιώκεται να τροποποιηθεί το μικροκλίμα του αγρού, ώστε να αποφευχθούν οι χαμηλές θερμοκρασίες που δημιουργεί ο παγετός σε μια καλλιέργεια. Οι περισσότερες από τις πρακτικές τεχνικές, που απαριθμούνται παρακάτω, για την καταπολέμηση του φαινομένου του παγετού είναι αποτελεσματικές μόνο για παγετούς ακτινοβολίας, αν και μερικές μπορούν να εφαρμοστούν και σε παγετούς μεταφοράς. Οι βασικές αρχές στις οποίες βασίζονται είναι η εκλογή κατάλληλης θέσης, η παρεμπόδιση ανακλώμενης ακτινοβολίας, η θερμική μόνωση, η ανάμειξη αέρα, η θέρμανση του αγρού, η χρήση νερού, η παράταση του χειμερινού λήθαργου και η αναμόχλευση του εδάφους (Δαλέζιος 2015).

1.8.3 Αντιμετώπιση του παγετού

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη λήψης μέτρων προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος και οι επιπτώσεις που προέρχονται από τον παγετό. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (2018) η αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών και η διαχείριση των συνεπειών λόγω παγετού εμπεριέχει τις παρακάτω δράσεις:

1. Ενημέρωση κοινού και παροχή οδηγιών για ενδεχόμενους κινδύνους από τον παγετό.
2. Διάσωση ατόμων που η ζωή τους βρίσκεται σε κίνδυνο από την εκδήλωση παγετού
3. Απεγκλωβισμός και διάσωση οδηγών και επιβατών στο οδικό δίκτυο εξ αιτίας του παγετού.

4. Απεγκλωβισμός και διάσωση επιβατών και εργαζομένων στο σιδηροδρομικό δίκτυο εξ αιτίας του παγετού

5. Αντιμετώπιση περιστατικών υγείας σε περιοχές όπου έχει διακοπεί η κυκλοφορία στο οδικό δίκτυο.

Επιπλέον, η πρόγνωση του παγετού παρουσιάζει μεγάλη σπουδαιότητα κυρίως, για την πρόληψη καταστροφών στη γεωργία και στις καλλιέργειες, ωστόσο έχει σημαντικό ρόλο και στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων.

1.9 Προηγούμενες μελέτες

Οι Balafoutis and Arseni – Papadimitriou (2002) όρισαν ως ψυχρό επεισόδιο κάθε περίοδο τριών ή περισσότερων διαδοχικών ημερών στις οποίες η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία παρεκκλίνει κατά 4°C από την αντίστοιχη μέση τιμή που προκύπτει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (1946-1990). Τα ψυχρά επεισόδια, για την περίοδο 1967-1997, σε διάφορους σταθμούς της Ελλάδας, μελέτησαν και εντόπισαν οι Pappas et al. (2004) με βάση δύο κριτήρια: α) κάθε σειρά διαδοχικών ημερών (τουλάχιστον μία) όπου η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μικρότερη από 0°C και β) κάθε σειρά διαδοχικών ημερών (τουλάχιστον μία) όπου η ελάχιστη θερμοκρασία είναι μικρότερη κατά 10°C από την αντίστοιχη μέση τιμή. Οι Tselepidaki et al. (1990) και οι Flocas et al. (1995) μελέτησαν το ψυχρό επεισόδιο που παρατηρήθηκε το Μάρτιο του 1987 (4 έως 11 Μαρτίου). Η πρώτη ομάδα ερευνητών μελέτησε την ένταση και την εμμονή του επεισοδίου, ενώ, η δεύτερη ομάδα, τα συνοπτικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του. Τα υπεύθυνα συστήματα για την επικράτηση των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, ήταν η επέκταση ενός εκτεταμένου αντικυκλώνα που καλύπτει την κεντρική Ευρώπη προς τη Βαλκανική χερσόνησο και ένα θερμικό χαμηλό στην ανατολική Μεσόγειο. Η δυναμική ανάλυση έδειξε ότι, κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, σημειώθηκε αναδίπλωση της τροπόπαυσης που συνδέθηκε με την ύπαρξη πολύ ψυχρού αέρα πάνω από τη Βαλκανική και έντονη ψύξη με ανοδικές κινήσεις στα ανατολικά της Ελλάδας (Varfi et al. 2009). Σύμφωνα με τους Lagouvardos et al. (1998), που μελέτησαν το ίδιο επεισόδιο (3-13 Μαρτίου 1987), η

επίδραση της ορογραφίας κατά τη διέλευση του Βαλκανικού μετώπου είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας λίμνης ψυχρού αέρα στα ανατολικά της Πίνδου. Οι Alexander et al. (2006) έδειξαν ότι, σε παγκόσμια κλίμακα, ο ετήσιος αριθμός των ψυχρών ημερών και νυχτών ελαττώνεται και παρατηρείται η ίδια τάση και στα ψυχρά επεισόδια από τα μέσα της δεκαετίας του 70'.

1.10 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συνοπτική και θερμοδυναμική ανάλυση των συνθηκών της τροπόσφαιρας καθ' ύψος, που ήταν υπεύθυνες για την εκδήλωση περιπτώσεων παγετού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης τα τελευταία χρόνια. Αιτία για την εκπόνηση της εργασίας αυτής είναι το γεγονός ότι, η Θεσσαλονίκη, ως δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, αποτελεί πνευματικό, κοινωνικό και οικονομικό κέντρο και συνεπώς, επεισόδια παγετού μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στη ζωή των πολιτών. Για την καλύτερη επιλογή των περιπτώσεων παγετού, έγινε κατάταξη των επεισοδίων παγετού με βάση τα αίτια που τον προκαλούν και επιλέχθηκε ο Ιανουάριος του έτους 2017 για περαιτέρω ανάλυση, ο οποίος είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο λόγω των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών, αλλά και της εναλλαγής από παγετό μεταφοράς σε παγετό ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τους Anagnostopoulou et al. (2017) ανάλυση των ιστορικών αρχείων έδειξε ότι ο Ιανουάριος του 2017 ήταν ένα από τα πιο ακραία ψυχρά επεισόδια. Παρόλο που οι χαμηλές θερμοκρασίες του Ιανουαρίου 2017 δεν έσπασαν τα προηγούμενα χαμηλά ρεκόρ για όλους τους σταθμούς στην Ελλάδα, η μεγάλη διάρκεια ήταν αρκετά σημαντική, με αποτέλεσμα επιπτώσεις στην κοινωνία και την οικονομία της περιοχής της Θεσσαλονίκης. Ακόμη, μελετήθηκε η διαχρονική πορεία του παγετού καθώς και οι συνοπτικές και θερμοδυναμικές παράμετροι σε διάφορα ισοβαρικά πεδία της ατμόσφαιρας.

Στο κεφάλαιο 1 της εργασίας παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες του παγετού και κατηγοριοποιείται ο παγετός με βάση τα αίτια δημιουργίας του. Επίσης, επισημαίνονται τα προβλήματα που δημιουργεί το φαινόμενο του παγετού και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης.



Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται και περιγράφονται τα δεδομένα, τα κριτήρια επιλογής των περιπτώσεων παγετού, καθώς και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση της ετήσιας και ημερήσιας διακύμανσης (για την ψυχρή περίοδο) των θερμοκρασιών μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματά τους. Επίσης, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καθ' ύψος μελέτη της ατμόσφαιρας της πόλης της Θεσσαλονίκης με βάση τα γραφήματα που προηγήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 4 τα επεισόδια παγετού διαχωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την αιτία δημιουργίας τους (παγετός μεταφοράς, παγετός ακτινοβολίας) και αναλύεται συνοπτικά ο Ιανουάριος του έτους 2017. Ακόμη, αναλύεται η θερμοδυναμική δομή της ατμόσφαιρας και συγκρίνονται οι πραγματικές ραδιοβολίσεις με κατακόρυφα προφίλ αναλύσεων ECMWF.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης αντίστοιχων φαινομένων στο μέλλον.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Δεδομένα

Για τη μελέτη του φαινομένου του παγετού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα SYNOP ανά 3 ώρες (στις συνοπτικές ώρες 00, 03, ..., 21 UTC) από το μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στο Αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης, που αφορούν την χρονική περίοδο 01 Ιανουαρίου 2015 έως 31 Δεκεμβρίου 2019, καθώς και δεδομένα ραδιοβολίσεων από τον ίδιο σταθμό. Για τη μελέτη της δομής της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιούνται επίσης επιχειρησιακές πλεγματικές αναλύσεις επιφάνειας και ανώτερης τροπόσφαιρας από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Center for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) με χωρική διακριτοποίηση 0.125x0.125 μοίρες (γεωγραφικό μήκος και πλάτος). Για τη σύγκριση των δύο τύπων παγετού στο κέντρο της πόλης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του Δήμου Θεσσαλονίκης από το μετεωρολογικό σταθμό της Εγνατίας.

2.2 Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την μελέτη της κατακόρυφης και οριζόντιας δομής της τροπόσφαιρας κατά τη διάρκεια παγετού στη Θεσσαλονίκη.

Κάποιοι βασικοί περιορισμοί της στατιστικής ανάλυσης:

1. Να χάθηκε κάποια περίπτωση παγετού γιατί μεταξύ των 3ωρων παρατηρήσεων η θερμοκρασία μπορεί να μειώθηκε κάτω από τους 0°C ενώ οι 3ωρες μετρήσεις της θερμοκρασίας ήταν άνω των 0°C.
2. Να υποεκτιμήθηκε η ένταση του φαινομένου αν η θερμοκρασία ανάμεσα στις 3ωρες παρατηρήσεις ήταν ακόμα χαμηλότερη κάτω από τους 0°C.
3. Κάποια περίπτωση να είναι μερικός παγετός, αλλά να θεωρήθηκε ολικός επειδή ανάμεσα στις 3ωρες παρατηρήσεις η θερμοκρασία να ανέβηκε προσωρινά πάνω από τους 0°C.

Ως «ημέρα παγετού» λαμβάνεται κάθε ημέρα, όταν η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος ήταν μικρότερη από 0°C από τις 00UTC της μία ημέρας έως τις 00UTC της επόμενης.

Ως «επεισόδιο παγετού» ορίζεται μια σειρά τουλάχιστον δύο (2) διαδοχικών ημερών κατά τις οποίες η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος ήταν μικρότερη από 0°C.

Για τη μελέτη της δομής της τροπόσφαιρας, κατά τη διάρκεια των επεισοδίων παγετού, εξετάστηκαν οι θερμοκρασίες και τα γεωδυναμικά ύψη που παρουσιάζουν οι κύριες στάθμες στα 850, 700, 500 και 300hPa, για την ημέρα του παγετού (D) και μια ημέρα πριν (D-1) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Κατά τη χρονική περίοδο 2015-2019 εμφανίστηκαν επεισόδια παγετού μεταφοράς και επεισόδια παγετού ακτινοβολίας, όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον είχαν οι περιπτώσεις που ένα επεισόδιο αποτελούνταν και από τα δύο είδη παγετού. Πιο συγκεκριμένα, τον Ιανουάριο του 2017 το επεισόδιο παγετού που διήρκησε από τις 7 έως τις 12 Ιανουαρίου αποτελείται από αρχική ψύξη του εδάφους λόγω μεταφοράς ψυχρών αέριων μαζών από τη ΒΑ Ευρώπη, ενώ στη συνέχεια στις 10 Ιανουαρίου εξελίσσεται σε παγετό ακτινοβολίας, καθώς επικρατεί άπνοια και αντικυκλωνικές συνθήκες.

Συνολικά για τα 5 διαθέσιμα χρόνια, οι ημέρες παγετού ήταν 112. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διαγράμματα που δείχνουν την κατανομή των ημερών παγετού ανά έτος και μήνα. Ως D ορίζεται η πρώτη ημέρα παγετού μιας ακολουθίας ημερών παγετού (Μπαρσάκης, 1999). Ακόμη, παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά διαγράμματα για όλη τη διάρκεια του επεισοδίου. Έπειτα, διαχωρίζονται τα επεισόδια παγετού ανάλογα με τα αίτια δημιουργίας τους και αναλύονται τα συνοπτικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κάθε ημέρας.

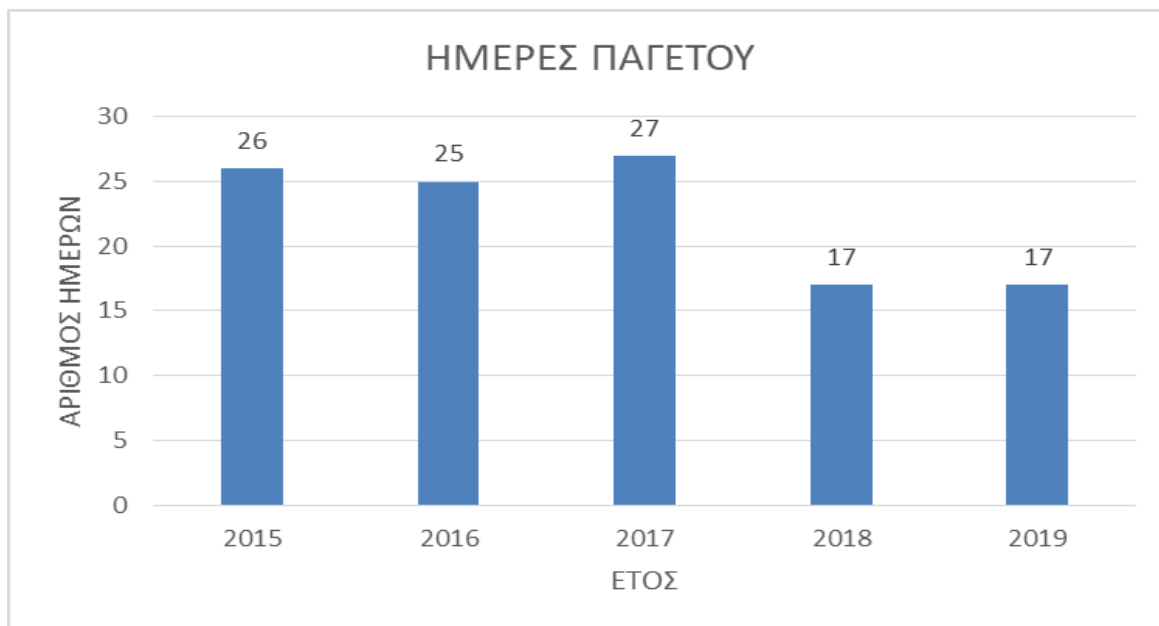
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΑΓΕΤΟΥ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΕΤΗ

3.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της δομής που παρουσιάζει η ατμόσφαιρα στη διάρκεια του παγετού, κρίθηκε απαραίτητο να μελετηθούν οι θερμοκρασίες και τα γεωδυναμικά ύψη που αποτελούν χρήσιμες μετεωρολογικές παραμέτρους για την πρόγνωση του φαινομένου. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν ραδιοβολίσες του Περιφερειακού Μετεωρολογικού Κέντρου Μακεδονίας στη Θεσσαλονίκη, μελετήθηκαν τα ισοβαρικά επίπεδα από 1000hPa έως 100hPa για τη διάρκεια του επεισοδίου παγετού, καθώς και για 1 ημέρα πριν από κάθε επεισόδιο.

