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

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΛΑΤΑΝΙΩΤΗΣ

Α.Ε.Μ.:5178

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΨΥΧΡΗΣ ΕΙΣΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2017 ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017

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

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΛΑΤΑΝΙΩΤΗΣ

Α.Ε.Μ.:5178

Συνοπτική Ανάλυση και Προγνωσιμότητα της Ψυχρής Εισβολής του Ιανουαρίου 2017 στον Ελλαδικό Χώρο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΠΥΘΑΡΟΥΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την μελέτη και ανάλυση των χαρακτηριστικών της ψυχρής εισβολής που πέρασε από την Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017, με ιδιαίτερη ένταση στην ανατολική Ευρώπη και κατ’επέκταση στον Ελλαδικό χώρο, την ανάλυση της προγνωσιμότητας και τη λήψη συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα των προγνώσεων.

Η επίβλεψη της εργασίας έγινε από τον Επίκουρο Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Ιωάννη Πυθαρούλη τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την υποστήριξη, καθοδήγηση και διάθεση του χρόνου του για την παροχή των μετεωρολογικών δεδομένων χωρίς τα οποία δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (NCEP) για τα δεδομένα και τον δορυφορικό σταθμό του Dundee στο Ηνωμένο Βασίλειο για τις δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ψυχρή εισβολή που εμφανίσθηκε στην Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον Ελλαδικό χώρο. Συγκεκριμένα το φαινόμενο έλαβε χώρα κατά τη χρονική περίοδο 6-12 Ιανουαρίου και είχε ιδιαίτερη ένταση στην ανατολική Ευρώπη με επιπτώσεις την απώλεια ανθρώπινων ζωών και την καθυστέρηση στις μεταφορές και στο εμπόριο.

Αρχικά, ορίζονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες απαραίτητες για την κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεκπαιρέωση της μελέτης. Περιγράφονται οι έννοιες της αριθμητικής πρόγνωσης καιρού, των ντετερμινιστικών μοντέλων και της στοχαστικής πρόγνωσης ενώ ακολουθεί μια σύντομη αναφορά δύο οργανισμών αριθμητικής πρόγνωσης καιρού, του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (NCEP) και του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), από τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για τη δημιουργία των χαρτών ανάλυσης και των διαγραμμάτων προγνωσιμότητας.

Στη συνέχεια ορίζεται η έννοια της ψυχρής εισβολής, αναφέρονται περιπτώσεις παλαιότερων, παρόμοιων φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο (Ιανουάριος 2006, Φεβρουάριος 2008 κ.ά.) και περιγράφεται λεπτομερώς το φαινόμενο στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο και στην Ελλάδα με τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων από επιχειρησιακές παρατηρήσεις.

Με την μελέτη και έρευνα των διαθέσιμων δεδομένων που αφορούν την θερμοκρασία στα 2 μέτρα και τη μέτρηση υετού 4 μετεωρολογικών σταθμών στην Ελλάδα (Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Ελευσίνα και Ηράκλειο), συμπεραίνεται ότι το φαινόμενο ήταν αρκετά πιο έντονο στη βόρεια Ελλάδα με αρνητικές θερμοκρασίες και περισσότερες χιονοπτώσεις καθώς αρκτικές αέριες μάζες μεταφέρθηκαν από τη βορειο-ανατολική Ευρώπη και η έντασή του εξασθενούσε με τη μείωση του γεωγραφικού πλάτους.

Ακολουθεί η συνοπτική ανάλυση καθώς εξετάζονται η θερμοκρασία στα 2 μέτρα, το γεωδυναμικό ύψος στα 500 hPa, η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας και η θερμοκρασία στα 850 hPa μέσω χαρτών ανάλυσης. Η ψυχρή εισβολή οφειλόταν στη μεταφορά αρκτικών αερίων μαζών από τη βορειο-ανατολική Ευρώπη και αποτέλεσε μια ξεχωριστή περίπτωση τόσο για την Ελλάδα όσο και για την Ευρώπη εξ’αιτίας της έντασής της και των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών για την εποχή.

Τέλος, η μελέτη της προγνωσιμότητας δείχνει ότι το φαινόμενο προβλέφθηκε επιτυχώς από τις στοχαστικές προγνώσεις 5 ημέρες πριν την έναρξη του ενώ η διάρκειά του προβλέφθηκε 9 ημέρες πριν από τη λήξη του. Οι ντετερμινιστικές προγνώσεις προέβλεψαν την έναρξή του 5 ημέρες και τη λήξη του 10 ημέρες πριν, με μια υπερεκτίμηση της έντασής του.

Abstract

In this thesis the concept of a cold wave is studied as a meteorological phenomenon, although we will particularly examine the cold wave that affected Europe in January 2017. In more specific terms, the wave took place within the time period of 6-12 of January and was particularly intense in Eastern Europe where many casualties were reported as well as flight cancellations and delays in transports and trading.

Firstly, some introductory terms are defined for a better understanding of the methods used for the completion of this study. The concepts of numerical weather prediction, deterministic models and ensemble predictions are described and defined while a short reference on two organizations which provide data on numerical weather prediction follows. These are the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Their data was used to construct the maps and diagrams needed for the synoptic analysis and forecasting.

Moreover, the general concept of a cold wave is defined, similar events that have occurred in Greece during the previous decades (January 2002 and 2006, February 2008, March 1987) are presented and furthermore, the characteristics of the cold wave of January 2017 in Europe as well as the area over Greece are described in detail.

According to the study of the available data which include surface temperature (2m) and precipitation measurements from 4 stations in Greece (Athens, Thessaloniki, Elefsina and Heraklion), it is concluded that the event was more intense in Northern Greece with more negative temperatures and heavy snowfall as it originated from North-Eastern Europe and its intensity weakened as the latitude decreases.

In the synoptic analysis that comes next, the surface temperature is examined as well as the mean sea-level pressure, the geopotential height at 500 hPa and the temperature at 850 hPa. The cold wave was caused by arctic air masses from the north-east and came to be an extraordinary case for Greece as well as Europe because of its intensity and the manifestation of extremely low temperatures.

In conclusion, the study of the predictability of the event shows that it was successfully forecasted 5 days before its outset while its duration was forecasted 9 days before it ended. The deterministic forecasts anticipated the event’s outset and duration 5 and 10 days in advance, respectively, with a slight overestimation regarding its intensity.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της ψυχρής εισβολής απαιτεί την ιδιαίτερη προσοχή της επιστημονικής κοινότητας και ιδιαίτερα την προσοχή των μετεωρολόγων καθώς όπως θα αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία, αποτελεί ένα φαινόμενο που μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες (έως και απώλεια ανθρώπινων ζωών), ειδικά σε περιοχές όπου η πρόγνωσή του δεν είναι δυνατή με μεγάλη ακρίβεια. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, των χαρακτηριστικών και της αποτελεσματικότητας της πρόγνωσης της ψυχρής εισβολής που έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 2017 στην Ευρώπη, δίνοντας έμφαση στον Ελλαδικό χώρο.

Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα πολύπλοκο σύστημα το οποίο μπορεί να περιγραφτεί από 7 εξισώσεις και 7 βασικές παραμέτρους, τις 3 εξισώσεις της κίνησης, την εξίσωση της συνέχειας (continuity equation), την θερμοδυναμική εξίσωση (thermodynamic equation), την καταστατική εξίσωση και την εξίσωση της υγρασίας (moisture equation, Gadd, 1981). Αυτές οι εξισώσεις παίρνουν τη μορφή διαφορικών εξισώσεων. Οι 7 βασικές παράμετροι είναι οι τρεις συνιστώσες της κίνησης του ανέμου στο χώρο (u, υ, w), η θερμοκρασία η πίεση, η πυκνότητα του αέρα και η αναλογία μίγματος υγρασίας. Φυσικά, στα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που λειτουργούν μέσω παραμετροποιήσεων και συμπεριλαμβάνουν κάποιες απλοποιήσεις, το τελικό αποτέλεσμα είναι μια προσέγγιση στην πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Σε πρακτική εφαρμογή οι μετεωρολόγοι δουλεύουν με μοντέλα της ατμόσφαιρας και τους ενδιαφέρει η κίνησή της σε σχέση με την περιστρεφόμενη Γη. Το στοιχείο της προσέγγισης και του σφάλματος εισάγεται από τη προσπάθεια περιγραφής ενός συνεχούς και ομοιογενούς ρευστού (της ατμόσφαιρας) με τη χρήση πεπερασμένων σημείων στο χώρο.

Η πρόγνωση του καιρού αποτελεί ένα μη-γραμμικό πρόβλημα αρχικής τιμής και διαχωρίζεται σε προγνώσεις 1^{ου} είδους (καιρού) και 2^{ου} είδους (κλιματικές μεταβολές, Πετρολιάγκης, 2002). Η επίλυση του προβλήματος της πρόγνωσης του καιρού πραγματοποιείται με τη μεθοδολογία της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού (numerical weather prediction). Χρησιμοποιούνται οι επιστήμες της φυσικής και των μαθηματικών με τη μορφή του μαθηματικού μοντέλου το οποίο συνίσταται από μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων ως προς τον χρόνο, οι οποίες επιδιώκουν να περιγράψουν την ατμόσφαιρα με βάση τις αρχές διατήρησης της μάζας, της ενέργειας και της ορμής (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 2004).

Οι όροι των εξισώσεων περιλαμβάνουν όρους που περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες της ατμόσφαιρας, όπως για παράδειγμα την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας με το έδαφος, την ακτινοβολία κ.ά. Οι εξισώσεις ανάλογα με το αν εμπεριέχουν την έννοια του ρυθμού μεταβολής ή όχι διαχωρίζονται σε προγνωστικές και διαγνωστικές εξισώσεις αντίστοιχα (Πυθαρούλης 2016).

Καθοριστικό ρόλο παίζουν οι αρχικές συνθήκες οι οποίες αποτελούν μια προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης της ατμόσφαιρας (Κατσαφάδος, 2003) και υπολογίζονται από δορυφορικές μετρήσεις, από παλαιότερες βραχυπρόθεσμες προγνώσεις και από μετρήσεις σταθμών στην επιφάνεια και στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Οι σταθμοί είναι ιδιαίτερα περιορισμένοι στους ωκεανούς για τους οποίους πληροφορούμαστε κυρίως από τους δορυφόρους (English et al., 2013) κάτι το οποίο εισάγει αβεβαιότητες και σφάλματα στις αρχικές συνθήκες.

Με την εξέλιξη των υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί επιχειρησιακά κέντρα πρόγνωσης καιρού, δύο εκ των οποίων είναι από τα πιο σημαντικά. Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)) στην Αγγλία και το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (National Centre for Environmental Prediction (NCEP)) το οποίο εδρεύει στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτά παράγουν ντετερμινιστικές και συνολικές προγνώσεις (ensemble predictions), δηλαδή πραγματοποιείται ένα σύνολο προγνώσεων οι οποίες έχουν σκοπό την πρόβλεψη όλων των πιθανών μελλοντικών καταστάσεων της ατμόσφαιρας αλλά και με ντετερμινιστικές προγνώσεις κατά τις οποίες δίνεται μια συγκεκριμένη πρόγνωση κάποιων συνθηκών για μια συγκεκριμένη στιγμή. Η ακρίβεια μιας πρόγνωσης μειώνεται όσο μακρύτερα στο μέλλον γίνεται η πρόγνωση εξαιτίας της χαοτικής φύσης της ατμόσφαιρας. Μάλιστα, έχει διαπιστωθεί πως αυτή η φύση της ατμόσφαιρας δεν είναι σε όλη την έκτασή της ίδια αλλά μεταβάλλεται (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου 2004). Εξαιτίας της επαναληψιμότητας που εμφανίζει η ατμόσφαιρα (αν και ποτέ δεν βρίσκεται στην ίδια ακριβώς κατάσταση δύο φορές) είναι δυνατόν να πραγματοποιούνται ακριβείς ντετερμινιστικές προγνώσεις οι οποίες εξαρτώνται και από την ικανότητα του μετεωρολόγου να ερμηνεύσει τα μοντέλα και τους χάρτες καιρού. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται και από την εμπειρία του μετεωρολόγου στην πρόγνωση του καιρού.

1.1 Αντικείμενο Μελέτης

Η παρούσα εργασία έχει αντικείμενο την ψυχρή εισβολή που παρατηρήθηκε στην Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017, δίνοντας έμφαση στον Ελλαδικό χώρο. Αρχικά θα οριστεί και θα περιγραφεί η ψυχρή εισβολή ως μετεωρολογικό φαινόμενο. Στην περίπτωση της Ελλάδας θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά και οι επιπτώσεις της, θα μελετηθούν και θα αξιολογηθούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν από τους μετεωρολόγους για την πρόβλεψή της (κυρίως με την μορφή χρονοσειρών, διαγραμμάτων). Στο τέλος θα εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και ακρίβεια των προγνώσεων τόσο στην πρόβλεψη της έντασης όσο και της διάρκειας του φαινομένου.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν χάρτες και διαγράμματα που δημιουργήθηκαν με το λογισμικό GrADS (Grid Analysis and Display System), οι οποίοι απεικονίζουν τόσο πριν, όσο μετά, αλλά και κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Η σωστή απεικόνισή τους μας βοηθά στην κατανόηση της ψυχρής εισβολής και στον τρόπο με τον οποίο αναπτύχθηκε. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μετεωρολογικές παράμετροι της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα, της θερμοκρασίας στα 850 hPa, της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τέσσερις Ελληνικούς σταθμούς επιφανείας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ

2.1 Αριθμητική Πρόγνωση Καιρού (Numerical Weather Prediction, NWP)

Για την πρόγνωση του καιρού είναι απαραίτητη η περιγραφή του χαοτικού συστήματος της ατμόσφαιρας με μαθηματικές εκφράσεις και μοντελοποιήσεις. Εδώ εισάγεται η έννοια των αριθμητικών μοντέλων καιρού τα οποία δέχονται πληροφορίες από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σήμερα (αρχικές συνθήκες) και τις χρησιμοποιούν για να πραγματοποιήσουν προβλέψεις του καιρού στο μέλλον. Από μαθηματικής άποψης, το πρόβλημα της πρόβλεψης της κίνησης της ατμόσφαιρας σχετίζεται με τις αρχικές συνθήκες (Gadd, 1981). Η σημασία του προσδιορισμού των αρχικών συνθηκών της ατμόσφαιρας με τη χρήση των διαθέσιμων δεδομένων είναι σαφώς εξαιρετικά σημαντική (Phillips, 1960) Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των υπολογιστών η αριθμητική πρόγνωση του καιρού είναι ένας τομέας της μετεωρολογίας που έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια.

Η ύπαρξη των μαθηματικών μοντέλων για την πρόγνωση του καιρού είναι σημαντική για τη μετεωρολογία καθώς είναι απαραίτητο να υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης ενός πειράματος στην ατμόσφαιρα. Ένα μοντέλο μπορεί να τρέξει με διαφορετικές παραμέτρους, ανάλογα με την επίδραση των οποίων, θα έχουμε κάθε φορά διαφορετικό αποτέλεσμα. Κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές στις τιμές κάποιων παραμέτρων ο μετεωρολόγος είναι σε θέση να βγάλει συμπεράσματα για την κίνηση και τη συνολική συμπεριφορά της ατμόσφαιρας. Οι μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τα μαθηματικά μοντέλα επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους όπως τα σχήματα πεπερασμένων διαφορών, οι φασματικές μέθοδοι και τα σχήματα πεπερασμένων στοιχείων (Πυθαρούλης, 2016). Τα αποτελέσματα των μοντέλων χρησιμοποιούνται για βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες προγνώσεις καιρού είτε για μακροχρόνιες εκτιμήσεις του κλίματος.

Η κεντρική ιδέα πίσω από τη χρήση μοντέλων για την πρόβλεψη του καιρού είναι η εξής: Η ατμόσφαιρα είναι ένα ρευστό το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις της θερμοδυναμικής και της δυναμικής των ρευστών. Με τη μελέτη αυτών των εξισώσεων γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός της κατάστασης της ατμόσφαιρας οποιαδήποτε στιγμή και η προσέγγιση της μελλοντικής της κατάστασης.

Η ύπαρξη επαρκών δεδομένων από πολλαπλούς μετεωρολογικούς σταθμούς παγκοσμίως και η συνεχόμενη βελτίωση των μοντέλων, καθιστούν την αριθμητική πρόγνωση καιρού εξαιρετικά χρήσιμη καθώς η προγνωσιμότητα αυξάνεται κατά μέσο όρο μέχρι τις 8 ημέρες και σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι και περίπου 10 ημέρες (Mason, 1986). Φυσικά το ποσοστό των σφαλμάτων αυξάνεται όσο περισσότερες μέρες στο μέλλον προβλέπουμε, λόγω της χαοτικής φύσης της ατμόσφαιρας και των διαφόρων σφαλμάτων στο σχεδιασμό και στα δεδομένα των αριθμητικών μοντέλων.

2.2 Ανάλυση - Πλέγματα

Στα αριθμητικά μοντέλα ανατίθεται η δουλειά της παραμετροποίησης και ανάλυσης ενός συνεχούς και ομογενούς μέσου όπως είναι αυτό της ατμόσφαιρας. Όλες οι διεργασίες μέσα στην ατμόσφαιρα μεταβάλλονται με έναν συνεχή τρόπο. Η λύση αυτού του προβλήματος είναι η απεικόνιση και διαχωρισμός της ατμόσφαιρας σε ένα πλέγμα. Τα μοντέλα πραγματοποιούν όλους τους υπολογισμούς τους σε ένα πλέγμα χωρικά διακριτών σημείων το οποίο αποτελείται απο κυψελίδες κάποιων διαστάσεων. Εδώ εισάγεται η έννοια της ανάλυσης (χωρικής διακριτοποίησης) η οποία αναφέρεται στη μέση απόσταση ανάμεσα στα γειτονικά σημεία πλέγματος που αφορούν την ίδια μεταβλητή (Πυθαρούλης, 2016).

Ανάλογα με τη χωρική κλίμακα της περιοχής που μελετάται και την έκταση των μετεωρολογικών φαινομένων η ανάλυση του μοντέλου χαρακτηρίζεται ως υψηλή ή χαμηλή. Για παράδειγμα για ένα παγκόσμιο μοντέλο η ανάλυση 10 km θεωρείται υψηλή ενώ για ένα μοντέλο που μελετά τοπικές καταιγίδες χρειάζεται ανάλυση της τάξης των 100 m για να παρατηρηθεί και να αναλυθεί η καταιγίδα με την απαραίτητη λεπτομέρεια. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η κατηγοριοποίηση των μοντέλων, χαμηλής ή υψηλής ανάλυσης, σύμφωνα με την χωρική διακριτοποίησή τους είναι κάτι σχετικό και επηρεάζεται από τη συνεχή εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων (Πυθαρούλης, 2016).

Ένα μοντέλο το οποίο έχει χωρική διακριτοποίηση 25 km αναπαριστάται από σημεία πλέγματος τα οποία περιέχονται σε μια έκταση 625 km^2 (25x25 km). Η τιμή του κάθε σημείου πλέγματος είναι η μέση τιμή όλων των μετρήσεων του πεδίου το οποίο, περιλαμβάνει το κεντρικό σημείο. Σε πρακτική εφαρμογή τα μοντέλα σημείων πλέγματος αναπαριστούν την ατμόσφαιρα με τρισδιάστατη μορφή και η κάθε κυψελίδα αντιπροσωπεύεται από μια μέση τιμή του όγκου της από ένα σημείο στο κέντρο. Μπορεί η υψηλότερη ανάλυση σε ένα μοντέλο να δώσει περισσότερες λεπτομέρειες παρ’όλα αυτά με την αύξηση της ανάλυσης ξοδεύεται υπολογιστική ισχύς καθώς το μοντέλο αναγκάζεται να κάνει υπολογισμούς για περισσότερα σημεία μέσα στο πλέγμα. Επίσης ο αριθμός των σημείων πλέγματος επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος στο μοντέλο. Αν ένα κύμα δεν αναλύεται καλά, θα μετακινείται με μικρότερη ταχύτητα από την πραγματικότητα (Πυθαρούλης, 2016).