Ως «επεισόδιο παγετού» ορίστηκε μια σειρά τουλάχιστον δύο (2) διαδοχικών ημερών κατά τις οποίες η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος ήταν μικρότερη από 0°C. Αν κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου (από τις 00UTC της μιας μέρας έως τις 00UTC της επόμενης) η θερμοκρασία έπεσε κάτω από 0°C, ορίζεται ως το ίδιο επεισόδιο παγετού. Εάν όμως, κατά τη διάρκεια της μίας ημέρας η θερμοκρασία παρέμενε μεγαλύτερη από 0°C, τότε θα ορίζεται ως καινούριο επεισόδιο παγετού. Έτσι, εντός ενός επεισοδίου μπορεί να καταγράφονται και περισσότερες από μία ημέρες παγετού. Η παρατήρηση αυτή διαχωρίζει τις ημέρες, από τα επεισόδια παγετού. Για τη χρονική περίοδο 2015-2019 καταγράφηκαν 25 επεισόδια παγετού και 112 ημέρες παγετού.

3.2 Ημέρες παγετού



Σχήμα 3.1: Συνολικός αριθμός ημερών παγετού ανά έτος στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2015-2019

Στο Σχήμα (3.1) παρουσιάζεται για κάθε έτος, ο συνολικός αριθμός ημερών παγετού κατά την περίοδο 2015-2019. Όπως παρατηρείται, ο μεγαλύτερος αριθμός ημερών παγετού (27) αντιστοιχεί στο έτος 2017, ενώ ο μικρότερος αριθμός (17) αντιστοιχεί στο έτη 2018 και 2019.

3.3 Κατανομή ημερών παγετού

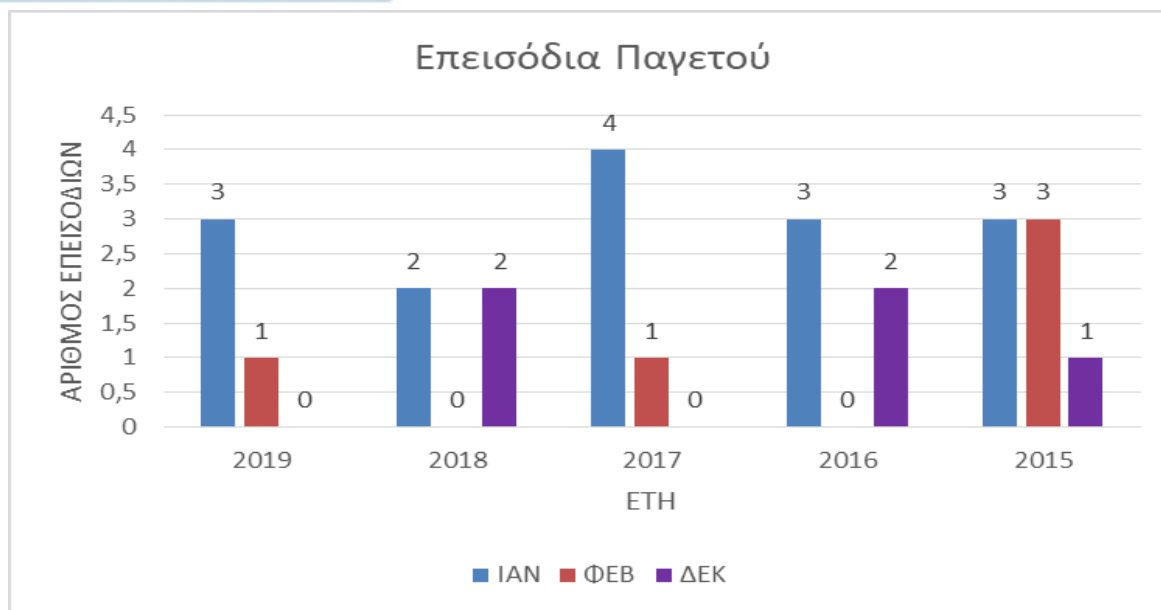


Σχήμα 3.2: Συνολικός αριθμός ημερών παγετού ανά μήνα στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2015-2019.

Στο σχήμα (3.2) παρουσιάζεται, για κάθε μήνα¹, ο συνολικός αριθμός ημερών παγετού κατά την περίοδο 2015-2019. Όπως παρατηρείται, ο μεγαλύτερος αριθμός ημερών παγετού παρατηρείται τους μήνες Ιανουάριο (61) και Δεκέμβριο (30), ενώ ο μικρότερος αριθμός παρατηρείται το μήνα Νοέμβριο (1). Έτσι προκύπτει ότι κατά την περίοδο Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου είναι πιο πιθανή η εμφάνιση παγετού στη Θεσσαλονίκη.

¹ Οι μήνες που παραλείπονται είχαν μηδενικό αριθμό ημερών παγετού

3.4 Κατανομή επεισοδίων παγετού



Σχήμα 3.3: Συνολικός αριθμός επεισοδίων παγετού στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2015-2019 για τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται για την ψυχρή περίοδο των ετών 2015-2019 ο συνολικός αριθμός επεισοδίων ανά μήνα. Όπως παρατηρείται, τα περισσότερα επεισόδια εμφανίζονται τον μήνα Ιανουάριο, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το προηγούμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.2) και επιβεβαιώνει ότι η περίοδος μεγαλύτερης συχνότητας του παγετού στη Θεσσαλονίκη είναι οι μήνες Δεκέμβριος – Ιανουάριος, με τον Ιανουάριο να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διάρκεια παγετού.

3.5 Ακολουθίες ημερών παγετού

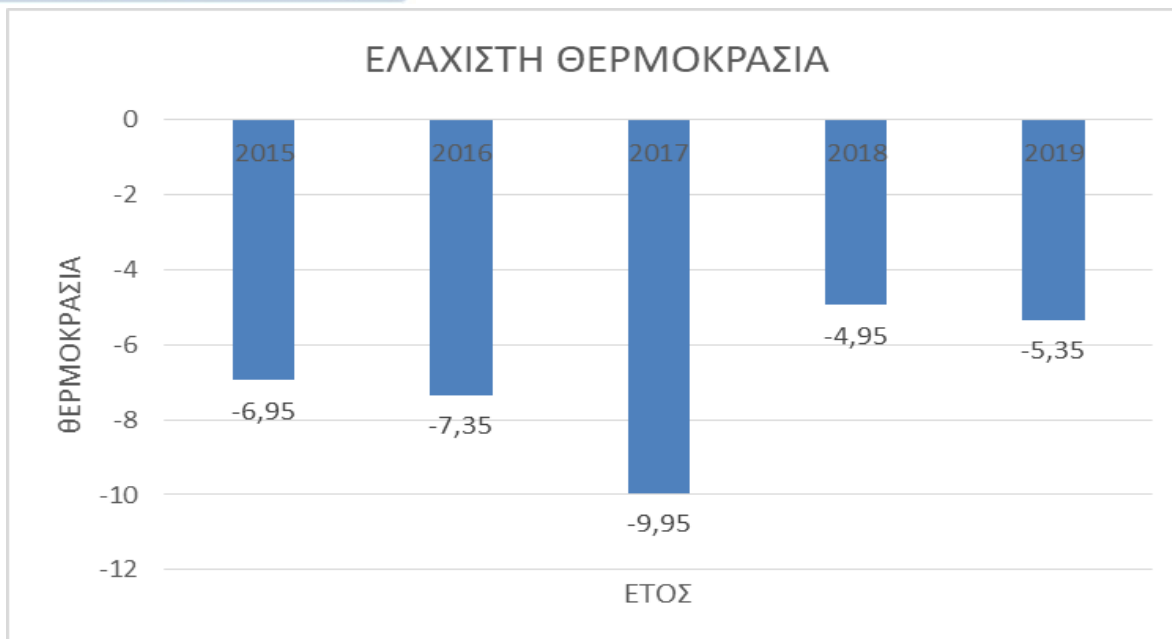


Σχήμα 3.4: Μέγιστος αριθμός διαδοχικών ημερών παγετού ανά έτος στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2015-2019

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.4 ο μέγιστος αριθμός διαδοχικών ημερών παγετού στη Θεσσαλονίκη για το διάστημα 2015-2019 είναι εννέα (9) και αντιστοιχεί στα έτη 2016 (17 έως 25 Δεκεμβρίου) και 2017 (από 6 έως 14 Ιανουαρίου).

Σε συνδυασμό με το σχήμα 3.1 παρατηρείται ότι ενώ το έτος 2019 δεν παρουσίασε πολλές ημέρες παγετού σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη, φαίνεται πως ο αριθμός των διαδοχικών ημερών παγετού είναι σχετικά μεγάλος. Σε αντίθεση, το έτος 2018 ο παγετός δεν είχε μεγάλη διάρκεια τόσο σε συνολικές μέρες όσο και σε διαδοχικές.

3.6 Ελάχιστες θερμοκρασίες



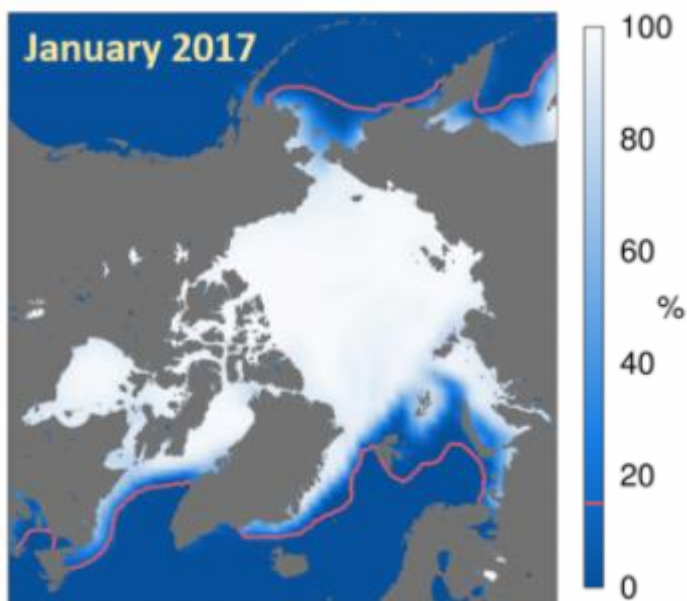
Σχήμα 3.5: Ελάχιστη θερμοκρασία (°C) κάθε έτους στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2015-2019

Στο σχήμα (3.5) παρουσιάζεται η ελάχιστη θερμοκρασία που επικράτησε σε κάθε έτος για την περίοδο 2015-2019. Όπως παρατηρείται, η χαμηλότερη ελάχιστη θερμοκρασία (-9,95°C) αντιστοιχεί στο έτος 2017, ενώ η λιγότερο χαμηλή ελάχιστη θερμοκρασία (-4,95°C) αντιστοιχεί στο έτος 2018. Ενώ τα έτη 2016 και 2017 είχαν τον ίδιο μέγιστο αριθμό ημερών παγετού (9 ημέρες) βλέπουμε ότι το έτος 2017 ήταν το ψυχρότερο της πενταετίας και σύμφωνα με μελέτες ήταν το ψυχρότερο των τελευταίων 62 χρόνων (www.ncdc.noaa.gov).

Συνολικά ο χειμώνας του 2017 ήταν -1,27°C ψυχρότερος από τα κλιματικά 62ετίας. Σύμφωνα με τα κλιματικά στοιχεία του ΑΠΘ ο χειμώνας του 2017 βρέθηκε στα κάτω όρια ψυχρότητας και κοντά στα ρεκόρ (meteo.geo.auth.gr).

Συμπερασματικά, το έτος 2017 ήταν αυτό με τις περισσότερες ημέρες παγετού (συνολικές και διαδοχικές), καθώς και με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες ($T_{\min}$) σε σχέση με τα υπόλοιπα 4 έτη.

3.7 Πιθανά αίτια για τις χαμηλές θερμοκρασίες στην Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017



Σχήμα 3.6: Κάλυμμα θαλάσσιου πάγου για τον Ιανουάριο του 2017. Η ροζ γραμμή υποδηλώνει την κλιματολογική ακμή για τον Ιανουάριο περίοδο 1981-2010. Πηγή: Υπηρεσία ECMWF Copernicus Climate Change

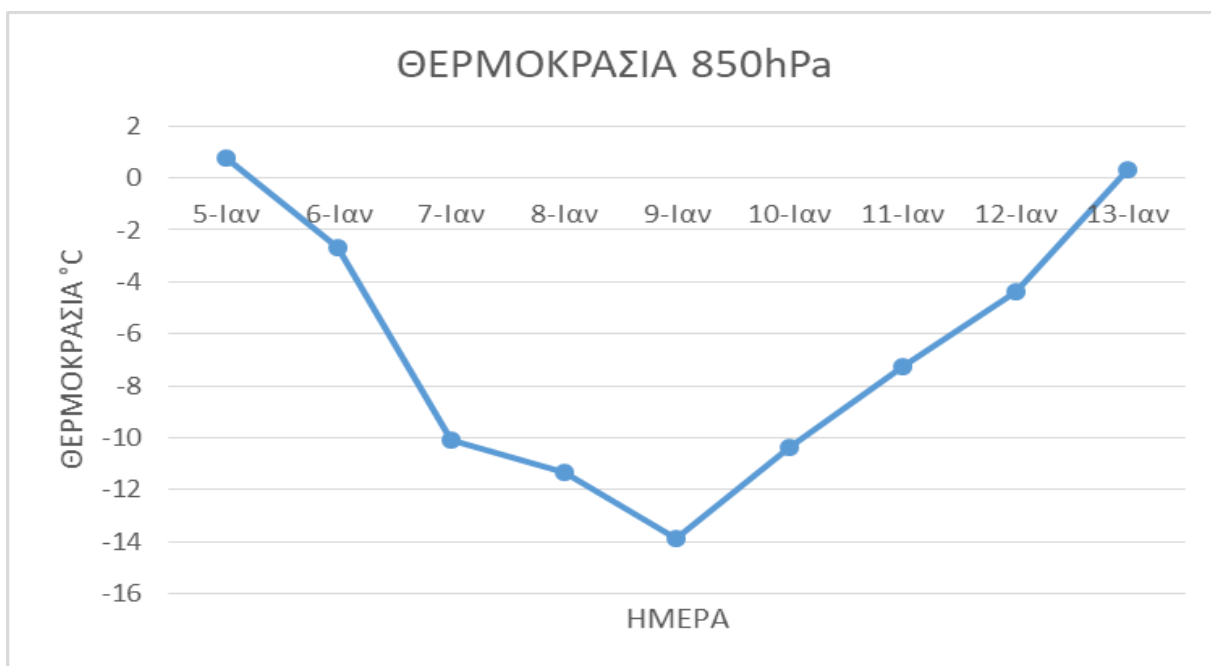
Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του θαλάσσιου πάγου για ολόκληρη την Αρκτική, με τη μέση όψη του πάγου για τον συγκεκριμένο μήνα να υποδεικνύεται με μια ροζ γραμμή. Ο χάρτης δείχνει το κάλυμμα θαλάσσιου πάγου για το μήνα (Ιανουάριος) με τις μεγαλύτερες ανωμαλίες για το 2017 στον ευρωπαϊκό τομέα της Αρκτικής.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα Copernicus, τον Ιανουάριο, το άκρο του θαλάσσιου πάγου βρισκόταν πιο βόρεια και πιο ανατολικά από το μέσο όρο του θαλάσσιου πάγου του 1981-2010, αφήνοντας τόσο το Αρχιπέλαγος του Σβάλμπαρντ όσο και το νησί της Νοβάγια Ζέμλια σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένα από θαλάσσιο πάγο. Η μικρότερη παγοκάλυψη μπορεί να οδήγησε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες στις πολικές περιοχές και συνεπώς σε μείωση της έντασης της θερμοβαθμίδας και αποδυνάμωση του πολικού στρόβιλου (polar vortex). Αυτό

μπορεί να οδηγήσει σε εισβολή ψυχρών πολικών ή ακόμα και αρκτικών αερίων μαζών σε πιο νότια γεωγραφικά πλάτη (π.χ. στην Ευρώπη).

3.8 Δομή της τροπόσφαιρας

Για τη μελέτη της δομής της τροπόσφαιρας κατασκευάστηκαν διαγράμματα στα οποία παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες στα 850hPa, 700hPa, 500hPa και 300hPa για τις ημέρες από D-1² έως το τέλος του επεισοδίου παγετού (5-13 Ιανουαρίου 2017). Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι για τη στάθμη των 850hPa (σχήμα 3.7) και 300hPa (σχήμα 3.10) η ψυχρότερη ημέρα είναι η 9 Ιανουαρίου, για τη στάθμη των 700hPa (σχήμα 3.8) η 8 Ιανουαρίου, ενώ για τη στάθμη των 500 hPa (σχήμα 3.9) οι 7 και 8 Ιανουαρίου.

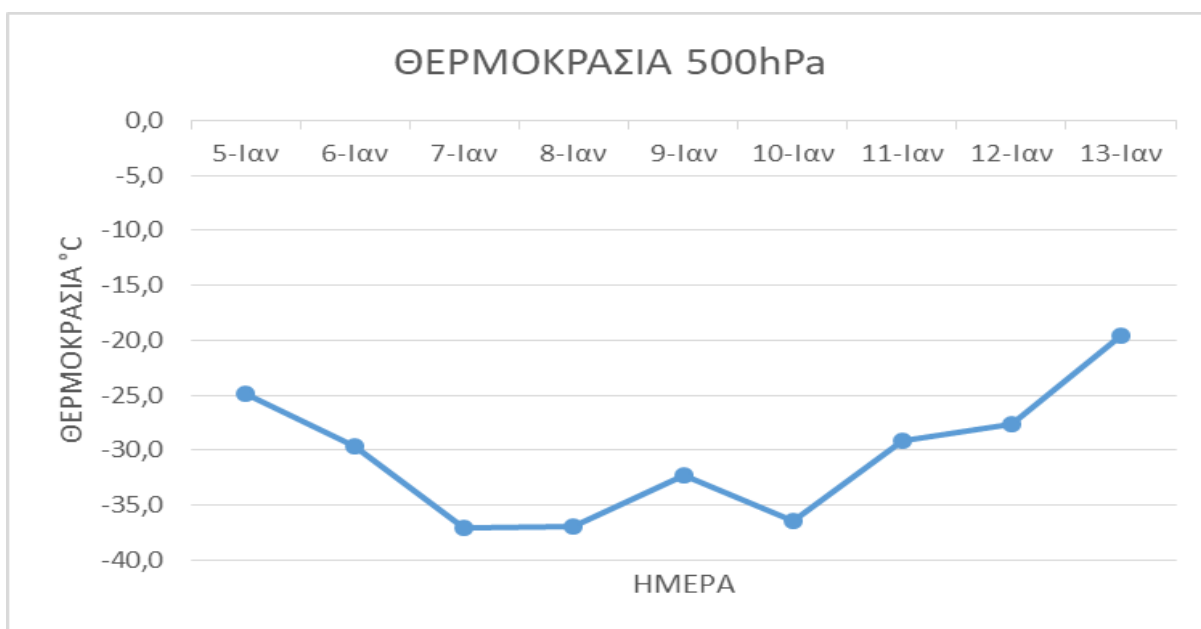


Σχήμα 3.7: Θερμοκρασίες στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa, από ραδιοβολίσεις του αεροδρομίου «Μακεδονία», για την περίοδο 5 έως 13 Ιανουαρίου 2017 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

² Έχει αναφερθεί ότι D= ημέρα έναρξης του επεισοδίου παγετού.



Σχήμα 3.8: Θερμοκρασίες στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa, από ραδιοβολίες του αεροδρομίου «Μακεδονία», για την περίοδο 5 έως 13 Ιανουαρίου 2017 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 3.9: Θερμοκρασίες στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για την περίοδο 5 έως 13 Ιανουαρίου 2017 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 3.10: Θερμοκρασίες στην ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa, από ραδιοβολίσξεις του αεροδρομίου «Μακεδονία», για την περίοδο 5 έως 13 Ιανουαρίου 2017 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Από ό,τι προκύπτει από τα γραφήματα της χρονικής πορείας της θερμοκρασίας στις διάφορες ισοβαρικές στάθμες, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται νωρίτερα στα υψηλότερα στρώματα και καθυστερούν στην κατώτερη τροπόσφαιρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Γενικά

Εξετάζοντας τις συνθήκες συνοπτικής κλίμακας και γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, για την περίοδο από 6 έως 13 Ιανουαρίου του έτους 2017, μπορούν να καθοριστούν οι συνθήκες οι οποίες ευνοούν τη δημιουργία παγετού. Έτσι, για τη μελέτη των συνθηκών δημιουργίας παγετού εξετάστηκαν τα αντίστοιχα συνοπτικά συστήματα, από την επιφάνεια έως την ανώτερη τροπόσφαιρα.

Από τα τέλη Νοεμβρίου 2016, η ανώτερη ροή στην ανατολική Ευρώπη έγινε μεσημβρινή, με διαταραχές να δημιουργούνται μέσα σε ένα ΒΔ ρεύμα, στη Βόρεια Ευρώπη, και ακολούθως να ενισχύονται, κινούμενες προς την Ανατολική Μεσόγειο. Όταν η κυκλοφορία αλλάζει σε μεσημβρινή, συμπεραίνουμε πως ο καιρός γίνεται πιο ασταθής με περισσότερες διαταραχές και πιο δύσκολος στην πρόβλεψή του, άρα και τα προγνωστικά σενάρια πιο αβέβαια. Λέγοντας ζωνική κυκλοφορία εννοούμε ότι οι άνεμοι στην ανώτερη ατμόσφαιρα φυσούν σχεδόν παράλληλα με τις νοητές γραμμές του γεωγραφικού πλάτους. Η μεσημβρινή κυκλοφορία, έχει απότομους αυλώνες (troughs) και ράχες (ridges), ευνοεί τον ασταθή καιρό, τις ψυχρές εισβολές και ο καιρός είναι πιο δύσκολα προβλέψιμος.

Στις 6 Ιανουαρίου 2017 ένα σχετικά βαθύ χαμηλό των υψών δημιουργήθηκε στο Ιόνιο, στο άκρο ενός αυλώνα που εκτεινόταν από την Ανατολική και Κεντρική Ευρώπη, με εξαιρετικά ψυχρές αέριες μάζες, $T_{500} \sim -40^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 4.2Α) και $T_{850} \sim -20^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 4.1Α). Το χαμηλό κινήθηκε στο Αιγαίο και οι πολύ ψυχρές αέριες μάζες μεταφέρθηκαν προς τη Μεσόγειο (βλ Σχήμα 4.1 και 4.2)

Όπως υποδηλώνει το γεγονός ότι η κατακόρυφη θερμοκρασιακή διαφορά π.χ. μεταξύ 500 και 850 hPa ήταν 20°C , η ψυχρή αέρια μάζα του αυλώνα ήταν ηπειρωτικής προέλευσης. Από ό,τι, μάλιστα, θα φανεί από τους χάρτες ανώτερης τροπόσφαιρας και, ειδικά από τις ραδιοβολίσσεις (Σχήμα 4.3), η ψυχρή μάζα ήταν σχετικά ρηχή, άρα έμενε χώρος μεταξύ αυτής και της τροπόπαυσης για να εισχωρήσουν θερμές αέριες μάζες, οι οποίες δημιούργησαν εκτεταμένο στρώμα νεφών, με πολύ ασθενείς χιονοπτώσεις κατά διαστήματα. Η ένταση των φαινομένων ήταν μικρή, καθ' όλο το διάστημα 6 – 9 Ιανουαρίου, καθώς δε σημειώθηκαν σημαντικές συγκλίσεις αερίων μαζών.

4.2 Κατακόρυφη δομή του παγετού μεταφοράς

Στις 00UTC 6 Ιανουαρίου η μετωπική επιφάνεια εμφανίζεται στη Θεσσαλονίκη στα 950 hPa, όπως φαίνεται στο τεφίγραμμα (Σχήμα 4.3A). Η πολύ έντονη κατακόρυφη διάτμηση του ανέμου (η μεταβολή στην ταχύτητα ή στην κατεύθυνση του ανέμου) σε αυτό το ύψος υποδηλώνει τη μεγάλη ένταση της μετωπικής επιφάνειας μέσω της αρχής του θερμικού ανέμου. Επίσης, η έντονη αυτή διάτμηση υποδηλώνει την πολύ μικρή κλίση της μετωπικής επιφάνειας.

Στην κατώτερη τροπόσφαιρα, μεταξύ 950 και 1000 hPa σημειώνονται εξαιρετικά μικρές τιμές σχετικής υγρασίας. Πράγματι, οι συνθήκες μέσα στην αρκτική αέρια μάζα είναι πολύ ξηρές.

Κατά τη διάρκεια της 6ης Ιανουαρίου 2017, το επιφανειακό μέτωπο συνεχίζει να κινείται ΝΑ. Η προς ΝΑ κίνηση του μετώπου συμπεραίνεται από τους χάρτες επιφανείας (δε δείχνονται), αλλά και από τις αναλύσεις των 850 hPa (Σχήμα 4.1A). Στη ραδιοβόλιση της 00UTC 7 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3B) σημειώνεται μια πολύ απότομη πτώση θερμοκρασίας μέσα σε 24 ώρες, ειδικά στα κατώτερα στρώματα, $\sim 15^{\circ}\text{C}$. Εκτός από το πολύ χαμηλό αέριο στρώμα (1000 – 950 hPa), η αρκτική αέρια μάζα είναι πολύ ευσταθής, με θερμοκρασιακή διαφορά μόνο δύο (2) βαθμών από τα 950 έως τα 800 hPa. Επίσης, ο αρκτικός αέρας είναι και πολύ ρηχός, αφού εκτείνεται μόνο έως τα 800 hPa. Αυτό, εκτός από την έντονη αναστροφή, που υπάρχει εκεί, το δηλώνει και η έντονη διάτμηση μεταξύ π.χ. 850 και 750 hPa.

Η θερμοκρασία πέφτει και στην ανώτερη τροπόσφαιρα, αλλά με πιο αργούς ρυθμούς, $\sim 10^{\circ}\text{C}$ από τις 00UTC 6 (Σχήμα 4.3A) έως τις 00UTC 7 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3B). Η πτώση αυτή της θερμοκρασίας στα ανώτερα στρώματα σχετίζεται περισσότερο με την κίνηση του αυλώνα προς την Ανατολή.

Έως και τις 00UTC 7 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Α) το ανώτερο ρεύμα συνεχίζει να πνέει από τα ΝΝΔ, εξασθενώντας κατά τη διάρκεια της ημέρας, για να γίνει την επόμενη ημέρα, 8 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Β) 2017, ασθενές μεταβλητό. Αυτή η εξέλιξη στα ανώτερα στρώματα έχει άμεση σχέση με το ότι ο άξονας – αρχικά – του αυλώνα διήλθε επάνω από την Ελλάδα, που γρήγορα μετατράπηκε σε κέντρο του αποκομμένου χαμηλού στα 500 hPa (Σχήμα 4.2Γ). Το αποκομμένο αυτό χαμηλό χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και κατερχόμενη τροπόπαυση.

Πράγματι, όπως φαίνεται στο τεφίγραμμα της 00UTC 8 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Γ), η τροπόπαυση έχει κατέλθει στα 400 hPa, ή και χαμηλότερα. Στις 00UTC 8 Ιανουαρίου το κατακόρυφο προφίλ της θερμοκρασίας είναι αντιπροσωπευτικό της επικράτησης δύο διαφορετικών αερίων μαζών, παρ' όλο που και οι δύο ήταν ψυχρές: μιας ευσταθούς αρκτικής αέριας μάζας από την επιφάνεια έως τα 850 hPa, μεταφερόμενης από τα βόρεια (παγετός μεταφοράς) και μιας πολικής αέριας μάζας, από τα 850 έως περίπου τα 550 hPa. Από εκεί και επάνω, παρατηρείται κυρίως στρατοσφαιρικός, ξηρός αέρας.

Όσον αφορά τη σχετική υγρασία, ενώ η αρκτική αέρια μάζα είναι ξηρή, η πολική, που βρίσκεται από επάνω, είναι σχετικά υγρή και υποδηλώνει θαλάσσια προέλευση, ή εμπλουτισμό από την κυκλοφορία του μετωπικού συστήματος, που στις 00UTC 7 Ιανουαρίου βρισκόταν στην περιοχή της δυτικής Τουρκίας (Σχήμα 4.3Γ)

Κατά τη διάρκεια της 7ης Ιανουαρίου, ο αυλώνας προχωράει ελάχιστα νοτιότερα και αποκόπτεται σταδιακά (Σχήμα 4.2Β). Παρά την κίνηση του συστήματος προς νότο, τα ύψη στα 500 hPa μειώνονται ελαφρά (Σχήμα 4.2Β). Ακόμη, η περιοχή στην οποία $T_{500} < -35^{\circ}\text{C}$ αυξάνει και αυτή στην περιοχή του αποκομμένου χαμηλού.

Εκτός από την μικρή περαιτέρω πτώση θερμοκρασιών – υψών στα 500 hPa, στις 00UTC 8 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.2Γ) το σύστημα αυλώνα-ψυχρής μάζας λαμβάνει θέση ακριβώς επάνω από την Ελλάδα. Έτσι, η ραδιοβόλιση της Θεσσαλονίκης (Σχήμα 4.3Γ) είναι αντιπροσωπευτική των συνθηκών του κέντρου του αυλώνα. Πράγματι, οι άνεμοι στις 00UTC 8 Ιανουαρίου σε όλη σχεδόν την τροπόσφαιρα και σε μέρος της στρατόσφαιρας (900 – 300 hPa) είναι ασθενείς μεταβλητοί. Ψηλά στη στρατόσφαιρα ($P < 300$ hPa) πνέουν

ισχυροί δυτικοί άνεμοι. Τέλος, στο κατώτερο στρώμα, έως τα 850 - 900 hPa, πνέουν ισχυροί βόρειοι άνεμοι, των οποίων και ο ρόλος είναι να μεταφέρουν την αρκτική αέρια μάζα στα κατώτερα στρώματα (Σχήμα 4.5Γ).