Εξίσου σημαντικές με την ανάλυση είναι οι πλευρικές οριακές συνθήκες οι οποίες αποτελούν τις τιμές της περιφέρειας μιας περιορισμένης περιοχής μελέτης. Επηρεάζουν άμεσα την περιοχή πρόγνωσης ακόμα και μακριά από τα όρια. Η ανανέωσή τους συνήθως γίνεται κάθε 3 ή 6 ώρες. Προτιμάται η τοποθέτηση των πλευρικών ορίων όσο το δυνατόν μακρύτερα από την περιοχή μελέτης και από την κατεύθυνση διέλευσης των καιρικών φαινομένων. Πολύ πιθανά είναι τα σφάλματα από τη διέλευση ενός κύματος από το ένα πλέγμα στο άλλο καθώς μπορεί να καταγραφεί πολύ αργότερη ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο πλέγμα με την χαμηλότερη ανάλυση. Όμως αυτού του τύπου τα σφάλματα εξαλείφονται με τη βελτίωση της ανάλυσης των παγκοσμίων μοντέλων (Πυθαρούλης, 2016).

2.3 Ντετερμινιστικές Προγνώσεις

Είναι οι προγνώσεις με την καλύτερη χωρική διακριτοποίηση, λειτουργούν με τις καλύτερες δυνατές αρχικές συνθήκες και μοντέλο. Σε σχέση με τις μεθόδους της στοχαστικής πρόγνωσης, οι ντετερμινιστικές προγνώσεις δεν δίνουν πληροφορίες για την αβεβαιότητα ή την πιθανότητα μιας πρόγνωσης. Επίσης με την πάροδο του χρόνου η ακρίβειά τους υποβαθμίζεται και ιδιαίτερα όταν εστιάζουν κοντινότερα σε κάποια περιοχή. Παρ’όλα αυτά λειτουργούν με υψηλότερες αναλύσεις από τα μοντέλα των στοχαστικών προγνώσεων (www.meted.ucar.edu). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε κλίμακες μικρότερης της χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου αλλά μόνο στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτές είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο σχηματισμός νεφών και υετού, οι ροές ενέργειας, το οριακό στρώμα και άλλες διεργασίες που επηρεάζουν την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

2.4 Στοχαστική Πρόγνωση – Ensemble Predictions

Η στοχαστική πρόγνωση επιτρέπει την εκτίμηση της αβεβαιότητας μιας πρόγνωσης και το πιθανότερο αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας αρχικές συνθήκες οι οποίες διαφέρουν ελάχιστα κάθε φορά που λειτουργεί το μοντέλο (Κατσαφάδος, 2003). Ανάλογα με το εύρος των τελικών αποτελεσμάτων ο μετεωρολόγος είναι σε θέση να εκτιμήσει την αβεβαιότητα μιας πρόβλεψης. Τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη στοχαστική πρόγνωση βοηθάνε στην εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόγνωσης.

Πιθανά σφάλματα εισάγονται από τη μορφοποίηση (configuration) του μοντέλου και από τη λανθασμένη εκτίμηση των αρχικών συνθηκών είτε από έλλειψη δεδομένων, είτε από δορυφορικές μετρήσεις της ατμόσφαιρας οι οποίες δεν είναι τόσο ακριβείς όσο οι μετρήσεις των σταθμών ή ακόμα και από σφάλματα των οργάνων παρατήρησης (Πυθαρούλης και Παπαγεωργίου 2006).

Η κίνηση της ατμόσφαιρας περιγράφεται προσεγγιστικά από τις διαφορικές εξισώσεις των μοντέλων. Συνεπώς οι φυσικοί νόμοι, καθώς και η κάθε φυσική παράμετρος που επηρεάζει την κίνηση, περιγράφονται προσεγγιστικά και μέσω παραμετροποιήσεων. Το κάθε μοντέλο λειτουργεί με μια συγκεκριμένη χωρική ανάλυση κάτι το οποίο δεν επιτρέπει σε φαινόμενα μικρότερης κλίμακας να αναπαρασταθούν ή/και και να εμφανιστούν στην ανάλυση του μοντέλου.

Η προβλεψιμότητα γενικά εξαρτάται από την χωρική κλίμακα του φαινομένου που εξετάζεται και από τις αρχικές συνθήκες που δίνονται στο μοντέλο. Το βασικό πλεονέκτημα της στοχαστικής πρόγνωσης είναι η εκτίμηση πιθανοτήτων για μια πρόγνωση καθώς και η αναγνώριση προβλέψιμων και μη-προβλέψιμων γεγονότων.

Η ύπαρξη της στοχαστικής πρόγνωσης βασίζεται στο γεγονός ότι το παραμικρό σφάλμα (ακόμα και σφάλμα ελαχίστων διαστάσεων) στην αρχική ανάλυση των δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε μια πρόβλεψη η οποία να παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερη απόκλιση από την πραγματικότητα.

Η στοχαστική πρόγνωση ξεκινάει με τη χρήση των πιο πρόσφατων δεδομένων από το μοντέλο για τον προσδιορισμό της κατάστασης της ατμόσφαιρας και για την μελέτη της απόκλισής της τις επόμενες μέρες από την αρχική της κατάσταση. Κατά τη διάρκεια μιας στοχαστικής πρόγνωσης το μοντέλο λειτουργεί με ελάχιστα διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά (διαταραχές) έτσι ώστε να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα της ατμόσφαιρας με όλες τις πιθανές εκδοχές και πιθανότητες εξέλιξης της κατάστασής της. Εάν όλες οι εκδοχές είναι παρόμοιες τότε μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την ακρίβεια της πρόβλεψης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα παρουσιάσουν διαφορετικά αποτελέσματα και δεν μπορούμε να ξέρουμε με βεβαιότητα την εξέλιξη των καιρικών φαινομένων. Σε γενικές γραμμές, η ατμόσφαιρα παρουσιάζει μεγαλύτερη προβλεψιμότητα για προγνωστικό ορίζοντα 1-2 ημερών, αλλά αν εστιάσουμε σε μερικές λεπτομέρειες των καιρικών φαινομένων σε τοπική κλίμακα θα υπάρχουν ακόμα και εκεί αποκλίσεις.

Επίσης, η ανάγκη της διάθεσης της πρόβλεψης το συντομότερο δυνατόν για την επιχειρησιακή χρήση της σε συνδυασμό με τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ δεν δίνει τη δυνατότητα της μελέτης της απεριόριστης πολυπλοκότητας της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας της πρόβλεψης.

Υπάρχουν τρεις χωρικές κλίμακες εφαρμογής της στοχαστικής πρόγνωσης (παγκόσμια, περιοχική και τοπική). Από κατηγορία σε κατηγορία διαφέρει ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι διαταραχές στις αρχικές συνθήκες.

Οι παγκόσμιες στοχαστικές προγνώσεις χρησιμοποιούνται για προγνώσεις 3-15 ημερών και λειτουργούν με σχετικά χαμηλές αναλύσεις 30-70 km (World Meteorological Organization, 2016). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες εξαιτίας της παγκόσμιας κάλυψής τους, αλλά χρησιμοποιούνται και από χώρες (για μικρής χρονικής κλίμακας προγνώσεις) στις οποίες δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη στοχαστική πρόγνωση. Παρ’όλα αυτά, η λεπτομέρεια των παγκόσμιων στοχαστικών προγνώσεων είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα είναι αδύνατον να εντοπιστεί η ταχύτητα του ανέμου σε μια καταιγίδα καθώς η ανάλυση στην οποία λειτουργεί μια παγκόσμια στοχαστική πρόγνωση είναι πολύ μικρή για να εντοπιστούν τα φαινόμενα τοπικής κλίμακας.

Οι περιοχικές στοχαστικές προγνώσεις χρησιμοποιούνται για κοντινότερες προγνώσεις της τάξης των 1-3 ημερών. Λειτουργούν με υψηλότερη ανάλυση από τις παγκόσμιες (7-30 km, World Meteorological Organization, 2016), κάτι το οποίο τους επιτρέπει να εντοπίζουν καιρικά φαινόμενα τοπικής κλίμακας. Πολλές φορές οι αρχικές συνθήκες και διαταραχές λαμβάνονται από μια παγκόσμια στοχαστική πρόγνωση.

Οι τοπικές στοχαστικές προγνώσεις λειτουργούν με σημαντικά υψηλότερες αναλύσεις (1-4 km, World Meteorological Organization, 2016) συνεπώς εντοπίζουν περισσότερες λεπτομέρειες των τοπικών καιρικών φαινομένων όπως για παράδειγμα η ακριβής τοποθεσία και ένταση μιας καταιγίδας ήπληροφορίες για τη νέφωση. Η ακρίβειά τους όμως είναι ενδεικτική μόνο για μερικές μέρες. Κάτι το οποίο λαμβάνουν υπόψη με πολύ καλύτερο τρόπο αυτές οι στοχαστικές προγνώσεις είναι η μορφολογία και το ανάγλυφο καθώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα καιρικά φαινόμενα αυτής της τοπικής κλίμακας.

Τα αποτελέσματα των στοχαστικών προγνώσεων παρουσιάζονται σε διάφορους χάρτες/διαγράμματα (plume diagrams, spaghetti plots, probability charts) στους οποίους απεικονίζεται η πορεία της κάθε πρόγνωσης του μοντέλου σχηματίζοντας εικόνες που απεικονίζουν καλά τα γεγονότα και είναι πιο εύκολες να επεξεργαστούν από τους μετεωρολόγους. Για παράδειγμα στις περιοχές όπου οι πορείες των προγνώσεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους η πιθανότητα είναι μεγαλύτερη από τις περιοχές όπου διαχωρίζονται σαφώς. Το καλό με αυτές τις αναπαραστάσεις είναι επίσης η ευκολία στατιστικής τους επεξεργασίας.

2.5 Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (National Centre for Environmental Prediction-(NCEP))

Το NCEP εδρεύει στις Η.Π.Α. παρέχει προγνώσεις για τον καιρό και το κλίμα τοπικής και παγκόσμιας κλίμακας και χωρίζεται σε εννέα κέντρα (www.ncep.noaa.gov):

1. Κέντρο αεροπορίας (Aviation Weather Center) το οποίο παρέχει προγνώσεις και προειδοποιήσεις για τα αεροσκάφη σε όλα τα επίπεδα πτήσης τους.
2. Κέντρο κλιματικών προγνώσεων (Climate Prediction Center) το οποίο παρακολουθεί βραχυπρόθεσμες αναταραχές και διακυμάνσεις του κλίματος για τη μελέτη του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.
3. Περιβαλλοντικό κέντρο (Enviromental Modeling Center) που έχει σκοπό τη βελτίωση της αριθμητικής πρόγνωσης σε πολλούς τομείς όπως ο καιρός, το κλίμα, οι ωκεανοί και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες.

4. Κέντρο τυφώνων (National Hurricane Center) το οποίο μελετά τα κυκλωνικά συστήματα (φαινόμενα πολύ συχνά κάθε χρόνο στις Η.Π.Α.) και παρέχει προγνώσεις σχετικές με την ταχύτητα και ένταση των φαινομένων και τις περιοχές που θα επηρεαστούν.
5. Κεντρικές λειτουργίες NCEP (NCEP Central Operations) με αρμοδιότητα τη δημιουργία των αριθμητικών αναλύσεων και τη λειτουργία των μοντέλων.
6. Κέντρο ωκεάνιων προγνώσεων (Ocean Prediction Center) που δίνει προγνώσεις πέντε ημερών για τις περιοχές του Ειρηνικού και Ατλαντικού ωκεανού βορειότερα των 30^{o}Β.
7. Κέντρο καιρικών προγνώσεων του διαστήματος (Space Weather Prediction Center) το οποίο παρέχει στους επιστήμονες που δουλεύουν στο διάστημα και στη Γη, οποιαδήποτε πρόγνωση και προειδοποίηση για τον καιρό που μπορεί να είναι χρήσιμη.
8. Κέντρο προγνώσεων καταιγίδων (Storm Prediction Center) που έχει σκοπό την προειδοποίηση για ακραία καιρικά φαινόμενα όπως ανεμοστρόβιλοι και καταιγίδες.
9. Κέντρο προγνώσεων καιρού (Weather Prediction Center) το οποίο παρέχει προγνώσεις καιρού για τις Η.Π.Α. για διάστημα μιας εβδομάδας.

Το σύστημα παγκοσμίων προγνώσεων του NCEP (Global Forecasting System, GFS) παρέχει ντετερμινιστικές προγνώσεις μέχρι 16 ημέρες καθώς και τις αρχικές και οριακές συνθήκες για τα υπόλοιπα κέντρα πρόγνωσης. Οι προγνώσεις πραγματοποιούνται κάθε 6 ώρες ημερισίως: 0000, 0600, 1200 και 1800 UTC. Η οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου είναι 13 km για τις πρώτες 10 προγνωστικές ημέρες και 34 km για τις υπόλοιπες μέχρι την 16 προγνωστική ημέρα. Το GFS χωρίζεται σε 4 μοντέλα, της ατμόσφαιρας, του ωκεανού, του εδάφους και του θαλάσσιου πάγου και λειτουργεί με 64 κατακόρυφα ατμοσφαιρικά επίπεδα (www.emc.ncep.noaa.gov).

Το σύστημα στοχαστικών προγνώσεων του NCEP (Global Ensemble Forecast System, GEFS) παρέχει συνολικές/στοχαστικές προγνώσεις κάθε 6 ώρες: 0000, 0600, 1200 και 1800 UTC για 16 ημέρες. Αποτελείται από 21 διαφορετικές προγνώσεις (μέλη) και λειτουργεί με 34 km (55km) οριζόντια ανάλυση στον ισημερινό για τη προγνωστική περίοδο 0-8 (8-16) ημερών, ενώ όλα τα μέλη λειτουργούν με 64 κατακόρυφα στρώματα. Ο κύριος σκοπός του GEFS είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε μία πρόγνωση χρησιμοποιώντας πολλαπλές προγνώσεις οι οποίες διαφέρουν με κάποιο τρόπο από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις (αρχικές συνθήκες, www.ncdc.noaa.gov). Οι στοχαστικές προγνώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν διαθέσιμες με χωρική διακριτοποίηση 1°x1° (γεωγραφικό πλάτος x γεωγραφικό μήκος), ενώ οι ντετερμινιστικές προγνώσεις είχαν χωρική διακριτοποίηση 0.5°x0.5°.

2.6 Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού - European Center for Medium-Range Weather Forecasts model (ECMWF)

Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού έχει βάση στο Reading της Αγγλίας και είναι γνωστό ότι έχει αναπτύξει και λειτουργεί επιχειρησιακά και ερευνητικά ένα από τα πιο ακριβή παγκόσμια μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση καιρού. Χρησιμοποιεί ντετερμινιστικά μοντέλα τα οποία αναπαριστούν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν σε μικρότερες κλίμακες από τη χωρική του ανάλυση. Ο σκοπός του είναι η επιστημονική έρευνα για την βελτίωση των μεθόδων που αφορούν την πρόβλεψη του καιρού, η επιχειρησιακή πρόγνωση καιρού και η δημιουργία ενός μετεωρολογικού αρχείου (www.ecmwf.int).

Το ECMWF δίνει δύο προγνώσεις παγκόσμιας κλίμακας καθημερινά καθώς και αναλύσεις που σχετίζονται με την κυκλοφορία ωκεάνιων ρευμάτων, με τη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα, την παρακολούθηση κλιματολογικών παραμέτρων κ.ά. Οι χρονικές κλίμακες των προγνώσεων του ECMWF φτάνουν και μέχρι ένα χρόνο στο μέλλον. Οι μηνιαίες προγνώσεις προειδοποιούν για κύματα καύσωνα/ψύχους, ξηρασίες, καταιγίδες καθώς και για την ενδεχόμενη επιρροή τους στις καλλιέργειες αλλά και στην ανθρώπινη υγεία (www.ecmwf.int).

Οι προγνώσεις του ECMWF βασίζονται σε αρχικές συνθήκες που προκύπτουν από την αφομοίωση (data assimilation), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχικοποίηση του μοντέλου και την έναρξη της πρόγνωσης (Πυθαρούλης, 2016), και επεξεργασία δεδομένων κυρίως από δορυφόρους και μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλο τον κόσμο. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της μελλοντικής κατάστασης της ατμόσφαιρας όσο το δυνατόν καλύτερα και πιο κοντά στην πραγματικότητα. Η αφομοίωση των δεδομένων γίνεται για να προσδιοριστούν οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου και για να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα η κατάσταση της ατμόσφαιρας. Κατά την αφομοίωση δεδομένων γίνεται συγχώνευση μιας παλαιότερης πρόγνωσης με τα νέα δεδομένα που λήφθηκαν έτσι ώστε να αναβαθμιστεί η νέα πρόγνωση και να ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα από την προηγούμενη (www.ecmwf.int).

Για να πραγματοποιηθεί μια πρόγνωση πρέπει να μοντελοποιηθούν κάποιες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα όπως για παράδειγμα οι σχηματισμοί των νεφών, ο υετός, η ηλιακή και γήινη ακτινοβολία κ.ά.

Το ECMWF αποτελείται από τέσσερα προγνωστικά συστήματα (www.ecmwf.int):

1. Το Ολοκληρωμένο Σύστημα IFS (Integrated Forecasting System)
2. Το Σύστημα Συνολικής Πρόγνωσης EPS (Ensemble Forecasting System)
3. Το Κυματικό Μοντέλο WAM (Wave Atmospheric Model)
4. Το Εποχιακό Προγνωστικό Σύστημα SFS (Seasonal Forecast System)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Η ΨΥΧΡΗ ΕΙΣΒΟΛΗ

3.1 Ορισμός Ψυχρής Εισβολής

Το φαινόμενο μιας ψυχρής εισβολής ορίζεται κυρίως από τη μέση θερμοκρασία μιας περιοχής. Σύμφωνα με την Μετεωρολογική Εταιρεία των Η.Π.Α. (American Meteorological Society – AMS) η ψυχρή εισβολή ορίζεται ως η σημαντική πτώση της θερμοκρασίας σε ένα διάστημα 24 ωρών η οποία χρήζει απαραίτητη την προστασία των καλλιεργειών, του εμπορίου και των βιομηχανιών (AMS: Glossary of Meteorology)..

Επίσης η ψυχρή εισβολή ορίζεται ως μια περίοδος τριών ή περισσότερων διαδοχικών ημερών κατά τις οποίες η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία υπολείπεται κατά 4^{o}C από την αντίστοιχη μέση τιμή που προκύπτει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (Balafoutis and Arseni – Papadimitriou, 2002).

Η ένταση και η ελάχιστη θερμοκρασία εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε περιοχής όπως για παράδειγμα η ορογραφία και το ανάγλυφό της, η παρουσία θάλασσας, τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά κ.ά. Συμπεραίνουμε ότι είναι δύσκολο να οριστεί με ακρίβεια η ψυχρή εισβολή καθώς τα χαρακτηριστικά της θα διαφέρουν από τόπο σε τόπο.

3.1.1. Περιπτώσεις Ψυχρών Εισβολών στην Ελλάδα

Ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό του Ιανουαρίου του 2017 παρατηρήθηκε πριν από 11 χρόνια, τον Ιανουάριο του 2006 συγκεκριμένα στις 23-26 του μηνός, με ιδιαίτερη ένταση στην ανατολική Ελλάδα. Παρατηρήθηκαν ασυνήθιστης διάρκειας (3 ημέρες) τοπικές χιονοπτώσεις συμπεριλαμβανομένης και της Αθήνας, αλλά μικρής έντασης. Το φαινόμενο οφειλόταν στη διέλευση αρκτικών αερίων μαζών από το Βορρά, με πηγή τη θαλάσσια περιοχή του αρκτικού ωκεανού, σε συνδυασμό με την εκδήλωση ενός βαρομετρικού χαμηλού στη νότια Ελλάδα. Κατά τη διάρκεια αυτού του φαινομένου παρατηρήθηκαν ταυτόχρονες χιονοπτώσεις σε όλη την έκταση της χώρας (Θεσσαλονίκη-βόρεια, Αθήνα-νότια, Κεφαλονιά-δυτικά και Μυτιλήνη-ανατολικά) κάτι το οποίο δεν είχε παρατηρηθεί τα τελευταία 50 χρόνια (Τσοπουρίδης, 2010).

Μία άλλη περίπτωση παρόμοια με αυτή του Ιανουαρίου του 2017 ήταν η ψυχρή εισβολή του Φεβρουαρίου του 2008 που έπληξε κυρίως την κεντρική και νότια Ελλάδα, προκαλώντας μάλιστα και σοβαρά προβλήματα στις μετακινήσεις. Η κύρια αιτία για την εκδήλωση του φαινομένου ήταν η εισβολή αρκτικών αερίων μαζών από τη Βορειο-ανατολική Ευρώπη. Παρατηρήθηκαν πολύ έντονες χιονοπτώσεις στην Αττική και χαμηλές θερμοκρασίες σε όλη την Ελλάδα. Στο κέντρο της Αθήνας το ύψος του χιονιού έφτασε τα 10-20 εκατοστά και τα 30-50 στα βόρεια προάστια. Χαρακτηριστική ήταν η μέτρηση της ελάχιστης θερμοκρασίας στις 18

Φεβρουαρίου (-4,2^{o}C) στο μετεωρολογικό σταθμό του Ελληνικού που ήταν η χαμηλότερη των τελευταίων 53 ετών (Louka et al., 2010).

Επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα ψυχρής εισβολής στην Ελλάδα αποτέλεσε αυτή του Ιανουαρίου του 2002 κατά την οποία πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και χιονοπτώσεις έπληξαν τη χώρα μας για το διάστημα 4-6 Ιανουαρίου. Η Αττική, η Εύβοια, η ανατολική Πελοπόννησος και το ανατολικό τμήμα της κεντρικής Ελλάδας ήταν οι περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από το φαινόμενο. Μάλιστα στην Αττική οι χιονοπτώσεις ήταν σχεδόν συνεχείς για περίπου 60 ώρες με περισσότερο από 1 μέτρο ύψος χιονιού στα ορεινά. Στο νησί της Κρήτης οι χιονοπτώσεις ήταν εξίσου έντονες με 2,5 μέτρα ύψος χιονιού στα ορεινά. Το αίτιο για αυτά τα φαινόμενα ήταν η εισβολή ψυχρών αερίων μαζών οι οποίες δημιούργησαν ιδανικές συνθήκες για τις εξαιρετικά έντονες χιονοπτώσεις που παρατηρήθηκαν στην Αττική. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες στα 850 hPa, μετρήθηκαν έως και -12^{o}C επάνω από την Αθήνα στις 5 Ιανουαρίου 2002 (Lagouvardos and Kotroni, 2003).

Μία ακόμη παλαιότερη περίπτωση ψυχρής εισβολής στην Ελλάδα είναι αυτή του Μαρτίου 1987, η οποία για την εποχή αποτέλεσε τη μεγαλύτερη σε ένταση ψυχρή εισβολή των τελευταίων 100 ετών εξ' αιτίας της μεγάλης της διάρκειας (3-13 Μαρτίου, Lagouvardos et al., 1998). Σύμφωνα με μελέτες (Flocas et al. 1995) η εκδήλωση του φαινομένου αποδίδεται σε μείωση του υψομέτρου της τροπόπαυσης κάτι το οποίο συνδέεται με πολύ ψυχρό αέρα, ειδικότερα επάνω από την Βαλκανική χερσόνησο.

3.2 Η ψυχρή εισβολή του Ιανουαρίου 2017

Το φαινόμενο της ψυχρής εισβολής που μελετάται στην παρούσα εργασία έλαβε χώρα τον Ιανουάριο του 2017 στην ευρύτερη περιοχή της Ευρωπαϊκής ηπείρου. Προκλήθηκε στις αρχές του Ιανουαρίου από ένα σύστημα υψηλής πίεσης πάνω από τη δυτική Ευρώπη και τη μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών (έως και πολικών) από την βορειο-ανατολική Ευρώπη (Σκανδιναβία και Σιβηρία) προς τα νοτιο-δυτικά στη νότια Ευρώπη και τη Βαλκανική χερσόνησο, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Έγινε αιτία για πολυάριθμα προβλήματα μετακίνησης στους δρόμους, αεροδρόμια, κλειστά σχολεία και προκάλεσε δυσμενείς συνθήκες διαβίωσης για αστέγους και πρόσφυγες (www.wmo.int).

3.2.1 Περιγραφή του Φαινομένου στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης

Η κύρια αιτία εκδήλωσης του φαινομένου ήταν η μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών στη νοτιο-ανατολική Ευρώπη εξ'αιτίας ενός συστήματος υψηλής πίεσης και της κίνησής του προς τα ανατολικά.

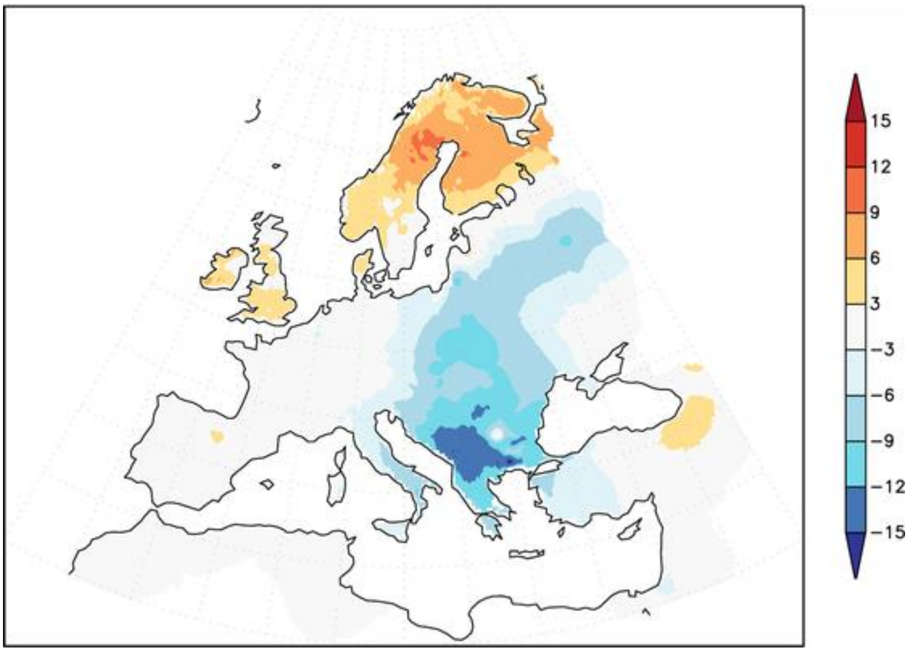
Παρατηρήθηκαν ισχυρές χιονοπτώσεις στο μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης και κυρίως στην Ιταλία, τις χώρες των Βαλκανίων και στην Τουρκία. Στις χώρες της Σερβίας, Π.Γ.Δ.Μ., και στην Βουλγαρία παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τη μέση θερμοκρασία των περιοχών, της τάξης των 12^{o}C χαμηλότερα από τις μέσες θερμοκρασίες. Στην Ιταλία, Ρουμανία και Τουρκία οι αποκλίσεις ήταν μικρότερες αν και σημαντικές, περίπου 5-10^{o}C (WMO, 2017). Οι θερμοκρασίες σε αυτές τις χώρες κυμάνθηκαν κατά μέσο όρο στους -5 με -15^{o}C. Παρόμοιας έντασης ψυχρή εισβολή συμβαίνει στην περιοχή της νότιας Ευρώπης κάθε 35 χρόνια κατά μέσο όρο (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία της Ολλανδίας KNMI, WWA, 2017).

Στις Βόρειες Άλπεις μετρήθηκαν 38 cm χιονιού (www.onthesnow.com, 2017) όπως επίσης και στις περιοχές της Τσεχίας, νότιας Γερμανίας και Αυστρίας, ενώ στη Βαλκανική χερσόνησο μετρήθηκαν 40-70 cm για όλο τον Ιανουάριο στα βουνά καθώς και στις περιοχές της βόρειας Βουλγαρίας, της Ρουμανίας, Ουκρανίας και Μολδαβίας (Severe Weather Europe, 2017).

Εξ'αιτίας της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας και πίεσης μεταξύ της Βαλκανικής χερσονήσου και της Αδριατικής θάλασσας αναπτύχθηκαν εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι Μπόρα ταχυτήτων έως 150 km/h οι οποίοι επηρέασαν κυρίως την Κροατία και είχαν ως αποτέλεσμα δριμείς καταιγίδες πάνω από την Αδριατική θάλασσα (Severe Weather Europe, 2017).

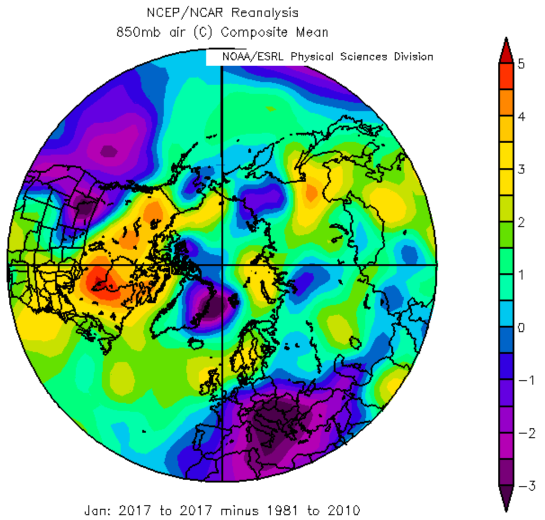
Επίσης καταγράφηκαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στις περιοχές της Πολωνίας (-19^{o}C, www.weatheronline.co.uk, 2017), της Ρωσίας (-50^{o}C, wmc.meteoinfo.ru, 2017), της Αλβανίας (-10^{o}C, www.weatheronline.co.uk), της Σερβίας (-15^{o}C, Oldenborgh (2017)) και της Ουγγαρίας (-17^{o}C, www.weatheronline.co.uk, 2017). Στην Μόσχα οι θερμοκρασίες έφτασαν τους -30^{o}C (www.weatheronline.co.uk, 2017), θερμοκρασία που καθιστά τον χειμώνα του 2017 τον πιο ψυχρό των τελευταίων 120 ετών (BBC News, 2017).

Τέλος, αν παρατηρήσουμε το σχήμα 3.2.1 το οποίο απεικονίζει την απόκλιση της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας, για 5 ημέρες κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής (7-11 Ιανουαρίου), στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης βλέπουμε τη σημαντική αρνητική απόκλιση που παρουσιάζεται στην ανατολική Ευρώπη. Συγκεκριμένα, στα Βαλκάνια (Σερβία, Π.Γ.Δ.Μ., Βουλγαρία, Βοσνία) παρατηρείται η μέγιστη αρνητική απόκλιση της θερμοκρασίας από το μέσο όρο (με βάση την κλιματολογία των ετών 1981-2010), της τάξης των 12^{o}C-15^{o}C. Στην Ελλάδα η απόκλιση είναι μικρότερη αλλά εξίσου σημαντική, της τάξης των 9-12^{o}C, ενώ παρόμοια απόκλιση παρατηρείται στις χώρες της Ρουμανίας, Ουκρανίας, Μολδαβίας, Ουγγαρίας και Πολωνίας. Επίσης χαρακτηριστικό του σχήματος 3.2.1 είναι το γεγονός ότι η κεντρική και δυτική Ευρώπη παρουσιάζει ουσιαστικά μηδενικές αποκλίσεις από το μέσο όρο για τις ημέρες 7-11 Ιανουαρίου.

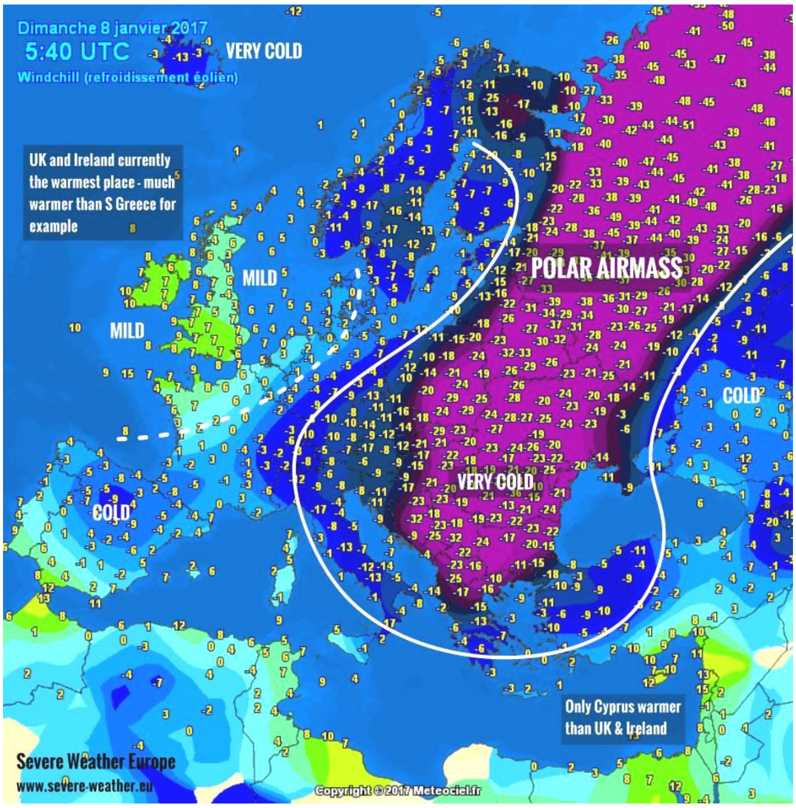


Σχήμα 3.2.1: Απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας στα 2 μέτρα (°C) στην Ευρώπη την περίοδο 7-11 Ιανουαρίου 2017 σε σχέση με την κλιματολογία των ετών 1981-2010. (Oldenborgh et al. (2017))

Μία δεύτερη ενδιαφέρουσα εικόνα δίνεται από το σχήμα 3.2.2, το οποίο απεικονίζει την απόκλιση της θερμοκρασίας στα 850 hPa για το Βόρειο Ημισφαίριο, τον Ιανουάριο του 2017 σε σχέση με το χρονικό διάστημα 1981-2010. Χαρακτηριστική είναι η απόκλιση της θερμοκρασίας έως και -3^{o}C στην νοτιο-ανατολική Ευρώπη (Ιταλία, Ελλάδα, Βοσνία, Κροατία, Π.Γ.Δ.Μ., Σερβία, Βουλγαρία) αλλά και η αρνητική απόκλισή της σε όλη την Ευρώπη, με εξαίρεση το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Σκανδιναβία.



Σχήμα 3.2.2: Απόκλιση της μέσης θερμοκρασίας (°C) του Βορείου Ημισφαιρίου στα 850 hPa τον Ιανουάριο του 2017 από το μέσο όρο του Ιανουαρίου για την περίοδο 1981-2010.



Σχήμα 3.2.3: Χάρτης της Ευρώπης που υποδεικνύει τις αέριες μάζες και ενδεικτικές θερμοκρασίες σε όλο τον Ευρωπαϊκό χώρο για τις 8 Ιανουαρίου 2017, 0540 UTC. Πηγή: Severe Weather Europe, Χάρτης από: Meteociel, 2017.

Στο σχήμα 3.2.3 φαίνεται ξεκάθαρα η εισβολή των Σιβηρικών αερίων μαζών στις 8 Ιανουαρίου με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση προς τη νοτιο-ανατολική Ευρώπη επηρεάζοντας ένα μεγάλο πλήθος χωρών: Ρωσία, Λευκορωσία, Πολωνία, Ουκρανία, Ρουμανία, Ουγγαρία, Σλοβακία, Αυστρία, Τσεχία, Βουλγαρία, Βοσνία, Σερβία, Αλβανία, Π.Γ.Δ.Μ., και Ελλάδα. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η Μεγάλη Βρετανία και Ιρλανδία, καθώς και η βόρεια Γαλλία παραμένουν ανεπηρέαστες από την εισβολή των αερίων μαζών και μάλιστα είναι θερμότερες από όλες τις χώρες τις νοτιο-ανατολικής Ευρώπης με εξαίρεση την Κύπρο η οποία επίσης παραμένει ανεπηρέαστη από την ψυχρή εισβολή.

3.2.2: Περιγραφή του Φαινομένου στην Ελλάδα

Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών έδωσε την ονομασία «Αριάδνη» στο φαινόμενο με σκοπό την πιο άμεση μετάδοση των πληροφοριών στους πολίτες ώστε να λάβουν έγκαιρα τα απαραίτητα μέτρα. Από τον Ιανουάριο του 2017 θα δίνονται χαρακτηριστικά ονόματα σε καιρικά φαινόμενα με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (www.noa.gr).

Ο Ιανουάριος του 2017 υπήρξε ένας από τους πιο ψυχρούς μήνες των τελευταίων 30 ετών. Σημειώθηκαν χιονοπτώσεις σε όλη τη χώρα κυρίως όμως στις ορεινές περιοχές. Στις ηπειρωτικές περιοχές στα βόρεια της χώρας σημειώθηκε ολικός παγετός (Ε.Μ.Υ. 2017).

Πολικές αέριες μάζες θερμοκρασίας -12^{o}C εισήλθαν στην Ελλάδα με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες στα 2 μέτρα να πέσουν στους -20^{o}C με -22^{o}C κατά μέσο όρο με έντονες χιονοπτώσεις σε όλη τη χώρα οι οποίες προκάλεσαν προβλήματα στις συγκοινωνίες κυρίως στα νησιά του Αιγαίου.

Για τις πρώτες 10 ημέρες του Ιανουαρίου οι θερμοκρασίες στα Βόρεια ηπειρωτικά τμήματα κυμάνθηκαν από -19.2^{o}C μέχρι 6^{o}C, στα κεντρικά ηπειρωτικά από -10^{o}C μέχρι 11^{o}C ενώ στις υπόλοιπες περιοχές της χώρας από -5^{o}C μέχρι 15^{o}C (Ε.Μ.Υ. 2017).

Για το επόμενο δεκαήμερο από το οποίο μας ενδιαφέρουν οι ημερομηνίες 11 και 12 Ιανουαρίου οι θερμοκρασίες στα Βόρεια ηπειρωτικά τμήματα κυμάνθηκαν από -22,7^{o}C μέχρι 4^{o}C, στα κεντρικά ηπειρωτικά από -14,8^{o}C μέχρι 8^{o}C ενώ στα υπόλοιπα τμήματα από -1^{o}C μέχρι 13^{o}C (Ε.Μ.Υ. 2017).