Κατά τη διάρκεια της 8ης Ιανουαρίου (Σχήμα 4.1Γ) η πολική αέρια μάζα, που επικρατεί στα 850 hPa, μετακινεί τον πυρήνα της ανατολικά – ΒΑ της Ελλάδας και υφίσταται σημαντική εξασθένηση, πιθανώς λόγω αδιαβατικής θέρμανσης. Η θέρμανση, στο μεγαλύτερο μέρος της τροπόσφαιρας, ειδικά στο στρώμα 750 – 400 hPa, όπου μεγιστοποιούνται και οι καθοδικές κινήσεις, είναι ορατή και στο τεφίγραμμα της 00UTC 9 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Δ).

Κατά τη διάρκεια της 9ης Ιανουαρίου, η ψυχρή αέρια μάζα μετακινείται στα ΒΑ Βαλκάνια, κυκλοφορεί κυκλωνικά κατά μήκος της περιφέρειας του αποκομμένου χαμηλού και στις 00UTC 10 Ιανουαρίου επηρεάζει ξανά το Ιόνιο (Σχήμα 4.1).

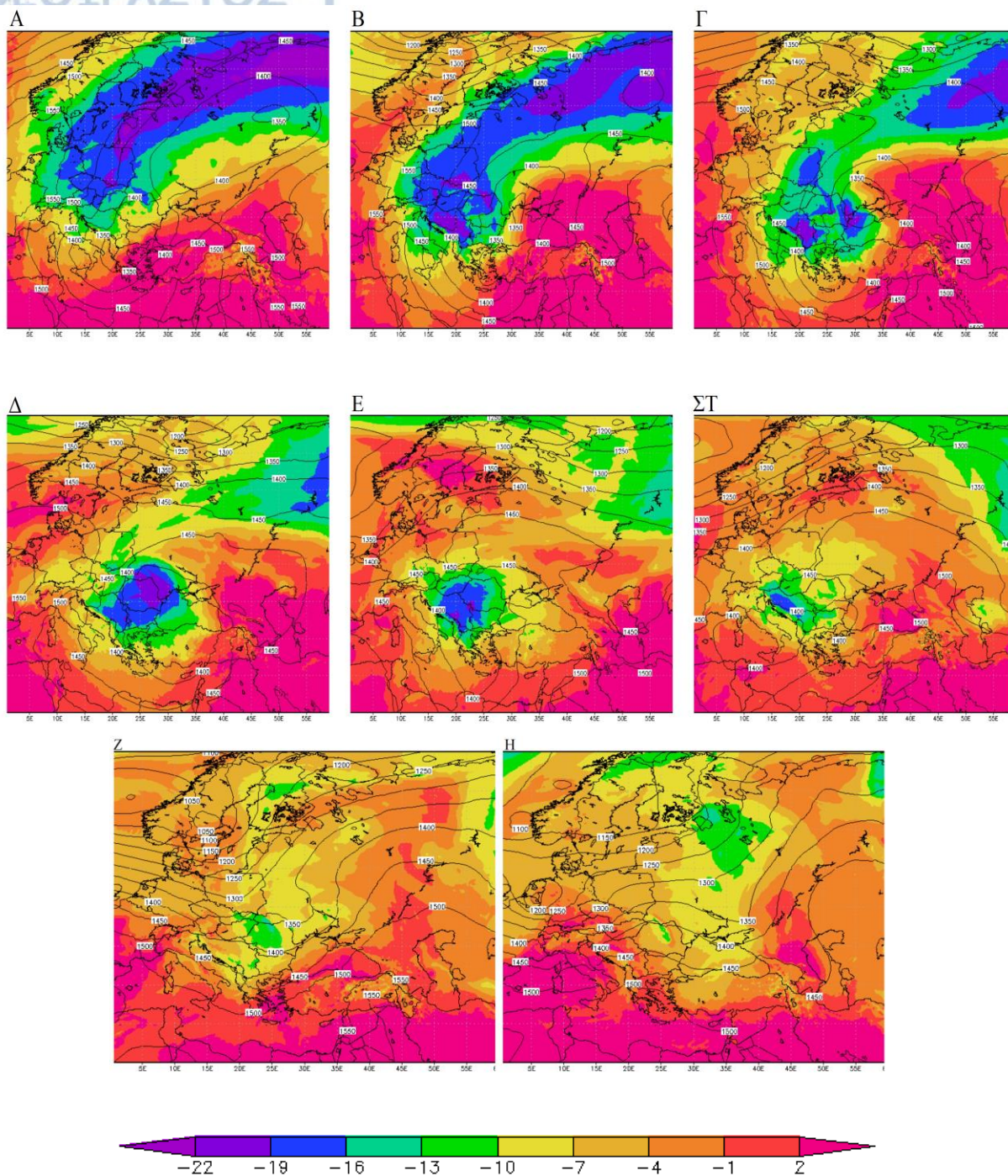
Η απότομη στροφή των ανέμων από ΒΔ σε ΝΔ στο τεφίγραμμα της 00UTC 10 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Ε), και η εκ νέου πτώση της θερμοκρασίας στη μέση τροπόσφαιρα, είναι ενδεικτικά του πόσο έχει βαθύνει ο αυλώνας στο Ιόνιο. Η εξασθένηση (θέρμανση) της αρκτικής, όμως, αέριας μάζας, συνεχίζεται, γεγονός που επικυρώνει τη διαφορετική προέλευση των δύο αερίων μαζών, πολικής και αρκτικής. Παρ' όλη την εξασθένηση της αρκτικής αέριας μάζας, ολικός παγετός ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) εξακολουθεί να επικρατεί στη Θεσσαλονίκη. Αυτό που αλλάζει στον καιρό, είναι η εκδήλωση της σημαντικής χιονόπτωσης, σχετιζομένης με το βαρομετρικό χαμηλό, που κατά τη διάρκεια της 10ης Ιανουαρίου 2017 λαμβάνει θέση στο Αιγαίο (Σχήμα 4.1Ε).

4.3 Κατακόρυφη δομή του παγετού ακτινοβολίας

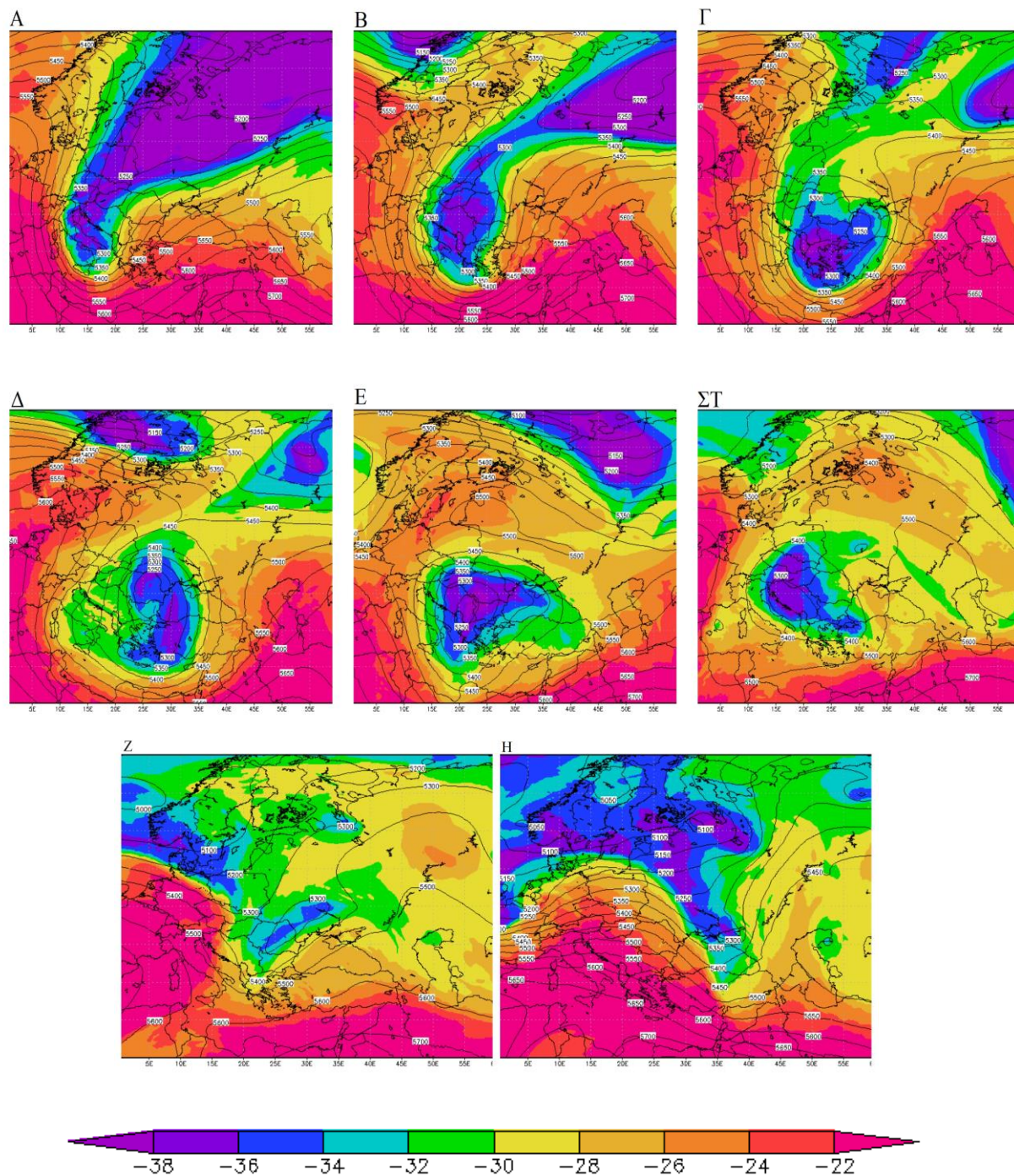
Απομακρυνόμενος ο αυλώνας και το βαρομετρικό χαμηλό προς τα ΒΑ στις 11 Ιανουαρίου 2017 00UTC (Σχήμα 4.1ΣΤ), ο ουρανός γίνεται αίθριος και, σε συνδυασμό με την ξηρασία καθ' ύψος (Σχήμα 4.4ΣΤ), που επικρατεί πίσω από τον αυλώνα και την αυξημένη επιφανειακή λευκαύγεια (albedo), σημειώνεται έντονος παγετός ακτινοβολίας, ο οποίος, στην περιοχή του κέντρου της Θεσσαλονίκης ήταν ισχυρότερος από τον παγετό μεταφοράς, που είχε προηγηθεί.

Μετά τη χιονόπτωση οι θερμοκρασίες ανέβηκαν πολύ γρήγορα και τα ύψη στα 500 hPa, όπως και αρχίζει να επιταχύνεται και η εξασθένηση της αρκτικής αέριας μάζας. Η οριστική αποχώρηση της αρκτικής αέριας μάζας λαμβάνει χώρα στις 13 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.1Η και Σχήμα 4.2Η), αφού προηγουμένως στις 11-12 Ιανουαρίου ένα άλλο σύστημα βαρομετρικού χαμηλού (trough) προκάλεσε μια τελευταία μικρή αναζωπύρωση. Πράγματι, στο τεφίγραμμα της 00UTC 12 Ιανουαρίου (σχήμα 4.3ΣΤ) φαίνονται τα υπολείμματα αυτού του νεφικού συστήματος.

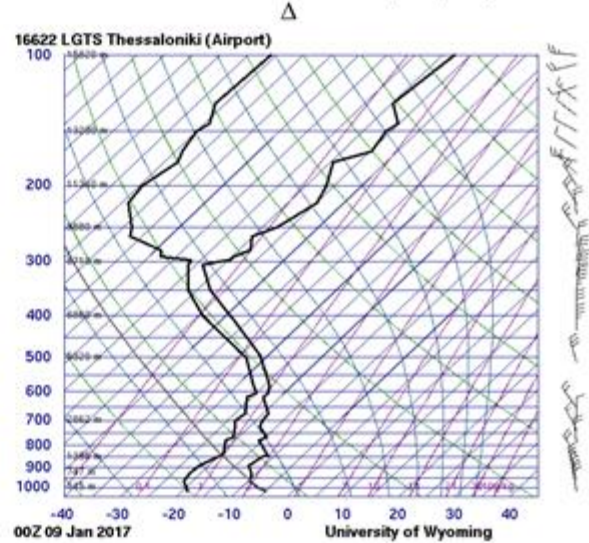
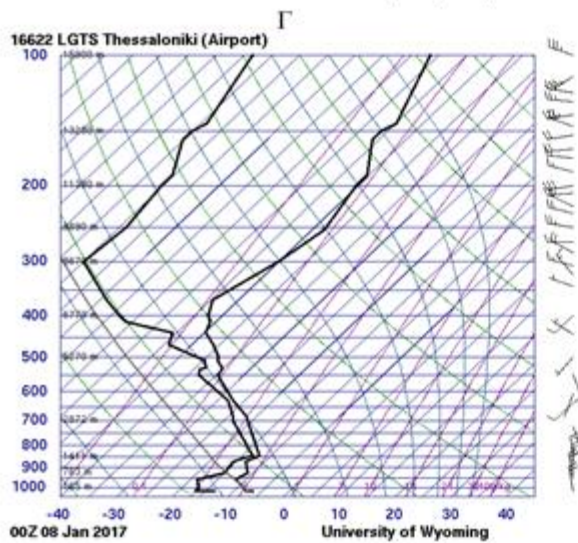
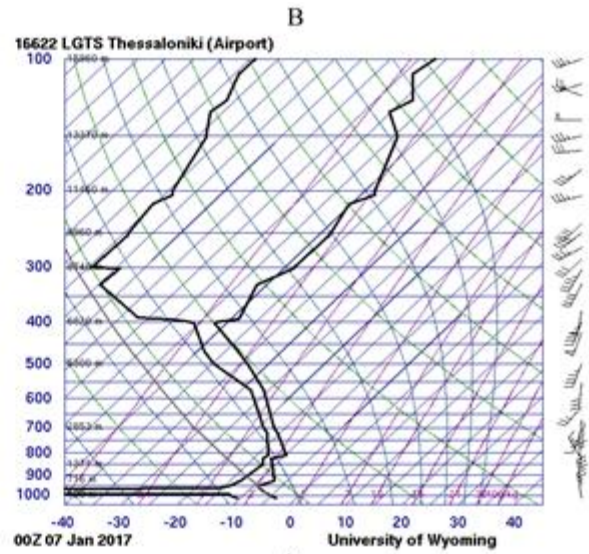
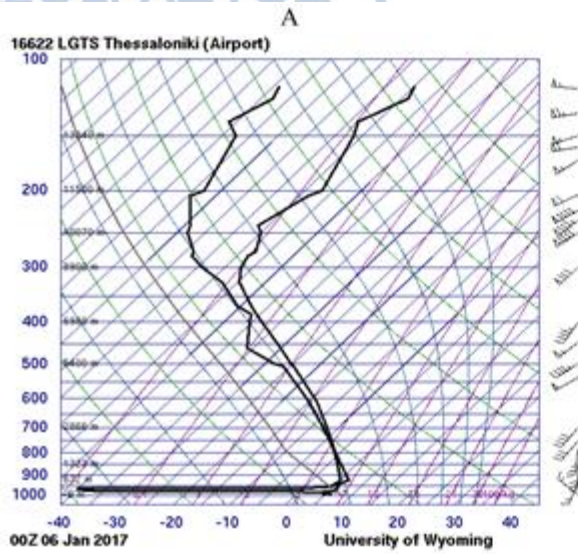
Στις 13 Ιανουαρίου επικρατεί μια ράχη (ridge) και – καθώς όλες οι προϋποθέσεις (έντονη καθ' ύψος ξηρασία, άπνοια και μεγάλο albedo, λόγω της χιονόστρωσης) ήταν ευνοϊκές – δημιουργείται έντονη επιφανειακή αναστροφή (~ 10°C στα κατώτερα 200 m) και ισχυρός παγετός ακτινοβολίας (σχήμα 4.3Η).

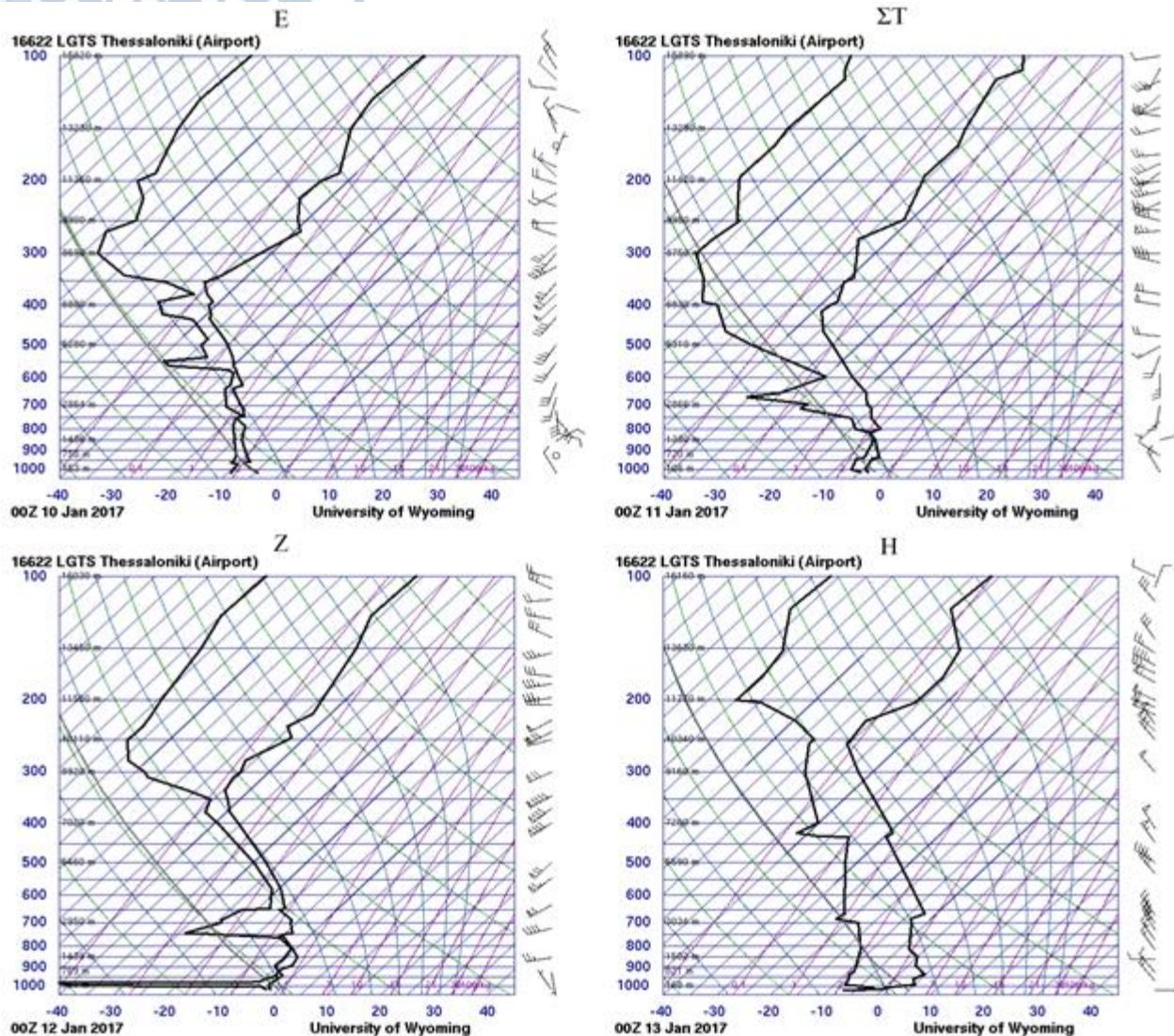


Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της θερμοκρασίας (°C, χρωματική κλίμακα) και του γεωδυναμικού ύψους (gpm) ανά 24 ώρες στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 mb στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Α), 07/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Β), 08/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Γ), 09/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Δ), 10/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Ε), 11/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.1Η).

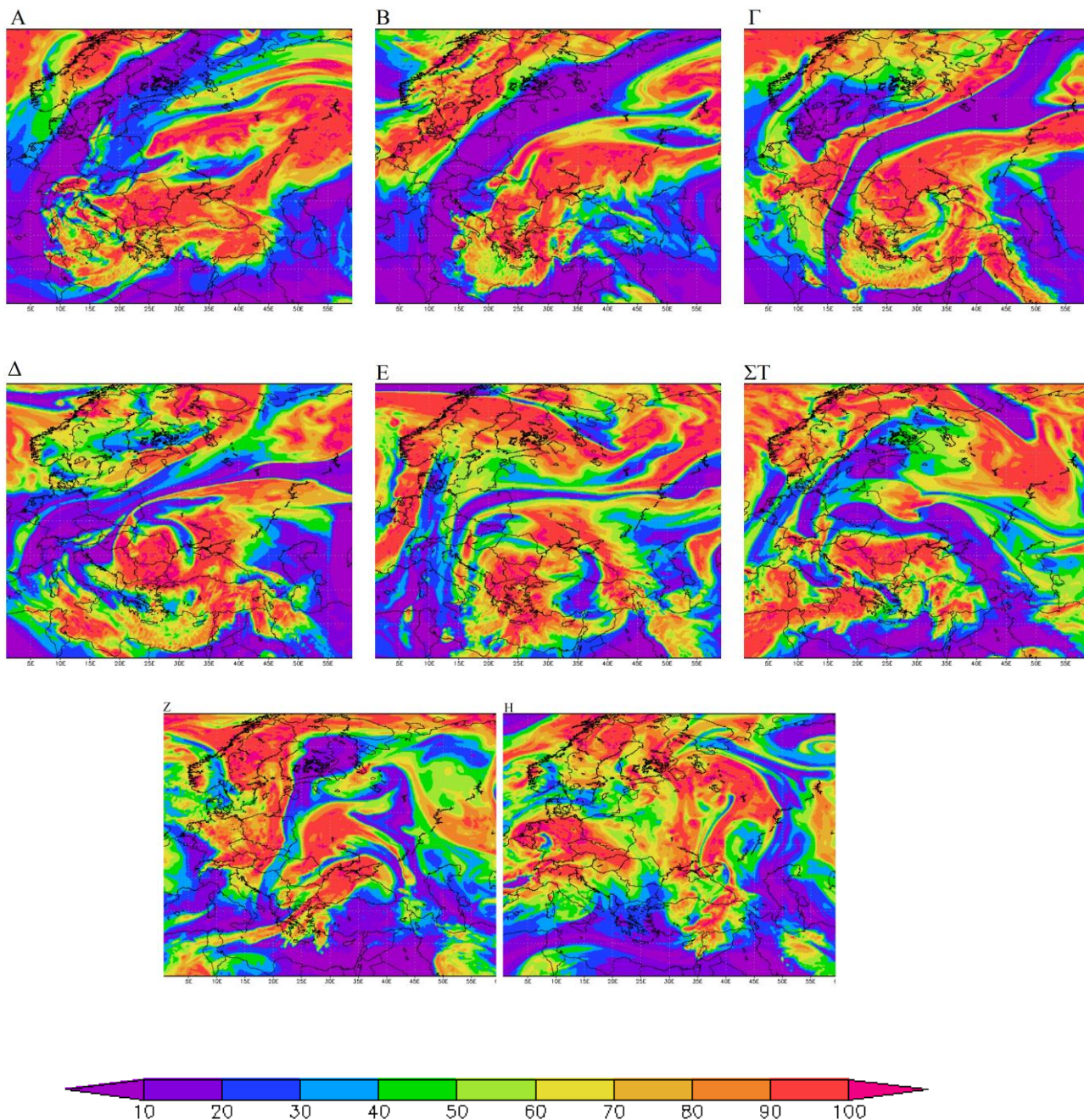


Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της θερμοκρασίας (°C, χρωματική κλίμακα) και του γεωδυναμικού ύψους (gpm) ανά 24 ώρες στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 mb στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.2Α), 07/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2Β), 08/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2Γ), 09/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2Δ), 10/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2Ε), 11/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.2Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.2Η).

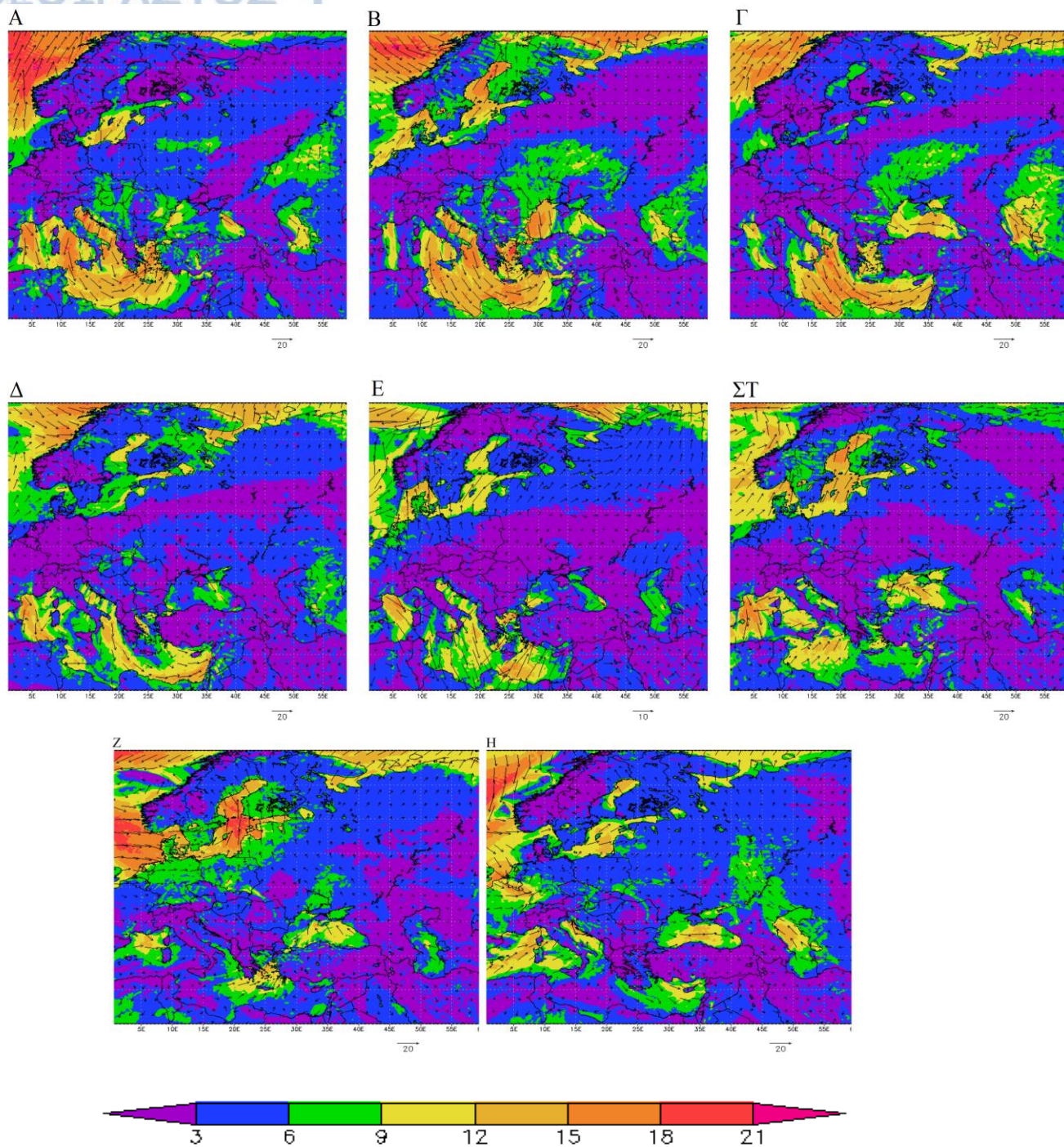




Σχήμα 4.3: Τεφιγράμματα από το αεροδρόμιο «Μακεδονία» της Θεσσαλονίκης στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Α), 07/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Β), 08/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Γ), 09/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Δ), 10/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Ε), 11/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3 ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.3Η).

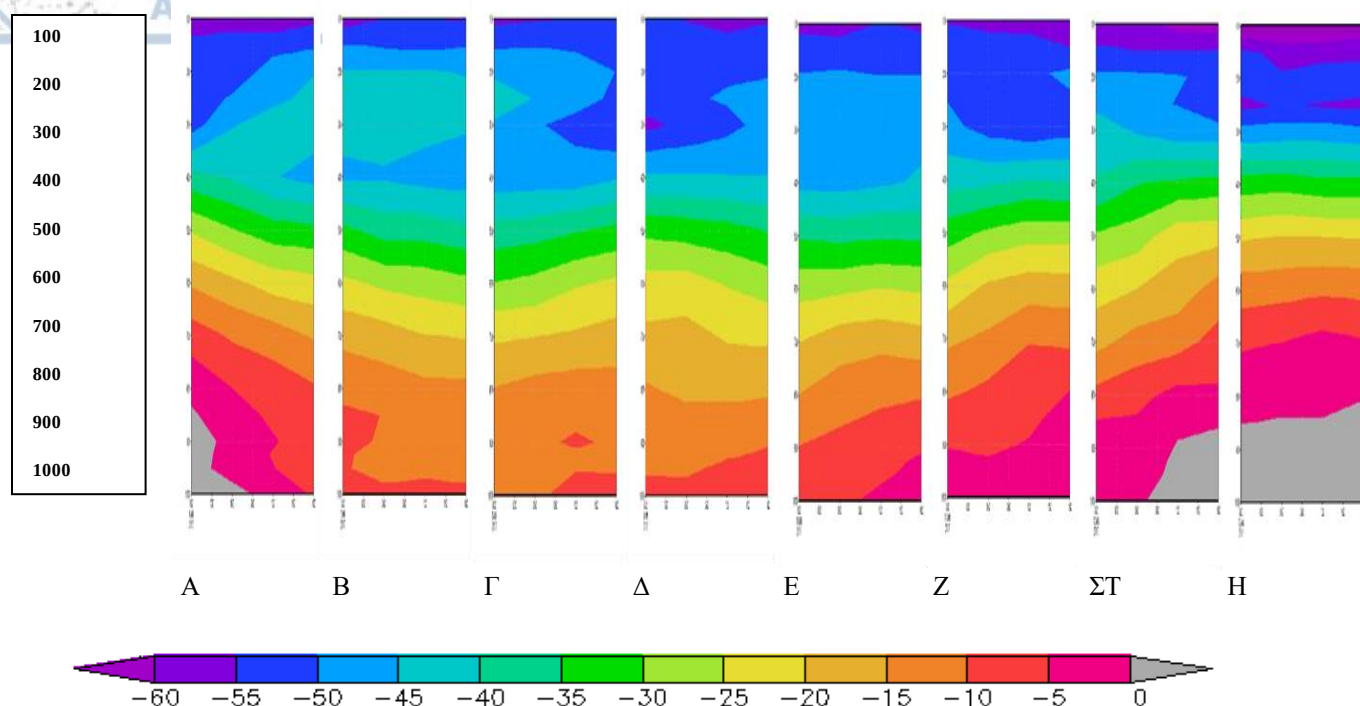


Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της σχετικής υγρασίας (% , χρωματική κλίμακα) ανά 24 ώρες στην ισοβαρική επιφάνεια των 700 hPa στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.4Α), 07/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4Β), 08/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4Γ), 09/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4Δ), 10/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4Ε), 11/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.4Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.4Η).