Δύο μέτρα χιόνι μετρήθηκαν στα νησιά των Σποράδων και στην Εύβοια τα οποία τέθηκαν σε κατάσταση κινδύνου καθώς έμειναν χωρίς ρεύμα για μια εβδομάδα (The Times, 2017). Στο λεκανοπέδιο Αττικής αντίθετα δε μετρήθηκε χιόνι αλλά χιόνισε μέχρι τις παραλιακές περιοχές της βορειο-ανατολικής Αττικής και η θερμοκρασίες στο κέντρο της πόλης έφτασαν τους -5^{o}C. Στο κέντρο της Θεσσαλονίκης η θερμοκρασία έφτασε τους -11^{o}C με έντονα προβλήματα στις αστικές συγκοινωνίες και στο Αεροδρόμιο Μακεδονία ενώ στη Φλώρινα η θερμοκρασία μειώθηκε τους -15^{o}C (www.accuweather.com, 2017)

Οι εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και το δριμύ ψύχος προκάλεσαν πολύ άσχημες συνθήκες διαβίωσης για τους πρόσφυγες στα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου. Η ψυχρή εισβολή έγινε αίτιο για τουλάχιστον 61 θανάτους σε όλη την Ευρώπη κυρίως αστέγων, προσφύγων και ηλικιωμένων στη Πολωνία, Ιταλία, Βουλγαρία, Π.Γ.Δ.Μ., Τσεχία, Αλβανία και στην Ελλάδα (Usatoday, 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

4.1 Δεδομένα

Αρχικά θα μελετήσουμε τις παρατηρήσεις τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών από χαρακτηριστικά σημεία της χώρας κατανεμημένα με απόσταση πολλών χιλιομέτρων μεταξύ τους για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά δεδομένα από όλη τη χώρα (χάρτης 4.1). Τα δεδομένα είναι από όλες τις ημέρες του Ιανουαρίου του 2017 (01/01/2017 – 31/01/2017).

Ο κάθε σταθμός παρέχει μετρήσεις για την πίεση επιφανείας, την πίεση στη στάθμη της θάλασσας, την κατεύθυνση (αζιμούθιο ^{o}) και ταχύτητα του ανέμου (m/s) κοντά στην επιφάνεια (~10 μέτρα), τη θερμοκρασία στα 2 μέτρα, το σημείο δρόσου (K) καθώς και την ορατότητα (m), τη νεφοκάλυψη (%) και τον υετό (mm). Τέλος, παρέχουν πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες (κυρίως τον υετό) των προηγουμένων ωρών και τη στιγμής της παρατήρησης. Οι σταθμοί είναι οι εξής:

1. Θεσσαλονίκη (LGTS – 16622).

   Γεωγραφικό πλάτος: 40,53^{o}

   Γεωγραφικό μήκος: 22,97^{o}

   Υψόμετρο: 8m

2. Αθήνα (Ελληνικό, LGAT – 16716).

   Γεωγραφικό πλάτος: 37,89^{o}

   Γεωγραφικό μήκος: 23,74^{o}

   Υψόμετρο: 45m

3. Ελευσίνα (LGEL – 16718).

   Γεωγραφικό πλάτος: 38,07^{o}

   Γεωγραφικό μήκος: 23,55^{o}

   Υψόμετρο: 31m

4. Ηράκλειο (LGIR – 16754).

   Γεωγραφικό πλάτος: 35,34^{o}

   Γεωγραφικό μήκος: 25,18^{o}

Υψόμετρο: 40m

Χάρτης 4.1: Γεωγραφική τοποθεσία των τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών. Χάρτης: Google Earth

4.2 Παρατηρήσεις Θερμοκρασίας στα 2m και Υετού

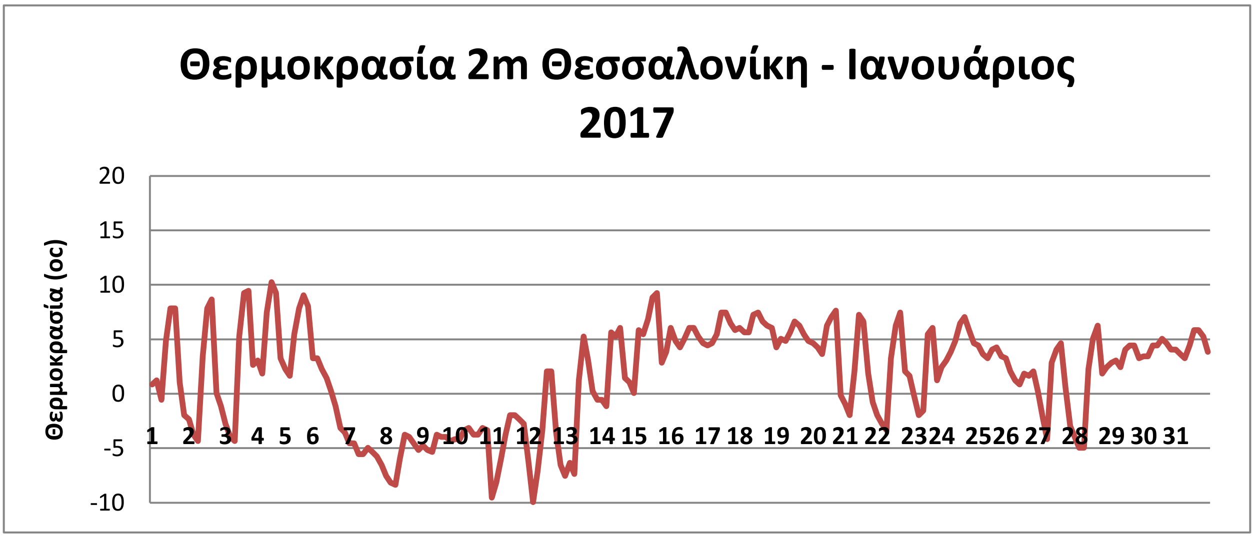
4.2.1 Θεσσαλονίκη

Στο σχήμα 4.1 βλέπουμε τις μετρήσεις της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα από το μετεωρολογικό σταθμό στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης. Εκ πρώτης όψεως βλέπουμε ξεκάθαρα την ψυχρή εισβολή και την πτώση της θερμοκρασίας κάτω από τους 0^oC στις 6 Ιανουαρίου και τη διάρκεια του παγετού μέχρι τις 12 Ιανουαρίου (6 ημέρες).

Η ελάχιστη θερμοκρασία μετρήθηκε στις 12 Ιανουαρίου στις 0300 UTC και ήταν $-9{,}95^oC$. Η θερμοκρασία από τις 1-6 Ιανουαρίου κυμαινόταν ανάμεσα στους -5 και 7^oC ενώ μετά την πάροδο της ψυχρής εισβολής, για τις υπόλοιπες ημέρες του Ιανουαρίου η θερμοκρασία παρέμεινε επάνω από το μηδέν με σχετικά μικρότερη διακύμανση ανάμεσα από τη μέρα και τη νύχτα από την αρχή του μήνα. Χαρακτηριστικό για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης είναι ο ολικός παγετός[1] που παρατηρήθηκε για το συνεχόμενο χρονικό διάστημα 6-12 Ιανουαρίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε σε κανέναν από τους άλλους 3 σταθμούς παρατήρησης. Η μέση ελάχιστη θερμοκρασία (υπολογισμένη από τις ημερήσιες ελάχιστες θερμοκρασίες) για τη Θεσσαλονίκη τον Ιανουάριο είναι

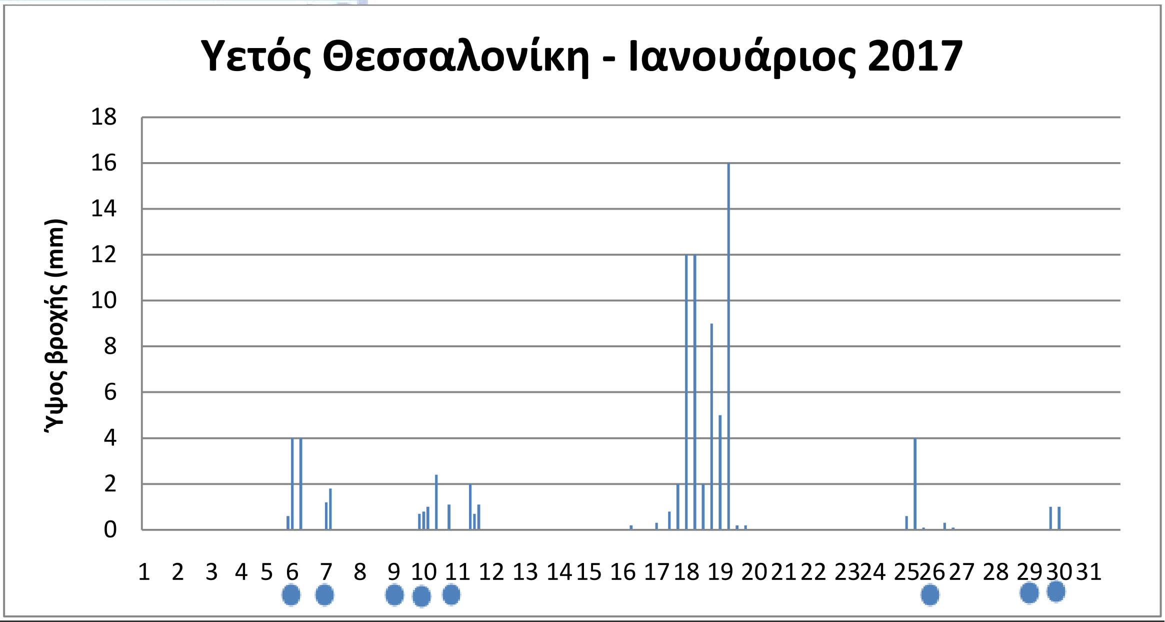
1,3^{o}C, η μέση μέγιστη 9,3^{o}C ενώ η μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι 5,2^{o}C (www.hnms.gr, Κορνάρος 1999 - περίοδος δεδομένων 1959-1997)

Οι μετρήσεις που αφορούν τον υετό στη Θεσσαλονίκη για τον Ιανουάριο παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2. Στην παρούσα εργασία δεν θα ασχοληθούμε με την ποσότητα του υετού, αλλά μόνο με το αν είχαμε μέτρηση. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής μετρήθηκε υετός με τη μορφή χιονόπτωσης στις 6, 7, 9, 10, 11, 26, 29 και 30 Ιανουαρίου και με τη μορφή διαλείπουσας πτώσης νιφάδων στις 25 Ιανουαρίου, 0900 UTC. Τον υπόλοιπο μήνα, ο υετός είχε τη μορφή βροχόπτωσης σε δύο περιπτώσεις: 17-19 και 25 Ιανουαρίου.



Σχήμα 4.1: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 2m (°C) για το σταθμό του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης

[1] ολικός παγετός: η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι κάτω από τους 0^{o}C.



Σχήμα 4.2: Χρονοσειρά υετού για το σταθμό της Θεσσαλονίκης

: μέτρηση χιονόπτωσης

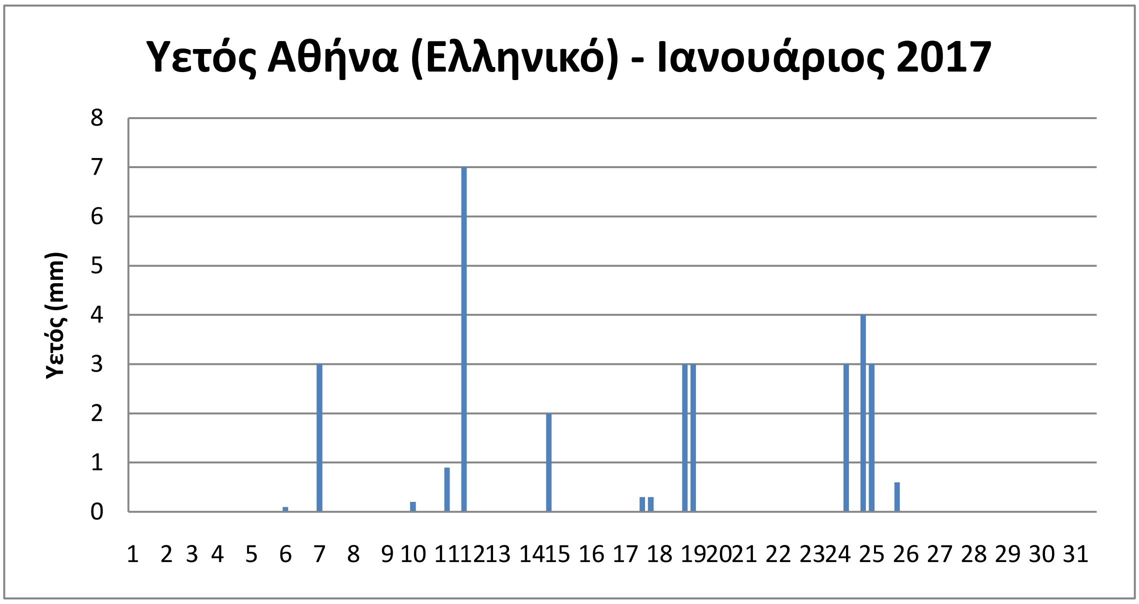
4.2.2 Αθήνα (Ελληνικό)

Οι παρατηρήσεις της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα από το μετεωρολογικό σταθμό της Αθήνας στο Ελληνικό (σχήμα 4.3) δείχνουν μια ομοιότητα με τις μετρήσεις της Θεσσαλονίκης. Παρομοίως, φαίνεται ξεκάθαρα η ψυχρή εισβολή για τις ίδιες ημέρες, 6 με 11-12 Ιανουαρίου. Ωστόσο υπάρχουν δύο σημαντικές διαφορές με τον σταθμό της Θεσσαλονίκης: η θερμοκρασία ξεκίνησε την άνοδο της από τις 10 Ιανουαρίου και οι θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν (παγετός) είναι ελάχιστες. Αυτό προφανώς αποδίδεται στην τοποθεσία της Αθήνας νοτιότερα της Θεσσαλονίκης.

Με βάση τα δεδομένα από την περίοδο 1955-1997, η μέση ελάχιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο στο Ελληνικό είναι 7,0^{o}C ενώ η μέση μέγιστη ανέρχεται στους 13,6^{o}C (www.hnms.gr, Κορνάρος 1999). Η ελάχιστη θερμοκρασία μετρήθηκε στις 8 Ιανουαρίου, 0600 UTC και ήταν -0,95^{o}C. Παρατηρείται επίσης μια ανοδική τάση της θερμοκρασίας για τη περίοδο 1-6 Ιανουαρίου, μάλιστα με την μέγιστη θερμοκρασία του μήνα (17,65^{o}C) να μετριέται στις 5 Ιανουαρίου, 1200 UTC. Μετά την ψυχρή εισβολή, παρατηρείται μια καθοδική τάση της θερμοκρασίας μέχρι το τέλος του μήνα.

Σχήμα 4.3: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 2m για το σταθμό της Αθήνας (Ελληνικό)

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.2.2 το χιόνι στο Λεκανοπέδιο Αττικής ήταν ελάχιστο έως μηδενικό. Οι θερμοκρασίες έπεσαν ελάχιστα κάτω από το μηδέν στις 8 και 9 Ιανουαρίου αλλά δεν μετρήθηκε υετός για εκείνες τις περιόδους. Στις 7, 11-12, 14, 17-19, 24-26 Ιανουαρίου παρουσιάστηκαν όλες οι βροχοπτώσεις.



Σχήμα 4.4: Χρονοσειρά υετού για το σταθμό της Αθήνας (Ελληνικό)

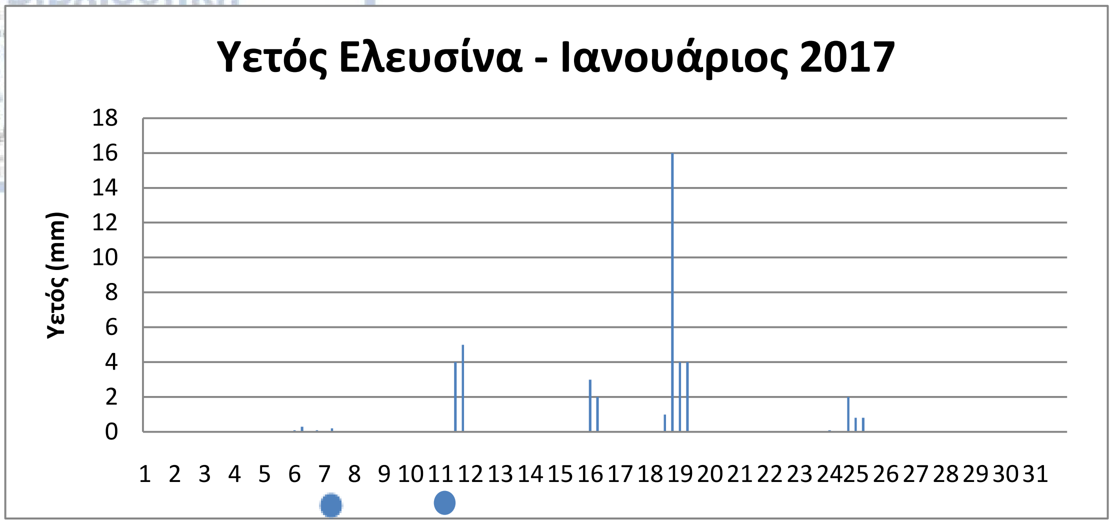
4.2.3 Ελευσίνα

Το σχήμα 4.5 το οποίο αντιπροσωπεύει το μετεωρολογικό σταθμό της Ελευσίνας δείχνει σαφείς ομοιότητες με τις δύο προηγούμενες χρονοσειρές, κυρίως με τον κοντινότερο σταθμό του Ελληνικού. Φαίνεται ξεκάθαρα η πτώση της θερμοκρασίας εξαιτίας της ψυχρής εισβολής για το διάστημα 6-12 Ιανουαρίου και τη νύχτα στις 7, 8, 9 Ιανουαρίου η θερμοκρασία έπεσε κάτω από το μηδέν. Παρ΄όλα αυτά, οι θερμοκρασίες παγετού ήταν σαφώς λιγότερες από της Θεσσαλονίκης.

Η μέση ελάχιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο στον σταθμό της Ελευσίνας είναι 5,4^{o}C και η μέση μέγιστη 13,0^{o}C (www.hnms.gr, Κορνάρος 1999 - περίοδος δεδομένων 1958-1997). Η χαμηλότερη θερμοκρασία που καταγράφηκε ήταν -2,15^{o}C στις 8 Ιανουαρίου 0300 UTC. Επίσης παρατηρείται παρόμοιο μοτίβο με τις μετρήσεις της Αθήνας στις τάσεις της θερμοκρασίας πριν και μετά την ψυχρή εισβολή καθώς υπάρχει μια ανοδική τάση πριν τις 6 Ιανουαρίου και μια πιο ομαλή καθοδική τάση από τις 12 Ιανουαρίου μέχρι το τέλος του μήνα.

Οι χιονοπτώσεις στην περιοχή της Ελευσίνας ήταν ελάχιστες, στις 7 και 11 Ιανουαρίου (σχήμα 4.6) και έπεσε ελάχιστος υετός σε μορφή βροχής κατά την περίοδο 6-12 Ιανουαρίου. Οι βροχοπτώσεις περιορίστηκαν σε αλλές 3 περιπτώσεις: 15-16, 18-19, 24-25.

Σχήμα 4.5: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 2m για τον σταθμό της Ελευσίνας



Σχήμα 4.6: Χρονοσειρά υετού για τον σταθμό της Ελευσίνας

●: μέτρηση χιονόπτωσης

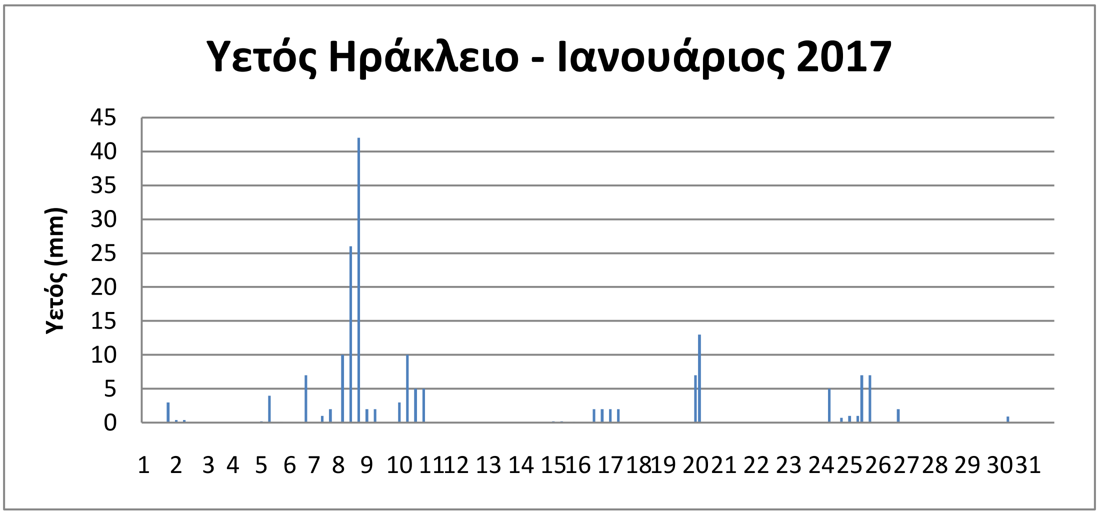
4.2.4 Ηράκλειο (Κρήτης)

Τέλος, το σχήμα 4.7 που αντιπροσωπεύει τις μετρήσεις από το νοτιότερο σταθμό από τους τέσσερις, το Ηράκλειο, παρουσιάζει την πιο διαφοροποιημένη χρονοσειρά από τις υπόλοιπες. Η ψυχρή εισβολή φαίνεται λιγότερο έντονη από τους υπόλοιπους σταθμούς εξ'αιτίας της γεωγραφικής θέσης του σταθμού, παρ'όλα αυτά μπορούμε να εντοπίσουμε την έναρξη του φαινομένου στις 6 Ιανουαρίου ενώ η λήξη του δεν είναι σαφής.

Οι μέσες ελάχιστες και μέγιστες μηνιαίες θερμοκρασίες είναι σαφώς υψηλότερες από τους προηγούμενους σταθμούς εξ'αιτίας της νοτιότερης γεωγραφικής θέσης του σταθμού του Ηρακλείου (9,0^{o}C και 15,3^{o}C) (www.hnms.gr, Κορνάρος 1999 - περίοδος δεδομένων 1955-1997). Η ελάχιστη θερμοκρασία καταγράφτηκε στις 9 Ιανουαρίου στις 0300 UTC και είχε τιμή 0,45^{o}C. Συνεπώς η θερμοκρασία δεν έπεσε κάτω από το μηδέν καθ'όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Τις ημέρες 10,11 Ιανουαρίου η θερμοκρασία παρουσίασε ένα τοπικό μέγιστο (9,45^{o}C) σε σχέση με τις άλλες περιοχές οι οποίες παρουσίαζαν την ίδια χρονική περίοδο αρκετά ψυχρότερες θερμοκρασίες (βλ. σχήματα 4.1, 4.3, 4.5) ενώ τελικά η θερμοκρασία επανήλθε στις κανονικές της τιμές στις 12 Ιανουαρίου.

Στο σχήμα 4.8 του υετού στο Ηράκλειο φαίνεται ότι υπήρξαν μετρήσεις καθ'όλη τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής αλλά ήταν με τη μορφή βροχής καθώς η θερμοκρασίες παρέμειναν θετικές για όλο τον μήνα. Συνεπώς δεν παρατηρήθηκαν καθόλου χιονοπτώσεις στον σταθμό του Ηρακλείου. Εκτός από το διάστημα 6-12 Ιανουαρίου μετρήθηκαν βροχοπτώσεις στις 1-2, 16-17, 20 και 24-27 Ιανουαρίου.

Σχήμα 4.7: Χρονοσειρά θερμοκρασίας στα 2m για τον σταθμό του Ηρακλείου



Σχήμα 4.8: Χρονοσειρά υετού για τον σταθμό του Ηρακλείου

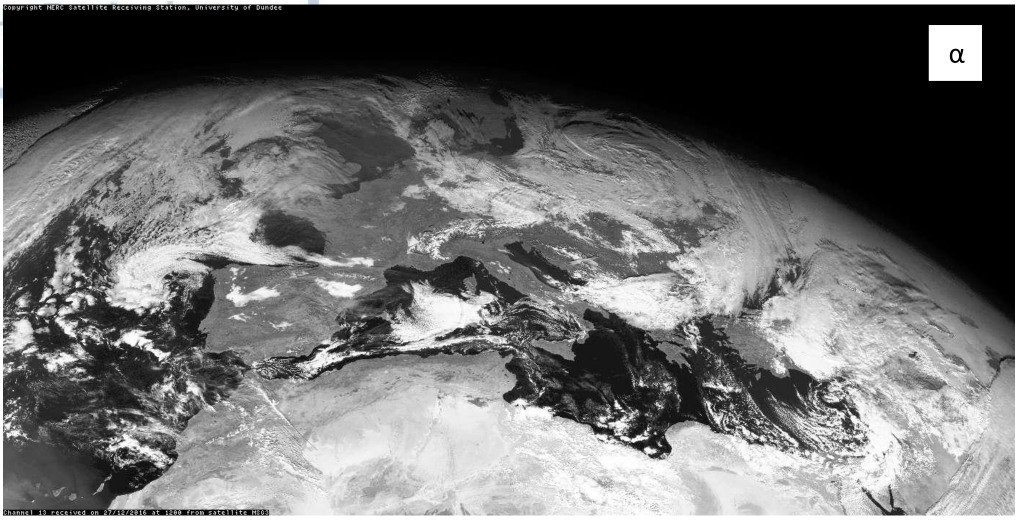
4.2.5 Συμπεράσματα για τη Θερμοκρασία στα 2m και τον Υετό

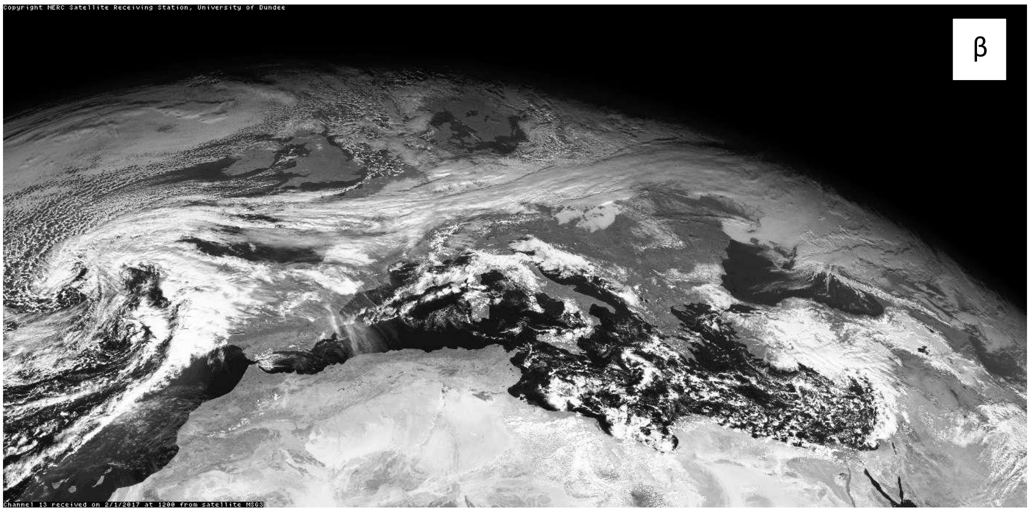
Συμπερασματικά, αν συγκρίνουμε τα δεδομένα των τεσσάρων χρονοσειρών (σχήματα 4.1, 4.3, 4.5, 4.7) για τη θερμοκρασία στα δύο μέτρα, η ψυχρή εισβολή διήρκησε 6 ημέρες με έναρξη στις 6 Ιανουαρίου και λήξη στις 12 Ιανουαρίου. Ασχέτως εάν οι θερμοκρασίες του Ηρακλείου για το τέλος της περιόδου είναι θερμές σε σχέση με τους άλλους σταθμούς, οι τιμές της θερμοκρασίας είναι αρκετά χαμηλότερες από ότι θα ήταν υπό κανονικές καιρικές συνθήκες, κάτι το οποίο φαίνεται ξεκάθαρα από την κλιματολογία (Πίνακας 4.1) και από το σχήμα 4.7 αν συγκρίνουμε τις τιμές της θερμοκρασίας πριν και μετά την ψυχρή εισβολή.

Πόλεις	**Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Ιανουαρίου (^{o}C)**	**Περίοδος Δεδομένων (ΕΜΥ)**
Θεσσαλονίκη	5,2	1959-1997
Αθήνα (Ελληνικό)	10,3	1955-1997
Ελευσίνα	9,2	1958-1997
Ηράκλειο	12,1	1955-1997

Πίνακας 4.1 – Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Ιανουαρίου για τους 4 σταθμούς παρατήρησης (Κορνάρος 1999).

Τέλος, αν λάβουμε υπόψιν τις χρονοσειρές που αφορούν τον υετό στους 4 σταθμούς (σχήματα 4.2, 4.4, 4.6, 4.8) βλέπουμε ότι η περισσότερη χιονόπτωση παρατηρήθηκε στο βορειότερο σταθμό της Θεσσαλονίκης τις μέρες 6, 7, 9, 10, 11, 26, 29 και 30 Ιανουαρίου ενώ μετρήθηκε ελάχιστο έως μηδενικό χιόνι στην Αττική όπως δείχνουν οι μετρήσεις των σταθμών της Αθήνας και της Ελευσίνας. Η χιονόπτωση στον νοτιότερο σταθμό του Ηρακλείου ήταν εντελώς μηδενική.

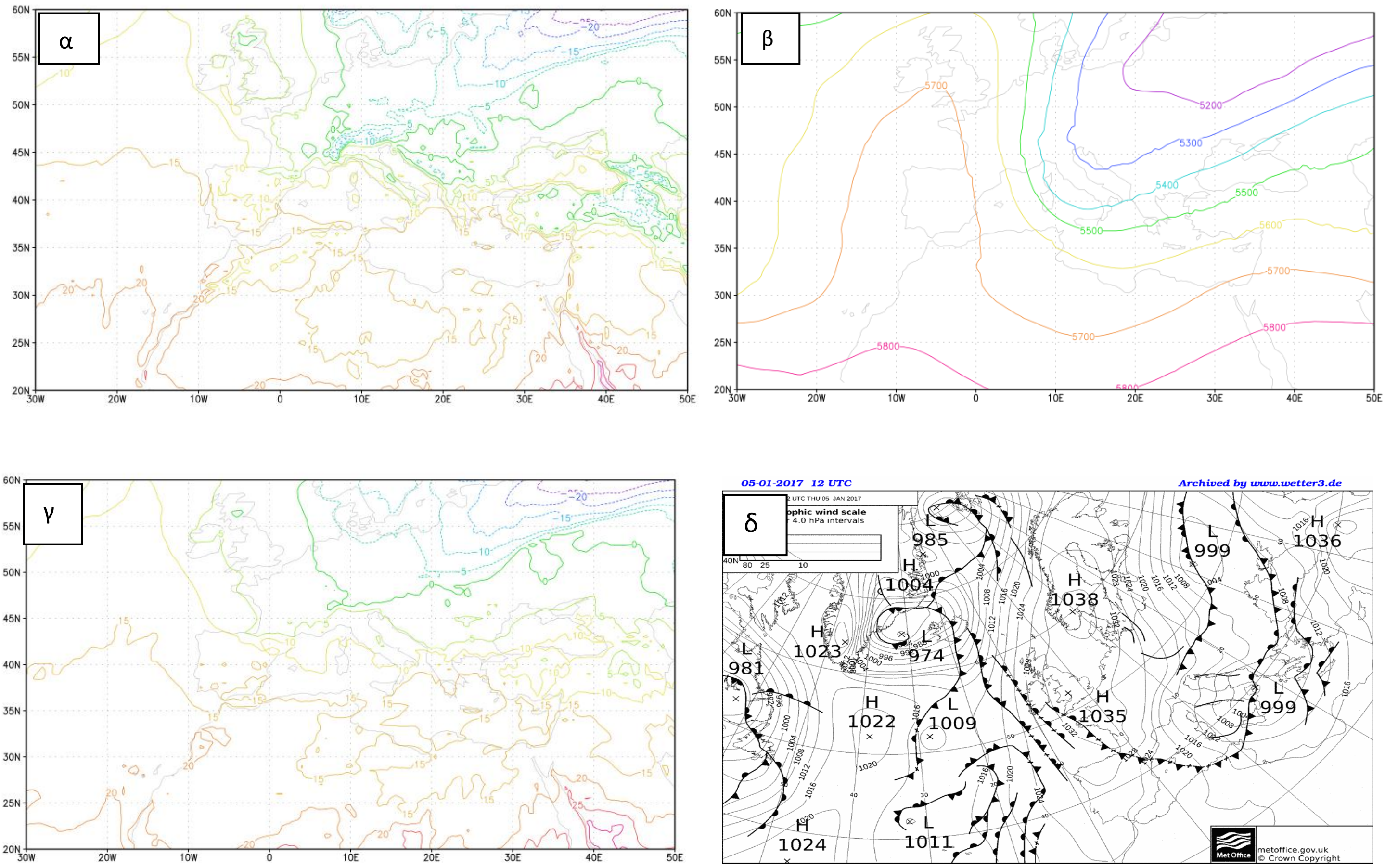




Σχήμα 5.1: Δορυφορική εικόνα της Ευρώπης από το Meteosat στο κανάλι 12 (0,4-1,1 μm) για τις α) 1200 UTC 27/12/16 και β) 1200 UTC 02/01/17, Πηγή: www.sat.dundee.ac.uk

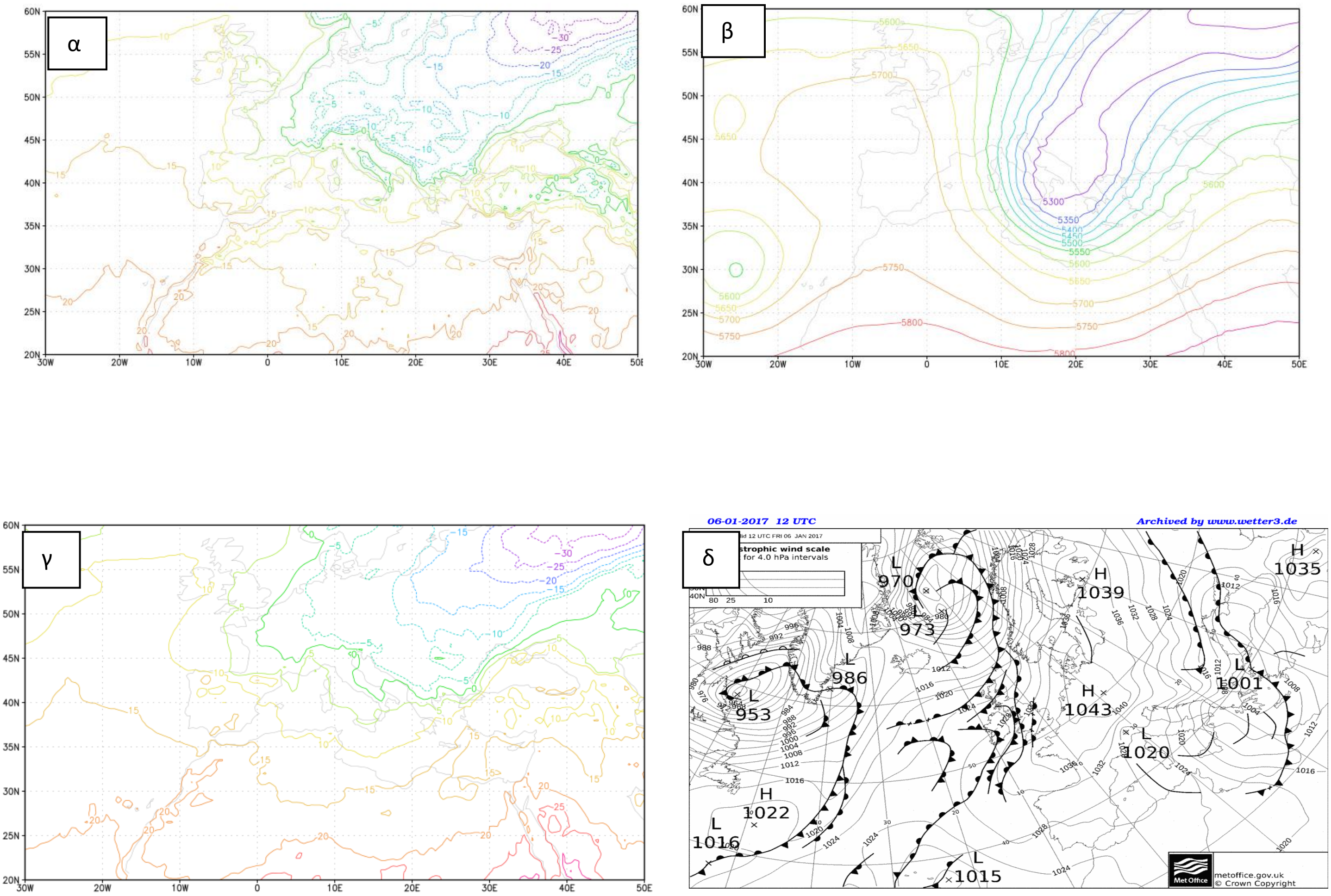
Στα σχήματα 5.1α,β βλέπουμε την εικόνα της Ευρώπης 10 και 4 ημέρες πριν την ψυχρή εισβολή αντίστοιχα από δορυφορικές εικόνες. Στις 1200 UTC 27/12/16 παρατηρούμε ιδιαίτερα πυκνή νέφωση στη βορειο-ανατολική Ευρώπη (Ρωσία, Πολωνία κλπ) η οποία επεκτείνεται και στη βόρεια ηπειρωτική Ελλάδα. Το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης της Μεσογείου (Ιταλία, Ισπανία, Πορτογαλία, νότια Ελλάδα) καθώς και η Γαλλία και η Τουρκία παραμένουν με αίθριο καιρό. Στις 1200 UTC 02/01/17 η νέφωση έχει μεταφερθεί σε ολόκληρη τη βόρεια ηπειρωτική Ευρώπη ενώ σε γενικές γραμμές η Μεσόγειος δεν παρουσιάζει νεφώσεις και ο καιρός φαίνεται να είναι σχεδόν αίθριος.

Για τις 5 Ιανουαρίου, σύμφωνα με τους αντίστοιχους χάρτες της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα (σχήμα 5.2α) του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa (σχήμα 5.2β) και της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (σχήμα 5.2δ), παρατηρούμε ότι ο Ελληνικός χώρος καλύπτεται από ένα πεδίο χαμηλών πιέσεων. Η ισόθερμη των 10^{o}C καλύπτει την περισσότερη ηπειρωτική Ελλάδα (σταθμός Θεσσαλονίκης) και των 15^{o}C τη νότια Ελλάδα (σταθμοί Αθήνας, Ελευσίνας, Ηρακλείου). Βλέπουμε ότι οι θερμοκρασίες στα 2 μέτρα παραμένουν πάνω από το μηδέν όχι μόνο στην Ελλάδα, αλλά και στην υπόλοιπη Νότια Ευρώπη ενώ χαρακτηριστικές, στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο, είναι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στην βορειο-ανατολική Ευρώπη (-20^{o}C) και οι υψηλές πιέσεις στη δυτική Ευρώπη σε αντίθεση με τις χαμηλές στην βορειο-ανατολική (σχήμα 5.2δ). Όσον αφορά τη θερμοκρασία στα 850 hPa, αν παρατηρήσουμε τον αντίστοιχο χάρτη για τις 5 Ιανουαρίου βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος του Αιγαίου Πελάγους και η Κρήτη καλύπτονται από την ισόθερμη των 15^{o}C ενώ η μεγαλύτερη έκταση της κεντρικής και βόρειας Ελλάδας από την ισόθερμη των 10^{o}C.