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου στα 10μ (m/s, χρωματική κλίμακα) ανά 24 ώρες στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.5A), 07/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5B), 08/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5Γ), 09/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5Δ), 10/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5Ε), 11/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.5Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.5Η).

4.4 Θερμοδυναμική ανάλυση των επεισοδίων παγετού



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Hovmöller που απεικονίζει τη μεταβολή της θερμοκρασίας (°C, χρωματική κλίμακα) ανά 24 ώρες στα ισοβαρικά επίπεδα 1000-100 mb πάνω από την πόλη της Θεσσαλονίκης στις 06/01/2017 00UTC (σχήμα 4.6A), 07/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6B), 08/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6Γ), 09/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6Δ), 10/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6Ε), 11/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6ΣΤ), 12/01/2017 00UTC (Σχήμα 4.6Ζ) και 13/01/2017 00UTC (σχήμα 4.6Η).

Όσον αφορά στην περίπτωση του καιρικού συστήματος της 6 – 12 Ιανουαρίου 2017, στην παρούσα μελέτη το ενδιαφέρον εστιάζεται στα θερμοκρασιακά του χαρακτηριστικά. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας καθ' ύψος απεικονίζεται στο σχήμα 4.6 το οποίο έχει κατασκευαστεί με δεδομένα αναλύσεων του ECMWF. Όπως αναφέρθηκε και στη συνοπτική περιγραφή, καθώς η Θεσσαλονίκη βρέθηκε ακριβώς μέσα στον πολικό στρόβιλο της 6 – 12 Ιανουαρίου 2017, το Hovmoller του σχήματος αυτού περιγράφει ικανοποιητικά την εξέλιξη των θερμοκρασιακών χαρακτηριστικών του.

Το κύμα ψύχους, που συνόδευσε το καιρικό σύστημα της 6 – 12 Ιανουαρίου 2017 είναι ορατό στο Σχ. 4.6 σαν μια βύθιση των ισοθέρμων προς τα κάτω, ιδιαίτερα κάτω από τα 900

hPa. Πράγματι, περίπου στα 950 hPa παρατηρείται από τις 7 έως και τις 10 Ιανουαρίου ένα ελάχιστο θερμοκρασίας (Σχ. 4.6B-E) με αποκορύφωμα στις 8 Ιανουαρίου, οπότε και κλείνει η ισόθερμος των -11°C . Όπως φάνηκε χαρακτηριστικά και στο τεφίγραμμα της 8 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Γ) επικράτησαν δύο διαφορετικές ψυχρές αέριες μάζες καθ' ύψος, μία ευσταθής αρκτική στα χαμηλά στρώματα και μία ασταθής πολική ψηλότερα. Η διαφορετική κατακόρυφη θερμοβαθμίδα στις δύο αέριες μάζες, φαίνεται και στα γραφήματα του σχήματος 4.6. Ενώ η ψυχρότερη χρονική στιγμή για την αρκτική αέρια μάζα ($p > 850$ hPa) ήταν στις 00UTC 8 Ιανουαρίου, οπότε και «έκλεισε» η ισόθερμη των -11°C στα ~ 950 hPa, το αέριο στρώμα 850 - 700 hPa παρουσίασε μικρότερες τιμές στις 00UTC 10 Ιανουαρίου. Η ένταση της πολικής αέριας μάζας στα 500 hPa ήταν μεγαλύτερη κατά την εμφάνισή της (00UTC 8 Ιανουαρίου), αφού από τότε και μετά έλαβε χώρα σταδιακή μείωση της κατακόρυφης έκτασής της, το οποίο οφειλόταν όμως και σε κάθοδο της τροπόπαυσης.

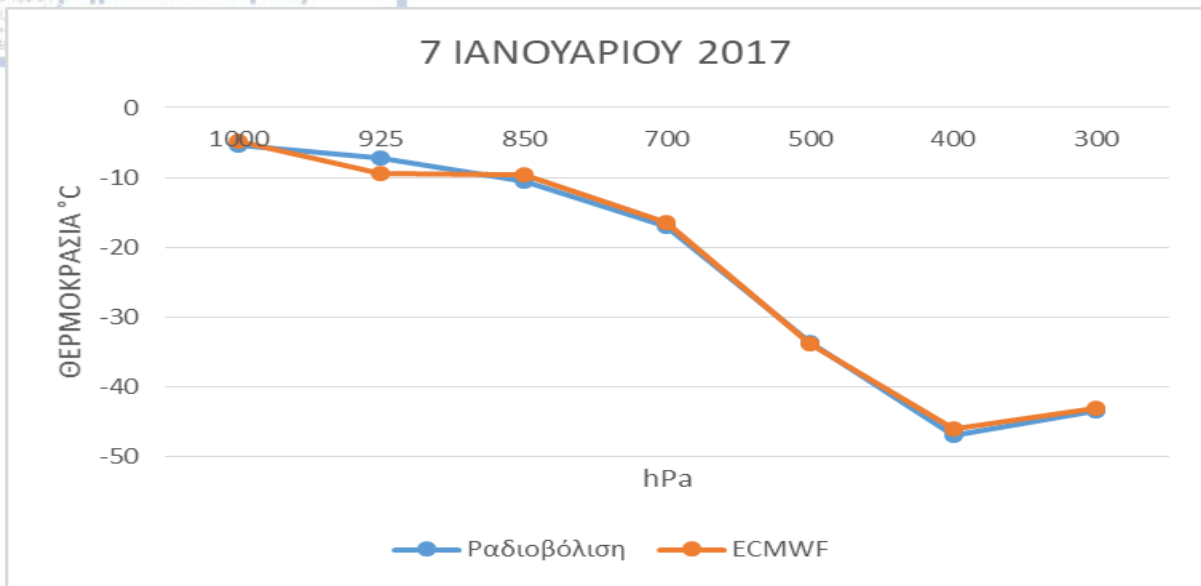
ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια προσπάθεια να μελετηθεί και να αναλυθεί η συνοπτική κατάσταση που οδήγησε στο επεισόδιο παγετού μεταφοράς στην περίοδο από 6 έως 10 Ιανουαρίου 2017), το οποίο εξελίχθηκε σε επεισόδιο παγετού ακτινοβολίας στην περίοδο από 11 έως 13 Ιανουαρίου 2017. Συνοψίζοντας θα μπορούσαν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

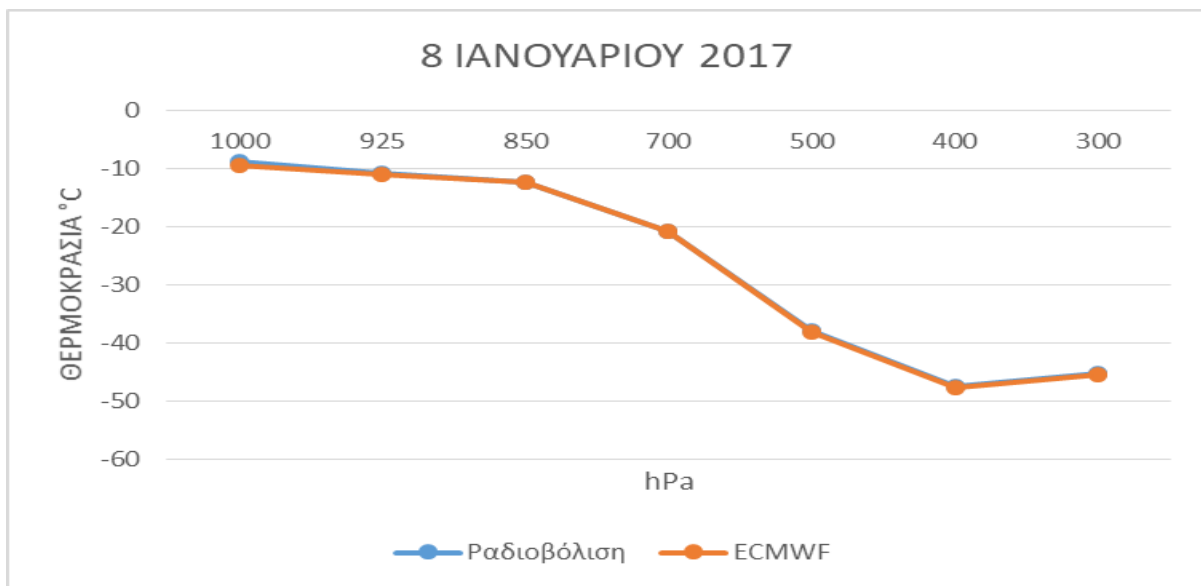
Στις 6 Ιανουαρίου 2017 δημιουργήθηκε βαρομετρικό χαμηλό το οποίο μετακινήθηκε πάνω από τη Θεσσαλονίκη, με εξαιρετικά ψυχρές αέριες μάζες. Οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες οφείλονται στη μεταφορά δύο διαφορετικών ψυχρών αέριων μαζών, μιας πολικής και μιας αρκτικής.

Το επεισόδιο του παγετού μεταφοράς οφείλεται στο σχηματισμό αυλώνα ο οποίος προκάλεσε ισχυρούς ανέμους, ενώ το επεισόδιο του παγετού ακτινοβολίας οφείλεται στην υποχώρησή του και σε άπνοια.

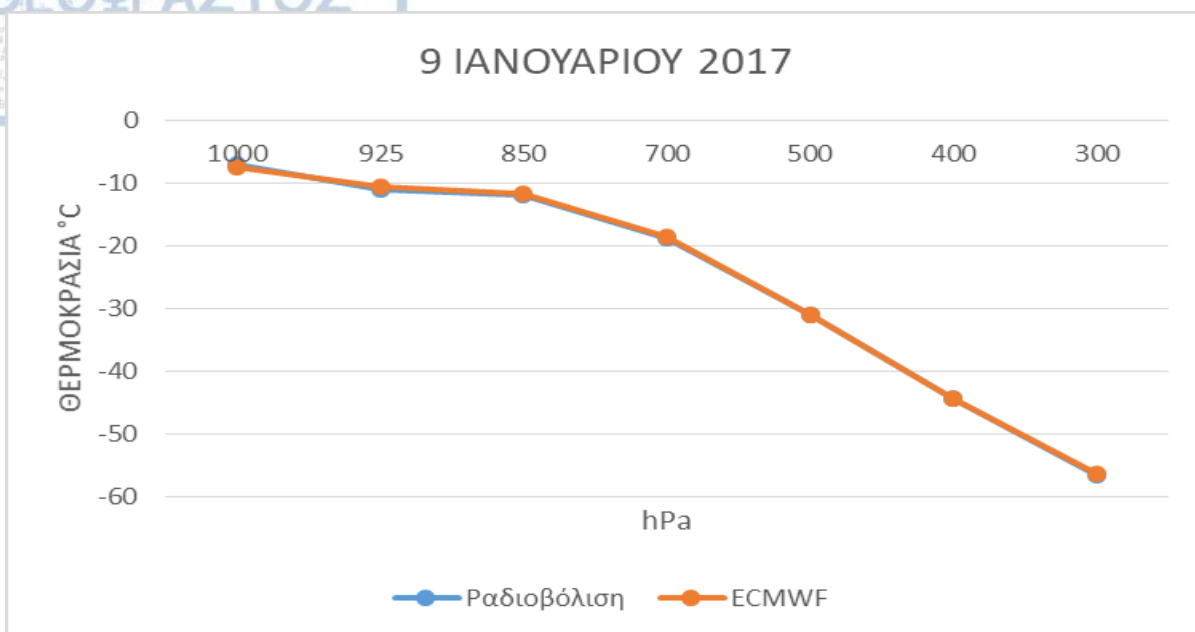
4.5 Σύγκριση πραγματικών ραδιοβολίσεων με κατακόρυφα προφίλ αναλύσεων ECMWF



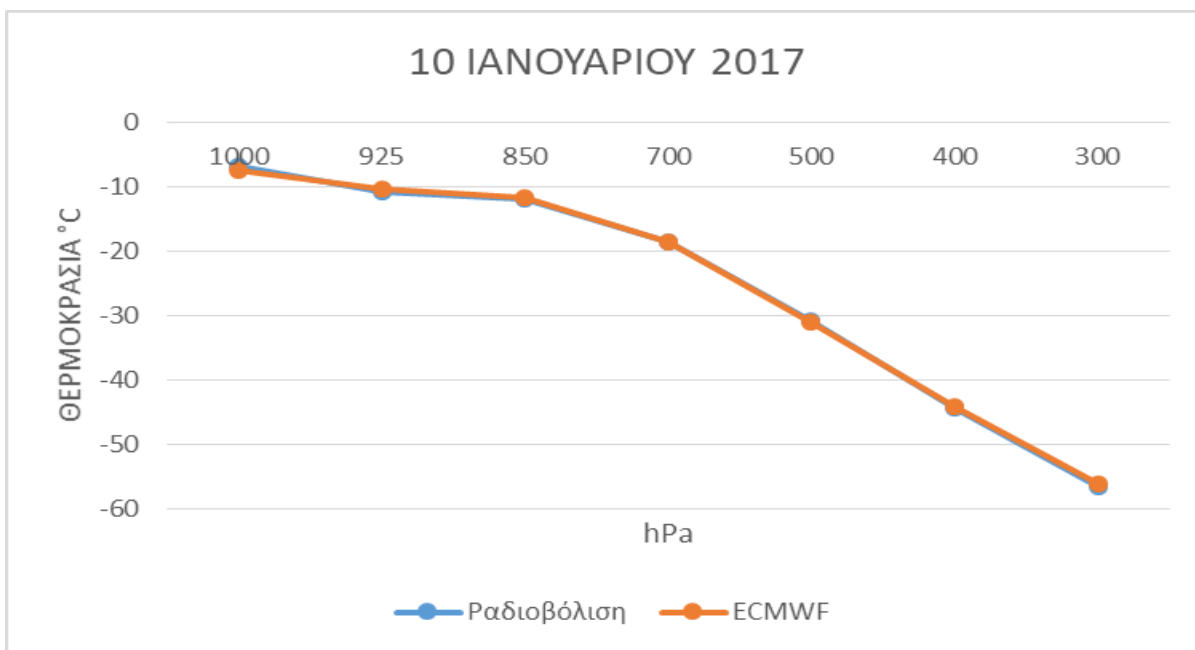
Σχήμα 4.7: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 07/01/2017.