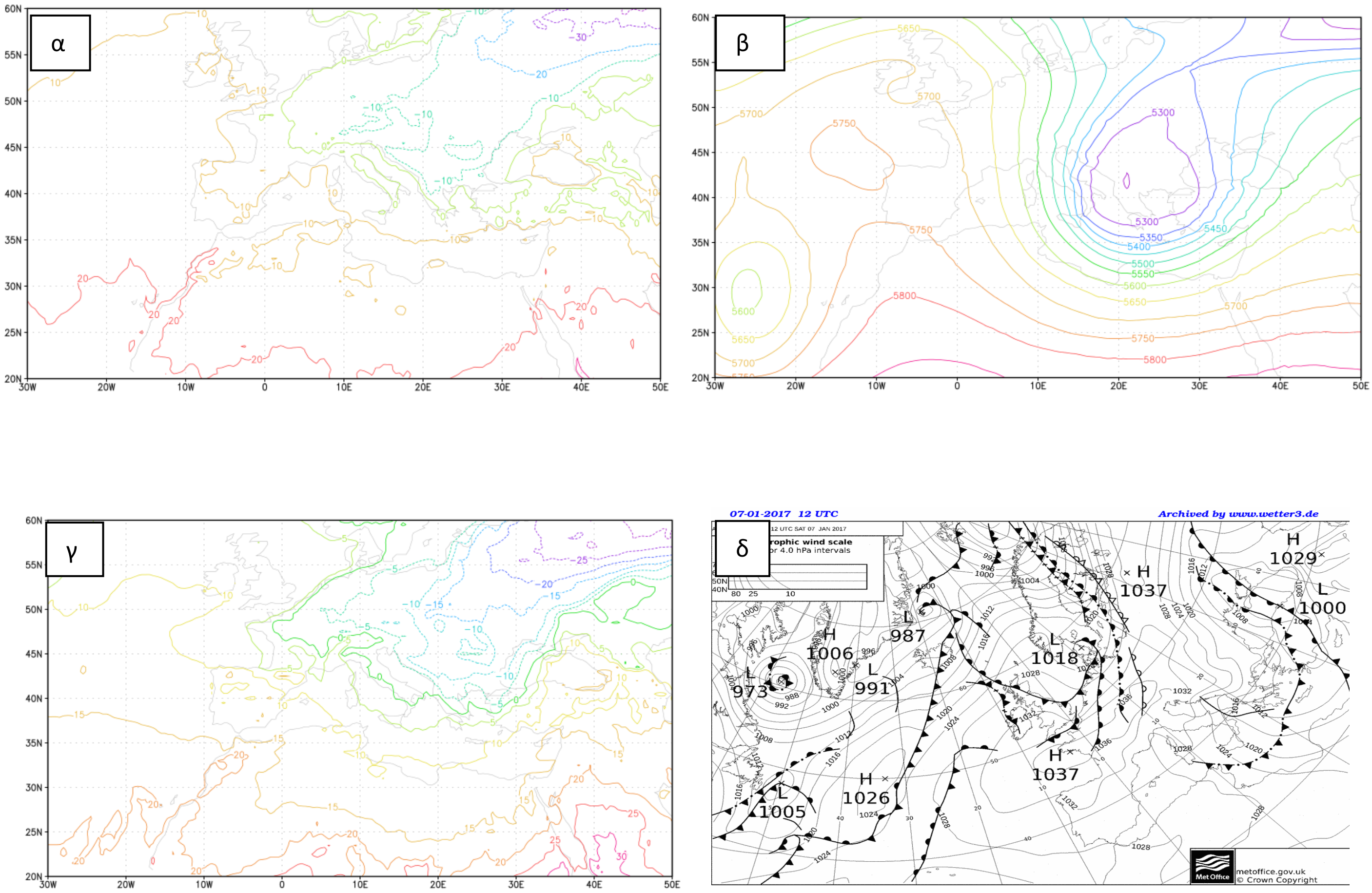
Σχήμα 5.2: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 05/01/17

Παρατηρώντας τον χάρτη απεικόνισης του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa (σχήμα 5.3β) και τον αντίστοιχο χάρτη πιέσεων (σχήμα 5.3δ) για τις 6 Ιανουαρίου, βλέπουμε την ύπαρξη ενός χαμηλού βαρομετρικού πάνω από τη κεντρική-ανατολική Μεσόγειο. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες αρχίζουν να μειώνονται με την ισόθερμη των 5^{o}C να καλύπτει την μεγαλύτερη έκταση της βορείου Ελλάδος και των 10^{o}C της νοτίου. Χαρακτηριστική είναι η εκδήλωση θερμοκρασιών κάτω από το μηδέν στα βόρεια της χώρας, στη βορειο-δυτική Μακεδονία (-5^{o}C, σχήμα 5.3α). Αντιστοίχως, μειώνεται και η θερμοκρασία στα 850 hPa με την ισόθερμη των 0^{o}C να εισέρχεται στον ελληνικό χώρο πάνω από τις περιοχές της δυτικής Μακεδονίας και ανατολικής Θράκης. Επίσης παρατηρούμε τη μείωση των θερμοκρασιών σε σχέση με 24 ώρες πριν σε όλη τη Μεσόγειο και ηπειρωτική Ευρώπη.



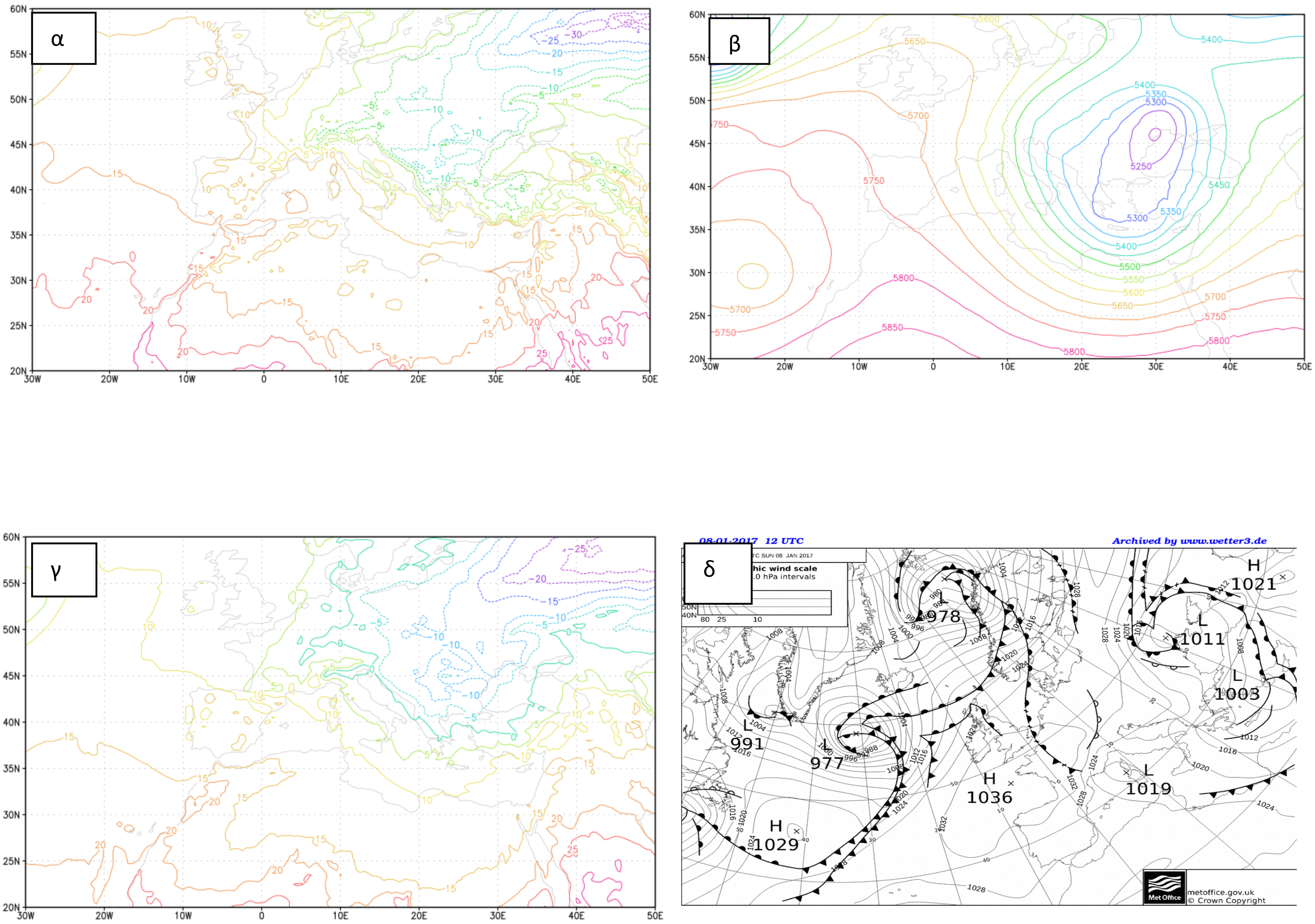
Σχήμα 5.3: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 06/01/17

Όπως παρατηρήσαμε και στα διαγράμματα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, το επεισόδιο της ψυχρής εισβολής ξεκινάει στις 6 με 7 Ιανουαρίου. Παρατηρώντας και τους αντίστοιχους χάρτες του γεωδυναμικού στα 500 hPa όπου υπάρχει ένα κλειστό χαμηλό των υψών (σχήμα 5.4β), τους χάρτες πίεσης όπου βλέπουμε ένα ψυχρό μέτωπο να κινείται προς τον Νότο (σχήμα 5.4δ) και κυρίως τους χάρτες επιφανείας για τις 7 Ιανουαρίου επιβεβαιώνουμε την έναρξη του φαινομένου. Οι θερμοκρασίες στην Ελλάδα (σχήμα 5.4α) παρουσιάζουν απότομη μείωση με την ισόθερμη των -10^{o}C να εισβάλλει στον ελληνικό χώρο και η νότια Ελλάδα να βρίσκεται πάνω από τους 0^{o}C με την Κρήτη να καλύπτεται από την ισόθερμη των 10^{o}C. Οι περισσότερες χιονοπτώσεις στις Ευρωπαϊκές χώρες και στην Ελλάδα σηματοδοτούνται από την απότομη πτώση της θερμοκρασίας στις 07/01. Η θερμοκρασία στα 850 hPa (σχήμα 5.4γ) συνεχίζει την πτώση της με την ισόθερμη των -5^{o}C να έχει εισβάλλει στη Βόρεια Ελλάδα (Θεσσαλονίκη, Δυτική Μακεδονία, Ανατολική Θράκη) και την ισόθερμη των 10^{o}C να βρίσκεται πλέον νοτιο-ανατολικά της Κρήτης. Το χαμηλό βαρομετρικό αρχίζει να επεκτείνεται προς τα ανατολικά όπου έχει πλέον καλύψει την μεγαλύτερη έκταση της Ελλάδας και των Βαλκανίων, ενώ όλη η νοτιο-ανατολική Ευρώπη χαρακτηρίζεται από χαμηλές πιέσεις.



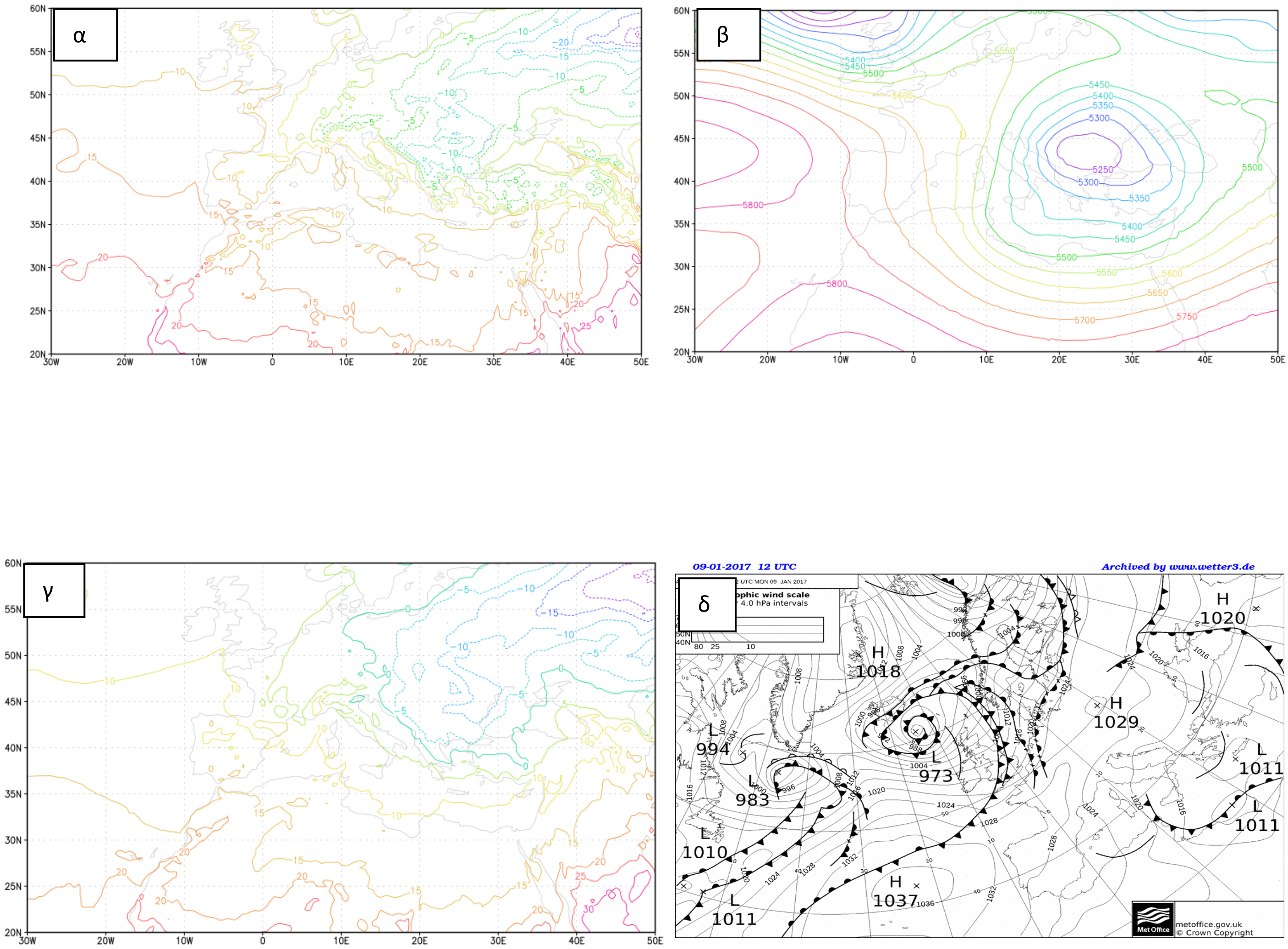
Σχήμα 5.4: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 07/01/17

Στις 8 Ιανουαρίου, το πεδίο των θερμοκρασιών είναι παρόμοιο με των προηγούμενων 24 ωρών. Θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν επικρατούν στη βόρεια Ελλάδα και φυσικά σε όλη την κεντρική και βορειο-ανατολική Ευρώπη (σχήμα 5.5α). Παρόμοιο είναι και το πεδίο των θερμοκρασιών στα 850 hPa (σχήμα 5.5γ) με μια μικρή υποχώρηση των ισόθερμων των -5^{o}C και 0^{o}C βορειότερα, ενώ παρατηρείται μετατόπιση της ισόθερμης των 10^{o}C ακόμη πιο ανατολικά. Παρατηρούμε επίσης το χαμηλό βαρομετρικό, στην περιοχή της δυτικής Τουρκίας (σχήμα 5.5δ), υπεύθυνο για τους βόρειους ανέμους που πνέουν έντονα κυρίως στο βόρειο τμήμα της χώρας. Ο ελληνικός χώρος εξακολουθεί να καλύπτεται από πεδίο υψηλών πιέσεων. Χαρακτηριστικός είναι επίσης ο σχηματισμός ενός χαμηλού βαρομετρικού στην Σαρδηνία και στην περιοχή του Εύξεινου Πόντου.

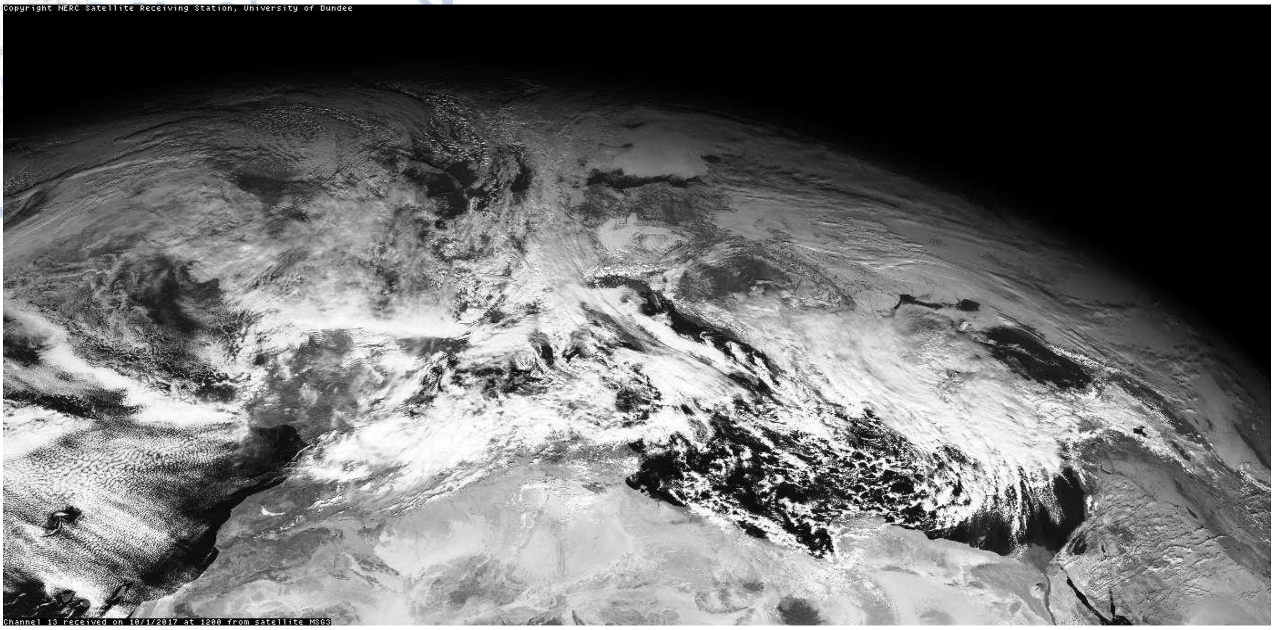


Σχήμα 5.5: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 08/01/17

Μέσα στις επόμενες 24 ώρες το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού του Εύξεινου Πόντου μετακινείται και νοτιότερα, στην περιοχή της Κρήτης (σχήμα 5.6δ), επηρεάζοντας τον καιρό της χώρας μας με βορειο-ανατολικούς ανέμους. Οι θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν συνεχίζουν να πλήττουν την κεντρική και βορειο-ανατολική Ευρώπη. Ο ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από δριμύ ψύχος καθώς καλύπτεται πλέον από την ισόθερμη των -5^{o}C (σχήμα 5.6α). Η θερμοκρασία στα 850 hPa (σχήμα 5.6γ) παρουσιάζει παρόμοια εικόνα με τα προηγούμενα 24-ωρα με μοναδική εξαίρεση την μετατόπιση της ισόθερμης των 5^{o}C πάνω από την δυτική Πελοπόννησο. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η δυτική Ευρώπη δεν πλήττεται ακόμα από παγετό και χιονοπτώσεις.

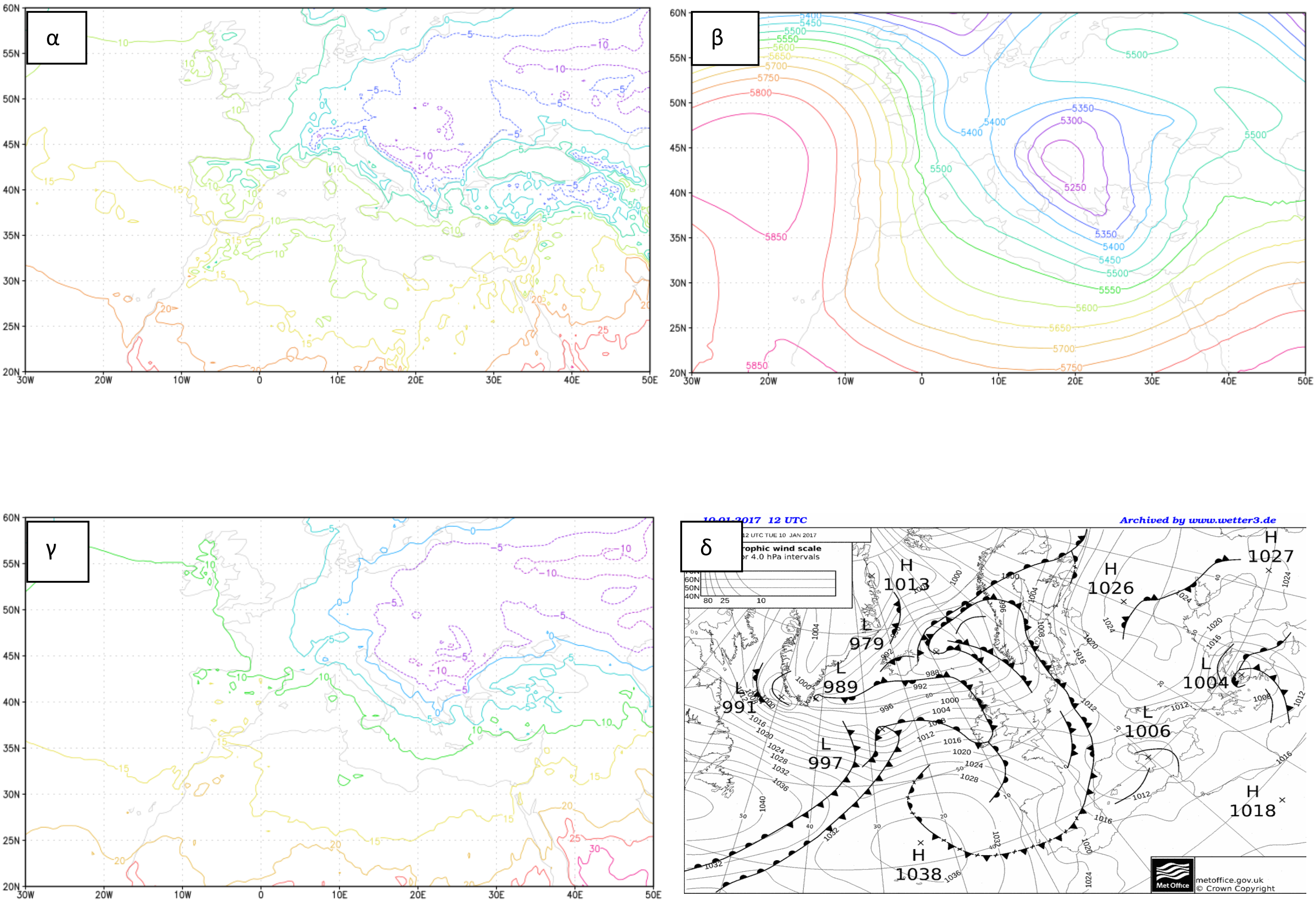


Σχήμα 5.6: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 09/01/17



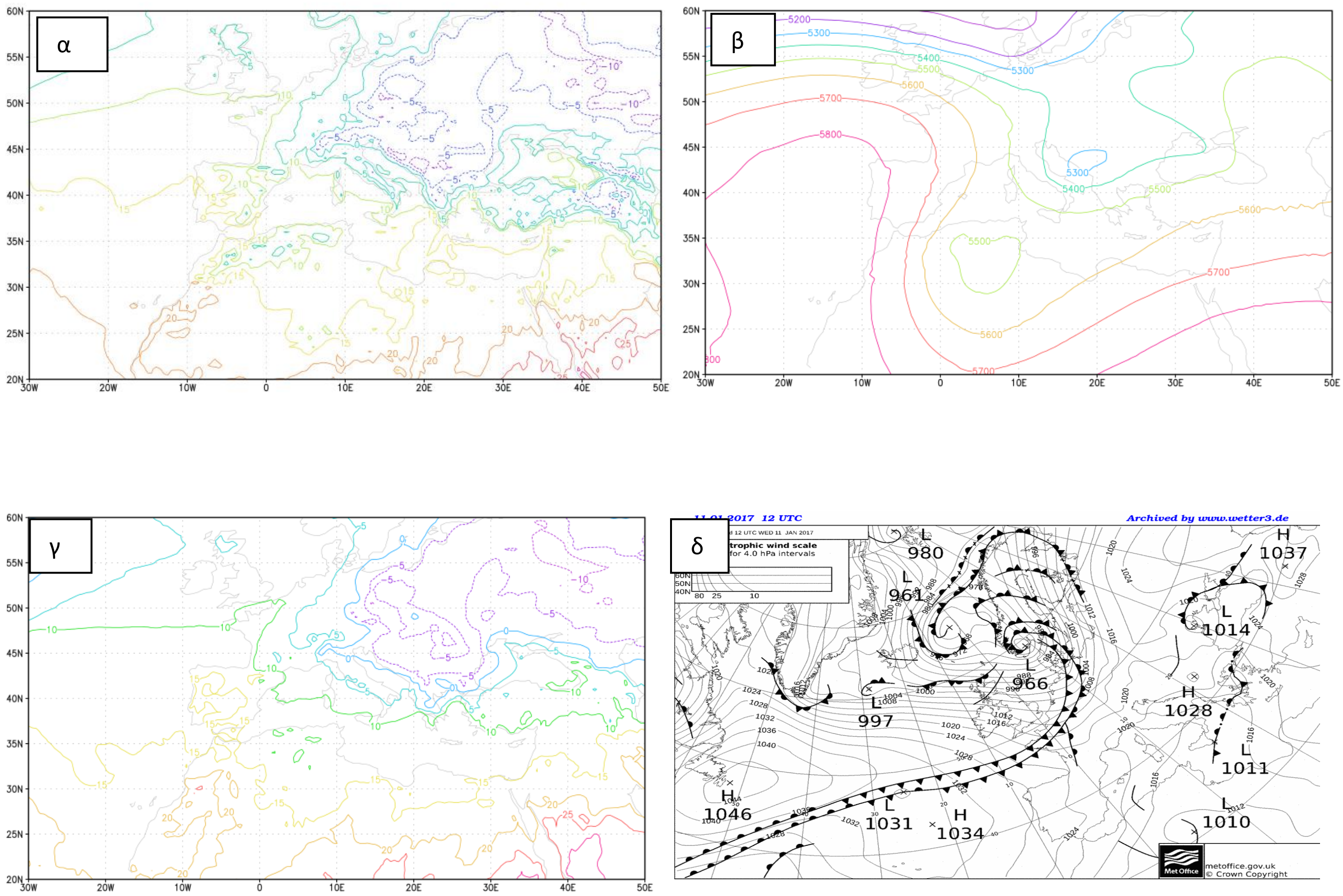
Σχήμα 5.7: Δορυφορική εικόνα της Ευρώπης κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής – 10/01/17, 1200 UTC, Πηγή: www.sat.dundee.ac.uk

Στο σχήμα 5.7 βλέπουμε μία δορυφορική εικόνα της Ευρώπης στις 10 Ιανουαρίου 1200 UTC, κατά τη διάρκεια της ψυχρής εισβολής. Παρατηρούμε πυκνή νέφωση σε όλη τη Μεσόγειο και ιδιαίτερα στην νοτιο-ανατολική Ευρώπη και Τουρκία. Σημαντικές μεταβολές παρατηρούνται στις επόμενες 24 ώρες όσον αφορά τη θερμοκρασία καθώς πλέον το χαμηλό βαρομετρικό μετακινείται από την περιοχή της Κρήτης προς τα βόρειο-ανατολικά επηρεάζοντας έτσι τον καιρό όλων των Βαλκανίων και της ανατολικής Ευρώπης (σχήμα 5.8δ). Παρατηρούμε μια απότομη πτώση των θερμοκρασιών στα 2 μέτρα (σχήμα 5.8α) κυρίως στη κεντρική Ευρώπη (Γερμανία, Τσεχία, Αυστρία) και μετακίνηση της ισόθερμης των -5^{o}C προς τα δυτικά. Στον ελληνικό χώρο ο παγετός συνεχίζεται με την ισόθερμη των -5^{o}C να υποχωρεί βορειότερα, και οι θερμοκρασίες να είναι άνω του μηδενός στην κεντρική και νότια Ελλάδα με την ισόθερμη των 10^{o}C να καλύπτει τη Κρήτη για πρώτη φορά από την έναρξη του φαινομένου. Στα 850 hPa (σχήμα 5.8γ) συνεχίζεται μια ελαφρή υποχώρηση των ισοθέρμων των -5 και 0^{o}C προς τα βορειο-δυτικά και την επανεμφάνιση της ισόθερμης των 10^{o}C στον ελληνικό χώρο, επάνω από το νησί της Ρόδου.



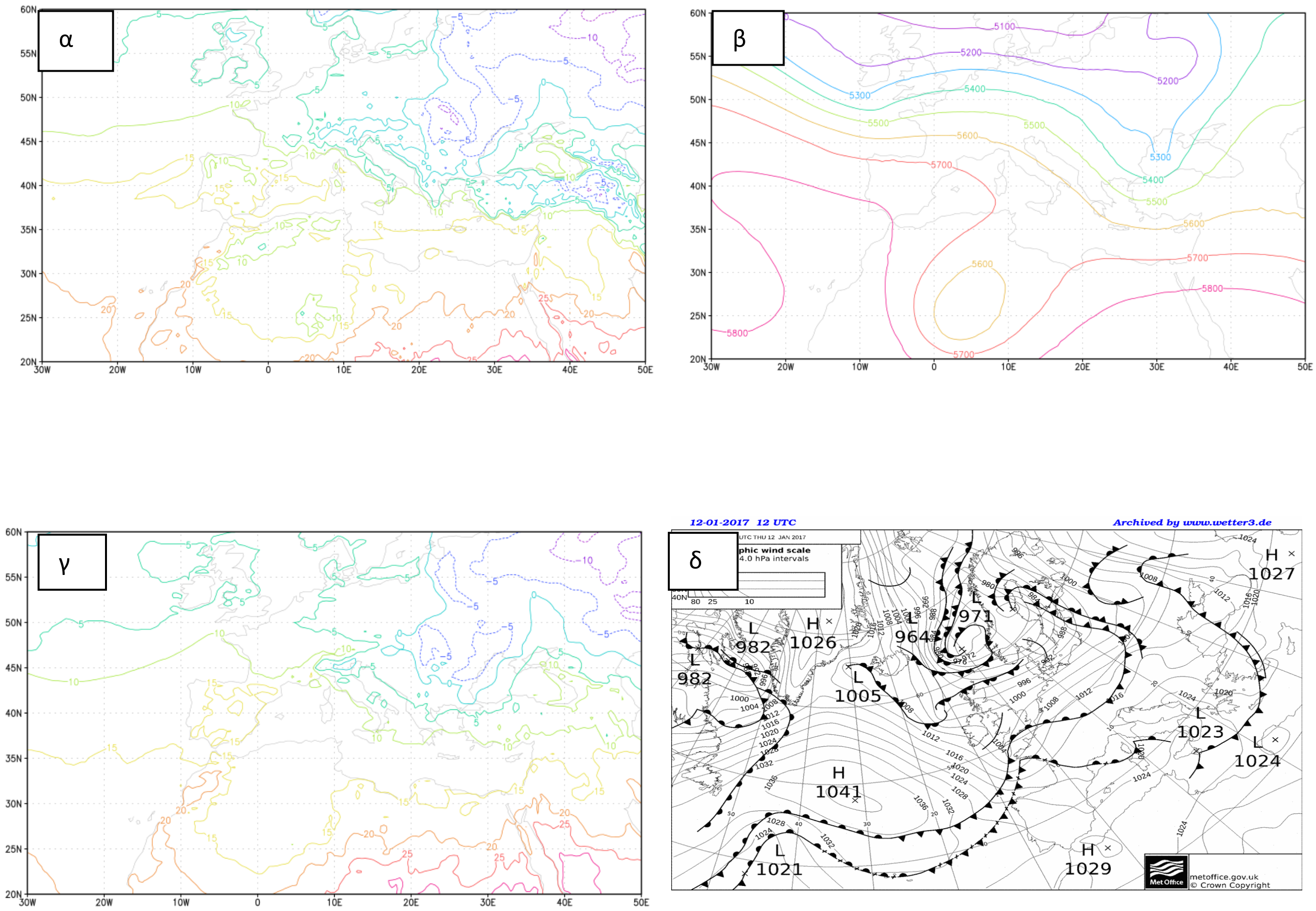
Σχήμα 5.8: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 10/01/17

Παρατηρώντας τον χάρτη του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa βλέπουμε την εξασθένιση του χαμηλού των υψών (σχήμα 5.9β). Από τον χάρτη της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (σχήμα 5.9δ) για τις 11 Ιανουαρίου βλέπουμε την εξασθένιση του χαμηλού βαρομετρικού. Οι θερμοκρασίες στον ελληνικό χώρο αρχίζουν να αυξάνονται κυρίως στο Αιγαίο Πέλαγος όπου η θερμοκρασία στα 2μ ανέρχεται στους 10^{o}C. Η βόρεια Ελλάδα και Θεσσαλία παρ’όλα αυτά παραμένουν ακόμα σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η κεντρική ηπειρωτική Ευρώπη παραμένει καλυμμένη από την ισόθερμη των -5^{o}C ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι για πρώτη φορά από την έναρξη της ψυχρής εισβολής εμφανίσθηκαν στη βορειο-δυτική Αφρική θερμοκρασίες σχεδόν μηδενικές (Μαρόκο, βόρεια Αλγερία, σχήμα 5.9α). Χαρακτηριστική είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και στα 850 hPa (σχήμα 5.9γ) με την ισόθερμη των 10^{o}C να καλύπτει τη μεγαλύτερη έκταση του Αιγαίου Πελάγους και όλη τη νότια Ελλάδα και Κρήτη, ενώ η ισόθερμη των -5^{o}C έχει πλέον υποχωρήσει αρκετά βορειότερα από τη χώρα.



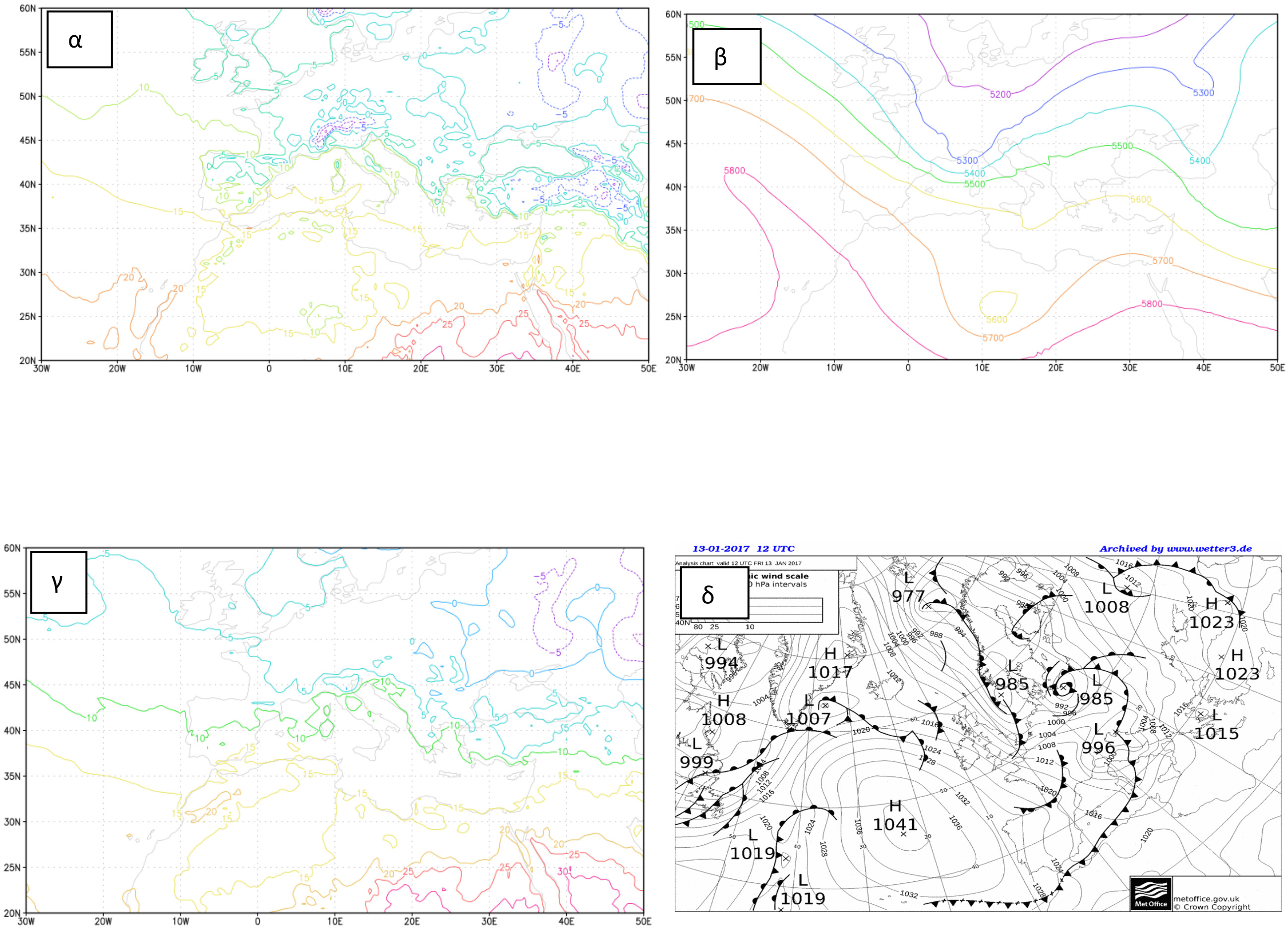
Σχήμα 5.9: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 11/01/17

Στις 12 Ιανουαρίου ο ελληνικός χώρος καλύπτεται από σχετικά υψηλές πιέσεις (σχήμα 5.10δ). Η ισόθερμη των 0^oC αρχίζει να υποχωρεί από την Ελλάδα όλο και βορειότερα ενδεικτικό της ελάττωσης της έντασης της ψυχρής εισβολής στην ανατολική Μεσόγειο. Το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης της χώρας με εξαίρεση την βόρεια Ήπειρο χαρακτηρίζεται από θερμοκρασίες άνω του μηδενός (σχήμα 5.10α). Το ίδιο ισχύει και για τη θερμοκρασία στα 850 hPa (σχήμα 5.10γ) με την υποχώρηση της ισόθερμης των 0^oC στα βορειο-δυτικά της χώρας. Παρατηρώντας τον χάρτη των θερμοκρασιών στην υπόλοιπη Ευρώπη βλέπουμε μια γενική θέρμανση κυρίως στη δυτική και κεντρική Ευρώπη.