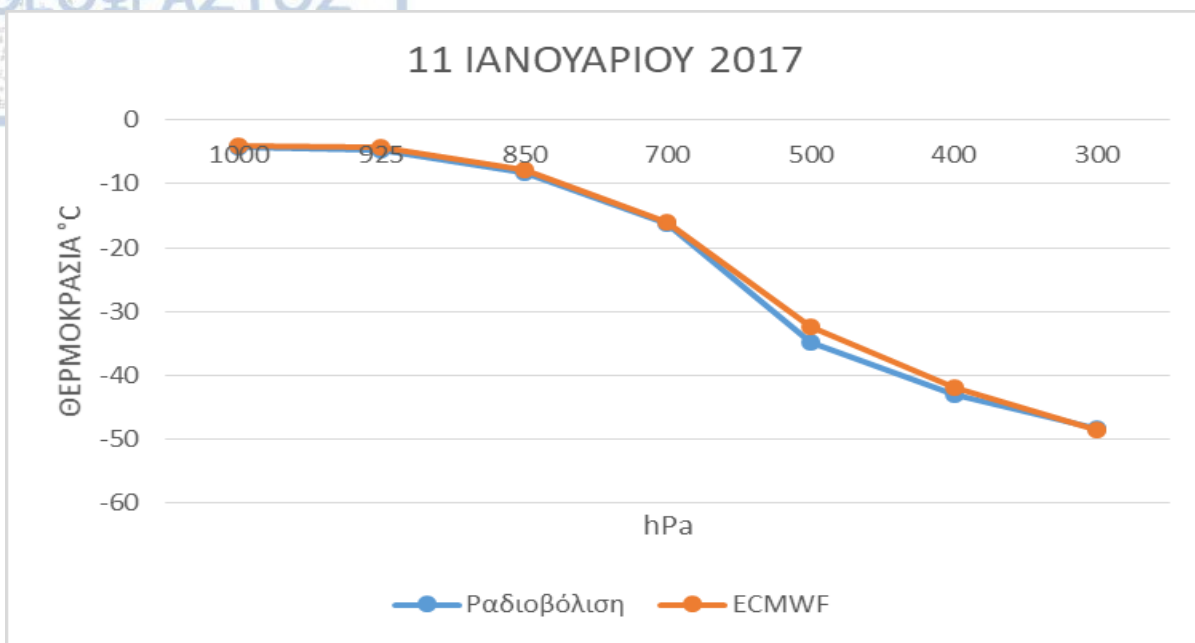
Σχήμα 4.8: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 08/01/2017.



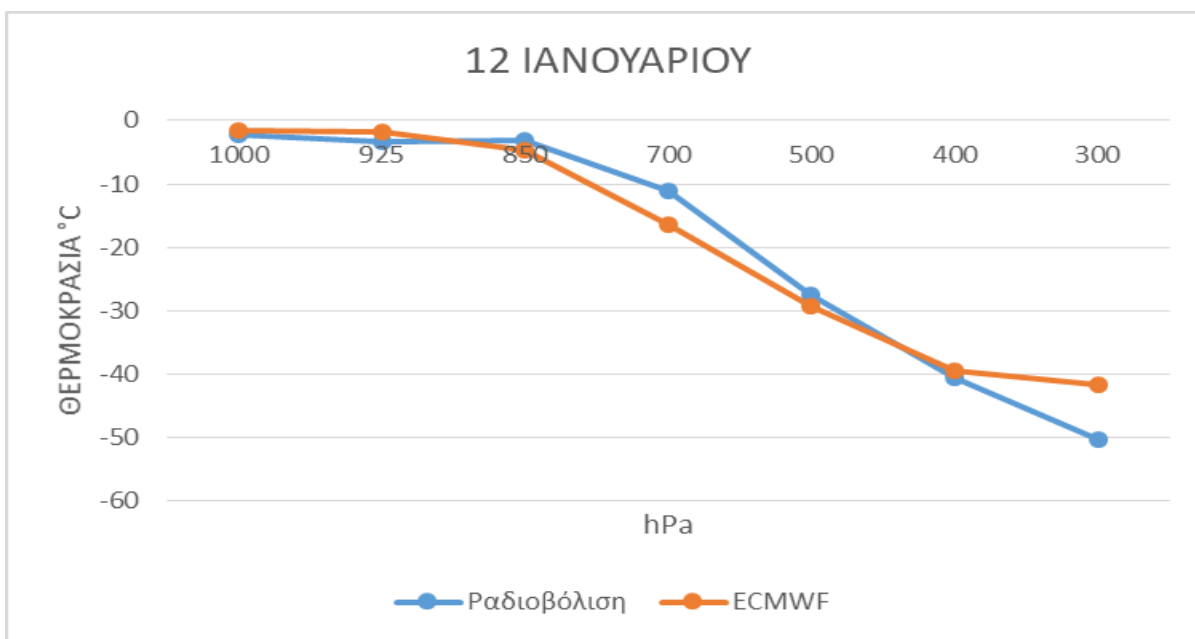
Σχήμα 4.9: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 09/01/2017.



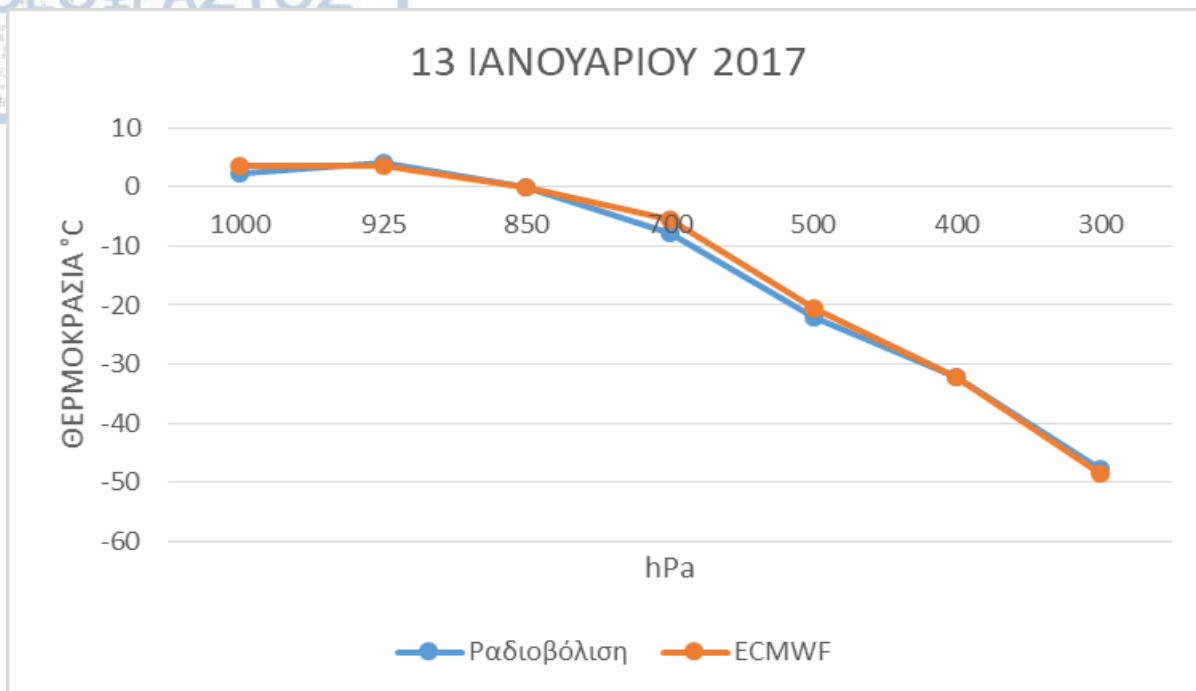
Σχήμα 4.10: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 10/01/2017.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 11/01/2017.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 12/01/2017.



Σχήμα 4.13: Σύγκριση της πραγματικής ραδιοβόλισης (γαλάζιο) με το κατακόρυφο προφίλ αναλύσεων ECMWF (πορτοκαλί) από την ισοβαρική επιφάνεια των 1000 hPa έως την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa στις 13/01/2017.

Στις 7 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.7), στα 1000 hPa, που τη συγκεκριμένη ημέρα είναι σε υψόμετρο ~ 100m, έχει πιο πολύ κρύο στην πραγματικότητα (κατά 1 - 2 βαθμούς), από ό,τι αναλύει το μοντέλο του ECMWF. Και αυτό συμβαίνει παρ' όλο που σίγουρα η ραδιοβολίδα παρασύρθηκε από τον ισχυρό ΒΒΔ άνεμο νότια, προς θερμότερες αέριες μάζες. Άρα η ένταση του ψύχους στα 100m υποεκτιμάται σημαντικά (λογικά αρκετά περισσότερο από 2 βαθμούς) από το ECMWF. Άρα λοιπόν το ECMWF «προβλέπει» λιγότερη ευστάθεια μέσα στην αρκτική αέρια μάζα, από αυτήν που τελικά επικρατεί στην πραγματικότητα. Τέλος, στα 850 hPa, το ECMWF και πάλι υπερεκτιμά σημαντικά τη θερμοκρασία.

Τις επόμενες τρεις ημέρες, στα σχήματα 4.8, 4.9 και 4.10 αντίστοιχα, φαίνεται μια αξιοσημείωτη ταύτιση των θερμοκρασιών, αλλά, και πάλι επισημαίνεται ότι στο στρώμα 1000 - 850 hPa, όπου πνέουν οι ισχυροί βόρειοι άνεμοι, η ραδιοβολίδα παρασύρεται προς τα

νότια, άρα θα έπρεπε η πορτοκαλί γραμμή (ECMWF), να βρίσκεται χαμηλότερα της μπλε (δεδομένα ραδιοβόλισης), αν η προσομοίωση του ECMWF ήταν ακριβής.

Στις 11 Ιανουαρίου, που οι βόρειοι άνεμοι έχουν ήδη εξασθενήσει και ο παγετός έχει μετατραπεί σε ακτινοβολίας, εξακολουθεί να υπάρχει ταύτιση στα χαμηλά επίπεδα. Στα ανώτερα επίπεδα (500 hPa), υπάρχουν, από τις 11 Ιανουαρίου και μετά, διαφορές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η κάλυψη ραδιοβολίσεων δεν είναι επαρκής, ώστε να γίνει ικανοποιητική προσομοίωση από το ECMWF.

Όσον αφορά τα χαμηλά στρώματα, στις 12 - 13 Ιανουαρίου παρατηρείται μια μικρή υπερεκτίμηση της θερμοκρασίας από το ECMWF. Ωστόσο, αυτό δεν είναι σαφές αν έχει σχέση με το φαινόμενο του παγετού ακτινοβολίας, καθώς αυτός, από ό,τι προκύπτει από τη ραδιοβόλιση π.χ. της 12ης Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Z), λαμβάνει χώρα σε στάθμες με $p > 1000$ hPa.

4.6 Χαρακτηριστικά του παγετού

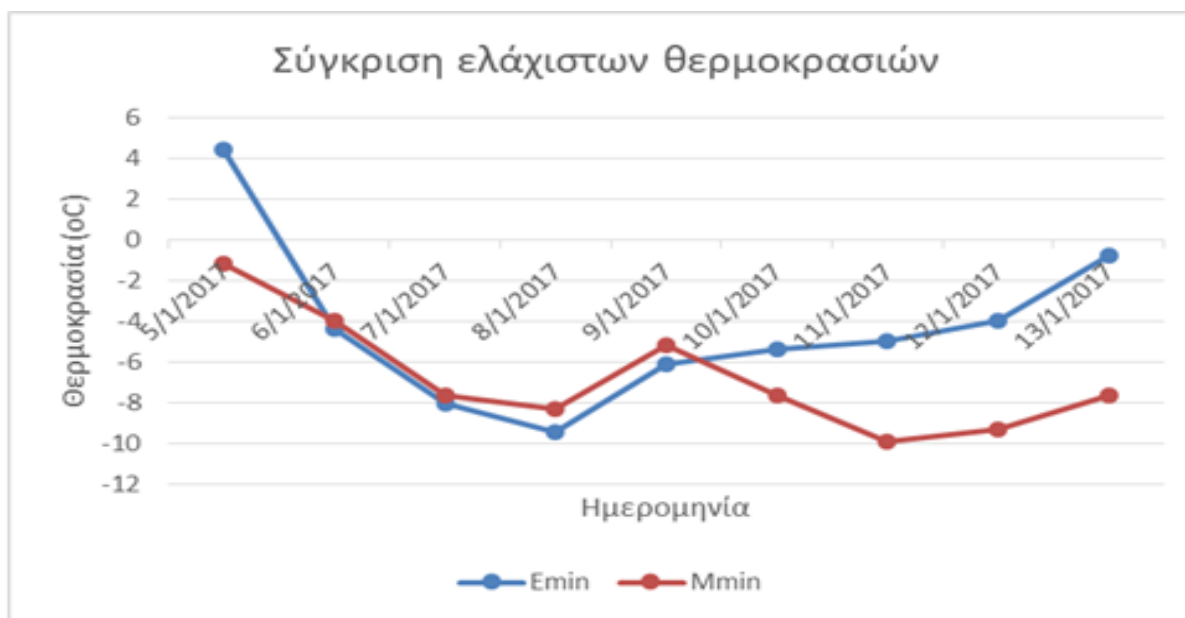
Όπως συμβαίνει στα περισσότερα επεισόδια έντονου παγετού, το υπό μελέτη επεισόδιο παγετού άρχισε το βράδυ της 6ης Ιανουαρίου, ως παγετός μεταφοράς, με μικρά ημερήσια θερμοκρασιακά εύρη (HΘΕ), διαρκώντας, στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθ' όλο το 24-ωρο (ολικός παγετός), και μετατράπηκε σε παγετό ακτινοβολίας τις πρώτες πρωινές ώρες της 10ης Ιανουαρίου, με μεγαλύτερα, ολοένα αυξανόμενα HΘΕ.

Όπως φαίνεται στα στατεογράμματα των σχημάτων 4.3ΣΤ, 4.3Z και 4.3 η αλλαγή της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας του παρεδάφιου αέριου στρώματος, καθορίζει τη μετάβαση από τον παγετό μεταφοράς στον παγετό ακτινοβολίας. Πράγματι, ενώ έως και τις 00UTC 11 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3ΣΤ) η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα είναι έντονα θετική με το ύψος στο παρεδάφιο στρώμα ($\sim 4^{\circ}\text{C}$ πτώση θερμοκρασίας από την επιφάνεια έως τα 950 hPa, από τις πρωινές ώρες της 11 Ιανουαρίου μειώνεται, για ν' αλλάξει πρόσημο από τις 00UTC 12 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3Z) και να φτάσει στις 00UTC 13 Ιανουαρίου (Σχήμα 4.3H) να σημειώνει έως και 10°C άνοδο, στο ίδιο παρεδάφιο στρώμα, που πριν σημείωνε πτώση. Η

έντονη αυτή αναστροφή χαρακτηρίζει πάντα τους παγετούς ακτινοβολίας, αφού είναι, άλλωστε, και η αιτία δημιουργίας τους.

Πάντως, καθώς ο παγετός μεταφοράς οφείλεται συνήθως σε αέρια μάζα προερχόμενη από τα βόρεια, είτε το ψυχρό μέτωπο δεν έχει διέλθει εντελώς από το Α/Δ, ενώ αντίθετα έχει διέλθει από την πόλη της Θεσσαλονίκης, που βρίσκεται βορειότερα, είτε η διέλευση των αερίων μαζών επάνω από τα ζεστά νερά του Θερμαϊκού, αλλοιώνει το ψύχος. Έτσι, συχνά οι θερμοκρασίες στην πόλη είναι λίγο χαμηλότερες από εκείνες του Α/Δ, κατά τους παγετούς μεταφοράς. Πράγματι, και σ' αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14, κατά τις ημέρες από 7 έως 10 Ιανουαρίου η θερμοκρασία στο κέντρο της πόλης ήταν 0,5 – 1,5 βαθμούς χαμηλότερη από εκείνη του αεροδρομίου.

Αντίθετα, στην περίπτωση της ακτινοβολίας, αυτή είναι πολύ εντονότερη στο Α/Δ, καθώς μέσα στην πόλη τα κτίρια περιορίζουν σημαντικά τη νυχτερινή ψύξη.



Σχήμα 4.14: Σύγκριση των ελάχιστων θερμοκρασιών (°C) από το σταθμό της Εγνατίας (γαλάζιο) και το σταθμό του Αεροδρομίου «Μακεδονία» (κόκκινο) για την περίοδο 5-13 Ιανουαρίου 2017.



Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι ελάχιστες θερμοκρασίες για τις ημέρες από 5 έως 13 Ιανουαρίου 2017 που καταγράφηκαν από το σταθμό της Εγνατίας και το σταθμό του Αεροδρομίου Μακεδονία. Όπως φαίνεται, τις ημέρες που επικρατούσε παγετός μεταφοράς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες υπήρχαν στο κέντρο της πόλης, ενώ αργότερα που ακολούθησε παγετός ακτινοβολίας οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην ύπαιθρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΟΨΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή, με αφορμή την εκδήλωση ενός έντονου επεισοδίου παγετού μεταφοράς που εκδηλώθηκε την 06η Ιανουαρίου 2017 και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι εξελίχθηκε σε παγετό ακτινοβολίας την 10η Ιανουαρίου 2017, πραγματοποιήθηκε αρχικά συνοπτική και δυναμική μελέτη των μετεωρολογικών συνθηκών που επικράτησαν εκείνη την περίοδο στην ελληνική περιοχή αλλά και στην υπόλοιπη Ευρώπη. Ο σκοπός ήταν να αναλυθεί η συνοπτική κατάσταση που οδήγησε στην εκδήλωση του συγκεκριμένου επεισοδίου παγετού. Ειδικότερα, έμφαση δίνεται στην καθ' ύψος κατανομή της θερμοκρασίας, στην εξέλιξη αυτής της κατανομής με το χρόνο, καθώς και στη σχέση της με τις συνοπτικές συνθήκες, όπως: (i) το ύψος της τροπόπαυσης, (ii) την ευστάθεια και (iii) τους καθ' ύψος ανέμους.

Οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και οι έντονες χιονοπτώσεις δυσχέραναν την οικονομική και κοινοτική ζωή της Ελλάδας για αρκετές ημέρες. Η ανάλυση βασίστηκε στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF) επιχειρησιακές πλεγματικές αναλύσεις επιφάνειας και ανώτερης τροπόσφαιρας.

Επίσης, στην παρούσα εργασία μελετήθηκε γενικά το φαινόμενο του παγετού για την περιοχή της Θεσσαλονίκης καθ' όλη την περίοδο 2015-2019. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικοί χάρτες καιρού για την ημέρα του παγετού, καθώς και για μια ημέρα πριν, για διάφορα ισοβαρικά επίπεδα. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης και ραδιοβολίσεις του Περιφερειακού Μετεωρολογικού Κέντρου Μακεδονίας στη Θεσσαλονίκη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία ενδεχομένως θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου του παγετού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και κατ' επέκταση στην έγκαιρη και έγκυρη πρόγνωση του φαινομένου καθώς και στην περεταίρω μελέτη του. Από τη μελέτη των ημερών, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Κατά την περίοδο 2015-2019 καταγράφηκαν 112 ημέρες παγετού. Η πιθανή περίοδος εμφάνισης του παγετού είναι αυτή του Νοεμβρίου-Φεβρουαρίου, με μέση τιμή τις 22 ημέρες παγετού ανά έτος.

- Ο μέγιστος ημερήσιος αριθμός ημερών παγετού, ήταν είκοσι επτά (27) ημέρες για το έτος 2017, ενώ ο μικρότερος αριθμός (17) αντιστοιχεί στα έτη 2018 και 2019.
- Τα έτη με το μεγαλύτερο συνεχόμενο αριθμό ημερών παγετού είναι το 2016 και 2017 με (9) διαδοχικές ημέρες παγετού, ενώ το έτος με τις λιγότερες διαδοχικές ημέρες παγετού είναι το 2018 με δύο (2) διαδοχικές ημέρες.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι ο παγετός μεταφοράς παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε όλες τις τροποσφαιρικές στάθμες (850, 500 hPa κλπ) σε σχέση με τον παγετό ακτινοβολίας, κατά τον οποίο πολύ συχνά παρατηρούνται έως και θετικές θερμοκρασίες στο στρώμα 1000 – 800 hPa. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι ο τελευταίος είναι ένα φαινόμενο του επιφανειακού οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας, που οφείλεται στην νυκτερινή ψύξη δι' ακτινοβολίας του παρεδαφίου στρώματος και, άρα, συνοδεύεται από έντονες επιφανειακές αναστροφές. Σε αντίθεση ο παγετός μεταφοράς είναι φαινόμενο όλης της τροπόσφαιρας. Βέβαια, συχνά, ο παγετός μεταφοράς είναι πιο έντονος στην κατώτερη τροπόσφαιρα παρά στη μέση. Αυτό συμβαίνει όταν ο παγετός μεταφοράς οφείλεται σε αρκτικές αέριες μάζες, οι οποίες, λόγω της μεγάλης πυκνότητας του ψυχρού αρκτικού αέρα, εκτείνονται μόνο μέχρι ένα ορισμένο ύψος της τροπόσφαιρας.

Σε άμεση σχέση με τα παραπάνω, ο παγετός μεταφοράς επηρεάζει όλα τα είδη των μικροκλιμάτων, λόγω του ότι συνοδεύεται από άνεμο. Έτσι, ο παγετός μεταφοράς, επηρεάζει περισσότερο το κέντρο της πόλης, από ό,τι τον επηρεάζει ο παγετός ακτινοβολίας, ο οποίος για να σχηματιστεί απαιτείται ελεύθερος ορίζοντας, δηλαδή απουσία δέντρων ή κτιρίων, ώστε να λειτουργήσει ο μηχανισμός της νυκτερινής ακτινοβολίας. Άρα, λοιπόν, ο παγετός ακτινοβολίας επηρεάζει περισσότερο την ύπαιθρο, καθώς σε αυτήν η ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη και μάλιστα όταν δεν υπάρχουν δάση ή υψηλή γενικά βλάστηση. Πράγματι, στην περίπτωση που μελετήθηκε στη διατριβή αυτή, ο παγετός μεταφοράς είχε σχεδόν την ίδια ένταση στην πόλη (Θεσσαλονίκη) και στην ύπαιθρο (Αερολιμένας Θεσσαλονίκης), όντας μάλιστα λίγο εντονότερος στην πόλη.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη λήψης μέτρων προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος και οι επιπτώσεις που προέρχονται από τον παγετό. Πιο συγκεκριμένα, η



αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών και η διαχείριση των συνεπειών λόγω παγετού εμπεριέχει τις παρακάτω δράσεις:

1. Ενημέρωση κοινού και παροχή οδηγιών για ενδεχόμενους κινδύνους από τον παγετό,
2. διάσωση ατόμων που η ζωή τους βρίσκεται σε κίνδυνο από την εκδήλωση παγετού,
3. απεγκλωβισμός και διάσωση οδηγών και επιβατών στο οδικό εξ αιτίας του παγετού,
4. απεγκλωβισμός και διάσωση επιβατών και εργαζομένων στο σιδηροδρομικό δίκτυο εξ αιτίας του παγετού,
5. αντιμετώπιση περιστατικών υγείας σε περιοχές όπου έχει διακοπεί η κυκλοφορία στο οδικό δίκτυο.



Ακριτίδης Δ., Π. Ζάνης, Πυθαρούλης Ι., Μαυράκης Α., Καρακώστας Θ., 2008: Ένα έντονο επεισόδιο εισβολής στρατοσφαιρικού αέρα έως την επιφάνεια του εδάφους στην περιοχή της Αθήνας. Πρακτικά 9^{ου} Συνεδρίου COMECAP, Θεσσαλονίκη.

Αναγνωστοπούλου Χ, 1999: Χωροχρονική Κατανομή των Αγρομετεωρολογικών Παραμέτρων σε Τμήμα της Κεντρικής Μακεδονίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

Βάρφη Σ. Μ., 2009: Συνοπτική και Δυναμική Μελέτη των Ψυχρών Εισβολών στον Ευρύτερο Ελληνικό Χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2018: Σχεδιασμός και δράσεις Πολιτικής Προστασίας για την αντιμετώπιση κινδύνων από χιονοπτώσεις και παγετό. <https://www.civilprotection.gr/>

Δαλέζιος Ν., 2015: Αγρομετεωρολογία: Ανάλυση και Προσομοίωση, Εκδόσεις Κάλλιπος, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ζιακόπουλος Δ. και Φραγκούλη Π., 2015: Το Εγχειρίδιο του Μετεωρολόγου – Προγνώστη. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. ISBN: 978-618-82094-0-4. http://www.hnms.gr/emv/el/meteorology/components/HNMS_MeteorologistBook.pdf.

Θεοχάρης Μ. και Μυριούνης Χ., 2015: Φυσικοί και Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι, Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων, ΤΕΙ Ηπείρου.

Καρακώστας, Θ., Φλόκας Α., Φλόκα Ε, Κακαλιάγκου Ο. και Ρίζου Χ., 1992: Μελέτη των Συνοπτικών Καταστάσεων στην Περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας- Κλιματολογίας- Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, ΕΛΛΑΔΑ.

Κατσαφάδος, Π. 2003: Παράγοντες και Παραμετροποιήσεις που Καθορίζουν τη Μακράς Διάρκειας Προγνωστική Ικανότητα Μοντέλων Περιορισμένης Περιοχής, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ.

Μακρογιάννης Τ., Καρακώστας Θ., Μιχαηλίδης Σ., Φλόκα Ε., Βλάσση Α., Γιαρίκη Μ. και Δ. Φόρης, 1998: Ερμηνευτικό Λεξικό Μετεωρολογικών και Κλιματολογικών Όρων. Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρεία. Μακρόπουλος, Κ., 2006: Φυσικές Καταστροφές: Σεισμοί και Μέτρα Προστασίας, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 25-27 Οκτωβρίου, Αλεξανδρούπολη, ΤΕΕ-ΕΤΕΚ.

Μαχαίρας Π. και Μπαλαφούτης Χ., 1997: Γενική Κλιματολογία με Στοιχεία Μετεωρολογίας, Εκδόσεις UNIVERSITY STUDIO PRESS.

Μπαλαφούτης Χ. και Μαχαίρας Π., 1985: Μαθήματα γενικής κλιματολογίας με στοιχεία βιοκλιματολογίας, Εκδόσεις Γιαχούδη, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πυθαρούλης, Ι., 2017: Σημειώσεις Συνοπτικής Μετεωρολογίας. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον». Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Σαχσαμάνογλου Χ.Σ. και Μακρογιάννης Τ.Ι., 1998: Γενική Μετεωρολογία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Σύλλογος Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος, 2017: Επιπτώσεις του παγετού στα δίκτυα κοινής ωφέλειας της Θεσσαλονίκης, Ημερίδα, Θεσσαλονίκη.

Φλόκας Α.Α., 1997: Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Φλόκας, Α. και Χρονοπούλου, Α. (2010). Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Χατζή Ε., 2016: Τεκμηρίωση δυσμενών καιρικών συνθηκών του έτους 2015, Ενότητα Χιονόπτωση – Παγετό, Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μελετών Εφαρμογών και Επικοινωνίας, ΕΛΓΑ.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexander L.V, Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Tank K., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L., 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research. 111, D05109

Anagnostopoulou C., Tolika K., Lazoglou G., Maheras P., 2017: The Exceptionally Cold January of 2017 over the Balkan Peninsula: A Climatological and Synoptic Analysis. Atmosphere, 8(12), 252;

Balafoutis C.J. and Arseni-Papadimitriou A., 2002: Lengths of very warm and very cold spells at Southern Balkans. Scientific activities of professor Wladyslaw Gorczynski and their continuation, Climatological Symposium in Nicholas Copernicus University, Torun 2002, 155-162.

Feidas, H., Makrogiannis, T., and Bora-Senta, E., 2004: Trend analysis of air temperature time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955-2001. Theoretical and Applied Climatology, 79, 185-208.

Flocas H.A., Karacostas T.S., Giles B.D. and Flocas A.A., 1995: Considerations on the dynamics of a cold spell over Greece. Meteorologische Zeitschrift. Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 573-581.

Heino R., Brazdil R., Forland E., Tuomenvirta H., Alexandersson H., Beniston M., Pfister C., Rebetez M., Roseniagen G., Rosner S. And J. Wibig, 1999: Progress in the study of climatic extremes in Northern and central Europe. Climatic Change, 42, 151-181

Lagouvardos K., Kotroni V. and Kallos G., 1998: An extreme cold surge over the Greek peninsula. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124, Part A, 2299-2327.



Pappas C., Hatzianastassiou N. and Katsoulis B.D., 2004: Analysis of cold spell in the Greek region. *Climate research*, 27, 211-223.

Tasopoulou A., Marmara A., Chatziapostolou E., Karatarakis N., 2017: Significant weather and climatic events in Greece during 2017, HNMS. http://www.emy.gr/emv/en/pdf/2017_GRsignificantEVENT_en.pdf

Tselepidaki I.G., Asimakopoulos D.N. and D.A. Melitsiotis, 1990: A cold spell during March 1987 over Greece. *Weather*, 45, 42-47.

Varfi M.S., Karacostas T.S., Makrogiannis T.J. and A.A. Flocas, 2009: Characteristics of the extreme warm and cold days over Greece. *Advances in Geosciences*, 20, 45-50.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://climate.copernicus.eu/>

http://www.hnms.gr/emv/el/pdf/2017_GRsignificantEVENT_gr.pdf

<https://meteo.geo.auth.gr/el/klimatika-stoixeia-auth>

www.opendata.thessaloniki.gr