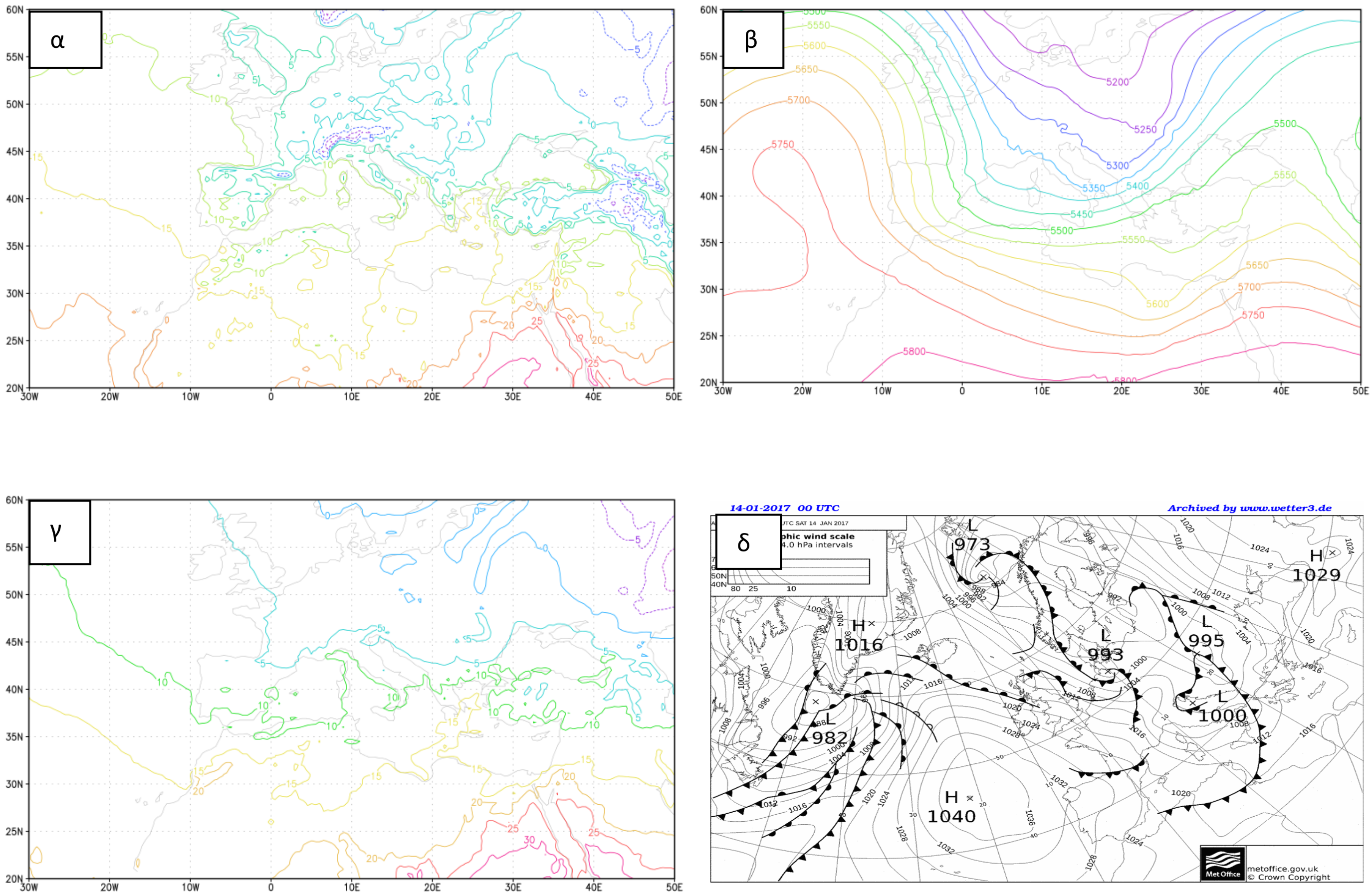
Σχήμα 5.10: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^oC), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^oC) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 12/01/17

Στο επόμενο εικοσι-τετράωρο η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνεται σηματοδοτώντας την υποχώρηση της ψυχρής εισβολής. Οι θερμοκρασίες στα 2 μέτρα (σχήμα 5.11α) και στα 850 hPa (σχήμα 5.11γ) φαίνεται να έχουν επανέλθει σε φυσιολογικά, για την εποχή, επίπεδα στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο. Συγκεκριμένα στον ελληνικό χώρο ο παγετός έχει υποχωρήσει και παρατηρούμε ότι όλη η χώρα χαρακτηρίζεται από θετικές θερμοκρασίες. Επίσης με εξαίρεση τις ορεινές περιοχές βλέπουμε ότι στην υπόλοιπη Ευρώπη όλες οι θερμοκρασίες είναι άνω του μηδενός. Παρατηρώντας τον αντίστοιχο χάρτη του γεωδυναμικού ύψους στα 500 hPa (σχήμα 5.11β) και το χάρτη της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (σχήμα 5.11δ) βλέπουμε το σχηματισμό ενός χαμηλού βαρομετρικού πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος και συνεπώς την κάλυψη της ηπειρωτικής Ελλάδας και Κρήτης από σχετικά χαμηλές πιέσεις. Επίσης από το σχήμα 5.11β βλέπουμε ότι η Ελλάδα είναι σε μια ράχη στα 500 hPa.

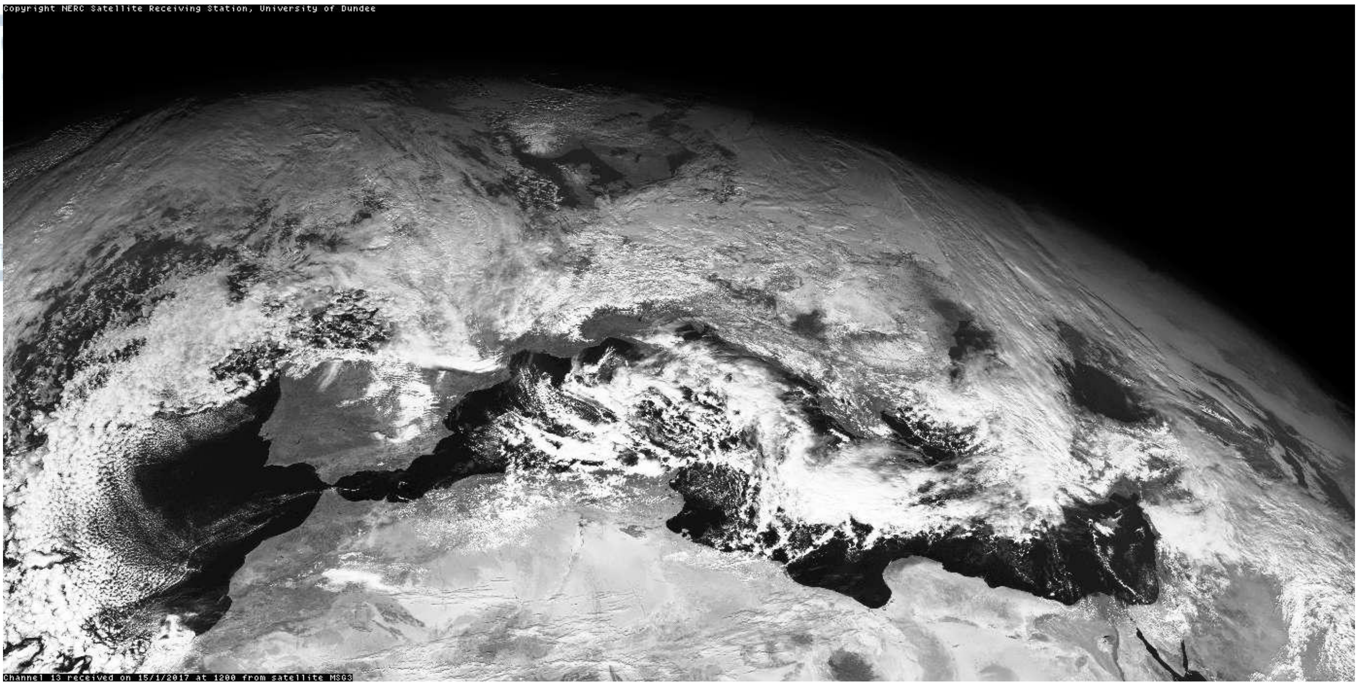


Σχήμα 5.11: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (^{o}C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (^{o}C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 13/01/17

Φτάνοντας στο τέλος της συνοπτικής ανάλυσης περιλαμβάνουμε και μερικές ώρες μετά τη λήξη του φαινομένου (12-13 Ιανουαρίου). Βλέπουμε πλέον την ισόθερμη των 15°C να εισβάλλει στο Αιγαίο Πέλαγος (στα 2 μέτρα (σχήμα 5.12α) και στα 850 hPa (σχήμα 5.12γ)). Ο παγετός έχει πλέον λήξει και οι θερμοκρασίες συνεχώς αυξάνονται από τις 12 Ιανουαρίου. Παρατηρείται γενική θέρμανση και υποχώρηση της ισόθερμης των -5°C ακόμα και στην βορειο-ανατολική Ευρώπη. Ένας νέος αυλώνας αναμένεται να έρθει στην Ελλάδα από τα δυτικά στα 500 hPa (σχήμα 5.12β).



Σχήμα 5.12: Χάρτες α) θερμοκρασίας στα 2m (°C), β) γεωδυναμικού Ύψους στα 500 hPa (gpm), γ) θερμοκρασίας στα 850 hPa (°C) και δ) πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) στις 1200 UTC, 14/01/17



Σχήμα 5.13: Δορυφορική εικόνα της Ευρώπης 3 ημέρες μετά την ψυχρή εισβολή – 15/01/17, 1200 UTC, Πηγή: www.sat.dundee.ac.uk

Στο σχήμα 5.13 βλέπουμε την εικόνα της Ευρώπης 3 ημέρες μετά το πέρας της ψυχρής εισβολής, στις 15 Ιανουαρίου, 1200 UTC. Παρατηρούμε την έντονη νέφωση που παραμένει σε πολλές περιοχές της Ευρώπης (Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία, Γερμανία, Ιταλία και νότια Ελλάδα). Χαρακτηριστική είναι η διάλυση της νέφωσης στην κεντρική Ελλάδα (Στερεά Ελλάδα, Θεσσαλία και κάποιες περιοχές της Μακεδονίας).

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις αναλύσεις της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα, η ψυχρή εισβολή ξεκίνησε στις 6 Ιανουαρίου με την υποχώρηση των ισοθέρμων των 10 και $15^{o}C$ νοτιότερα και την εισβολή των ισοθέρμων των -5 και $-10^{o}C$ από την βορειο-ανατολική Ευρώπη. Από τις 6 Ιανουαρίου και μετά παρατηρήθηκαν ολοένα και χαμηλότερες θερμοκρασίες σε όλη τη χώρα, με επιδείνωση του φαινομένου από τις 7 μέχρι τις 12 Ιανουαρίου, όποτε και φαίνεται να υποχωρεί η ψυχρή εισβολή και να αυξάνονται οι θερμοκρασίες. Συνεπώς η χρονική διάρκεια του φαινομένου ήταν από τις 6 μέχρι τις 12 Ιανουαρίου με ιδιαίτερη ένταση στη βόρεια Ελλάδα όπου οι θερμοκρασίες έπεσαν στους $-10^{o}C$ ενώ παρατηρήθηκε και παγετός στην πόλη της Θεσσαλονίκης για 7 ημέρες (6-12 Ιανουαρίου), με ολικό παγετό για 5 ημέρες (7-11 Ιανουαρίου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΟΓΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Ένας πολύ χρήσιμος και ίσως ο πιο παραστατικός τρόπος να απεικονιστεί η αποτελεσματικότητα πολλών προβλέψεων ταυτόχρονα είναι το διάγραμμα Hovmöller από το οποίο είναι δυνατόν να ληφθούν συμπεράσματα για την ακρίβεια των προγνώσεων όσον αφορά την έναρξη, λήξη/διάρκεια ενός φαινομένου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό είναι η ψυχρή εισβολή που εμφανίστηκε στην Ευρώπη τον Ιανουάριο του 2017. Η απάντηση στο ερώτημα του πόσο κοντά υπήρξαν οι προβλέψεις με την πραγματικότητα είναι ο απώτερος σκοπός αυτής της έρευνας.

Στα παρακάτω διαγράμματα Hovmöller (κεφάλαιο 6.2) βλέπουμε την κλίμακα του χρόνου στον οριζόντιο άξονα στον οποίο παρουσιάζονται οι επόμενες 16 ημέρες από την ημερομηνία της πρόγνωσης και τα προγνωστικά μέλη (forecast mehPaers) στον κάθετο άξονα. Τα μέλη 2-21 έχουν τη χαμηλότερη ανάλυση και τροποποιημένες αρχικές συνθήκες ενώ το μέλος 01 έχει τις αρχικές συνθήκες των ντετερμινιστικών προγνώσεων και την ίδια χαμηλή χωρική ανάλυση με τις υπόλοιπες στοχαστικές προγνώσεις. Οι στοχαστικές προγνώσεις (Ensemble predictions) είναι για τις επόμενες 384 προγνωστικές ώρες δηλαδή για τις επόμενες 16 ημέρες και όλες ξεκινούν στις 1200 UTC.

Γνωρίζουμε από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις ότι το φαινόμενο ξεκίνησε στις 6 και έληξε στις 12 Ιανουαρίου, επομένως η χρονική περίοδος ενδιαφέροντος είναι 6 – 12 Ιανουαρίου 2017. Τα παρακάτω διαγράμματα Hovmöller αναφέρονται και απεικονίζουν την πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα στο πλησιέστερο σημείο πλέγματος στον σταθμό του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης στον οποίο, σύμφωνα με τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις των τεσσάρων σταθμών που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4, η ψυχρή εισβολή είχε την μεγαλύτερη ένταση σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τρεις. Χρησιμοποιήθηκαν προγνώσεις οι οποίες αρχικοποιήθηκαν από τις 27 Δεκεμβρίου του 2016 μέχρι τις 4 Ιανουαρίου 2017.

6.2 Μελέτη Προγνωσιμότητας Στοχαστικών Προγνώσεων

Παρατηρώντας το πρώτο διάγραμμα Hovmöller από τις 27 Δεκεμβρίου (σχήμα 6.1) φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα μοντέλα έχουν ξεκινήσει να δίνουν αρνητικές θερμοκρασίες από τις τελευταίες μέρες του Δεκεμβρίου μέχρι τις 3 Ιανουαρίου. Κάποια μέλη της στοχαστικής πρόγνωσης προβλέπουν αρνητικές θερμοκρασίες για τη περίοδο ενδιαφέροντος με θερμοκρασίες της τάξης των -2^{o}C.

Οι προγνώσεις που αρχικοποιήθηκαν στις 1200 UTC της επόμενης μέρας (28/12/16, σχήμα 6.2) εξακολουθούν να δείχνουν αρνητικές θερμοκρασίες μέχρι τις 3 Ιανουαρίου ενώ το 14^o μέλος δείχνει προγνώσεις για -6^oC τις ημέρες 8-12 Ιανουαρίου. Σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να μιλάμε για την πρόγνωση της ψυχρής εισβολής σε αυτό το στάδιο (9 ημέρες πριν την έναρξη του φαινομένου), αν και υπάρχει μια μικρή αρχική ένδειξη.

Οι προγνώσεις παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα στις 29 Δεκεμβρίου (σχήμα 6.3) καθώς εξακολουθούμε να βλέπουμε αρνητικές θερμοκρασίες μέχρι τις 3 Ιανουαρίου και αρκετές θετικές θερμοκρασίες (έως και 12^oC) μέχρι τις 13 Ιανουαρίου. Επίσης οι προβλέψεις για αρνητικές θερμοκρασίες είναι ελάχιστες έως ανύπαρκτες καθώς για την περίοδο 4-13 Ιανουαρίου υπάρχουν ελάχιστες θερμοκρασίες κοντά στους 0^oC. Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο δεν έχει καταφέρει να προβλέψει το φαινόμενο επιτυχώς ακόμα, 8 ημέρες πριν από την έναρξή του.

Βασικότατη διαφορά του διαγράμματος των προγνώσεων στις 30 Δεκεμβρίου (σχήμα 6.4) είναι, για πρώτη φορά, η εμφάνιση αρνητικών θερμοκρασιών για ένα συνεχές χρονικό διάστημα (η οποία εμφάνιση δεν γίνεται αντιληπτή σε όλα τα μέλη). Με μια πρώτη ματιά οι μετεωρολόγοι σαφώς θα υποψιάστηκαν την εκδήλωση κάποιου ψυχρού κύματος το οποίο φαίνεται στην ανωμαλία που παρουσιάζεται στις θερμοκρασίες.

Στις 30 Δεκεμβρίου, επίσης για πρώτη φορά, σύμφωνα με τις θερμοκρασίες στα 2 μέτρα, βλέπουμε μια ξεκάθαρη ένδειξη ψυχρής εισβολής και μάλιστα με απότομη μετάβαση από θετικές σε αρνητικές θερμοκρασίες στις 5 με 6 Ιανουαρίου. Αρκετά μέλη προβλέπουν την έναρξη της ψυχρής εισβολής μετά τις 6 Ιανουαρίου μέχρι μάλιστα τις 16 του μηνός. Οι θερμοκρασίες είναι της τάξης των -9^oC.

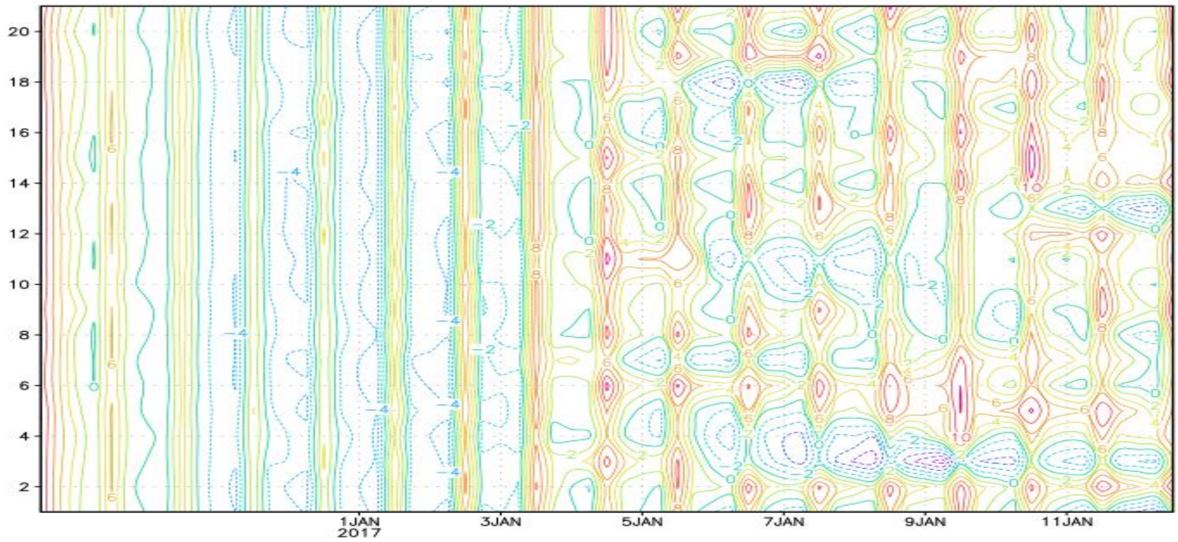
Οι προγνώσεις που αρχικοποιήθηκαν στις 31 Δεκεμβρίου (σχήμα 6.5) παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα με αυτές του προηγούμενου 24-ώρου καθώς η έναρξη της εισβολής ενδείκνυται και πάλι στις 6 του μηνός μέχρι τις 16 με ελάχιστη θερμοκρασία στους -9^oC.

Με την αλλαγή του χρόνου και μόλις 5 ημέρες πριν την έναρξη της εισβολής αρχίζει να φαίνεται όχι μόνο η αρχή αλλά και η διάρκειά της. Παρατηρούμε την άνοδο των θερμοκρασιών πάνω από τους 0^oC για σχεδόν όλα τα μέλη περίπου στις 13-14 Ιανουαρίου. Επίσης φαίνονται οι ακραίες τιμές των θερμοκρασιών οι οποίες μειώνονται μέχρι τους -12^oC. Πλέον οι μετεωρολόγοι μπορούν να είναι σίγουροι για την ψυχρή εισβολή καθώς τα δεδομένα τις $1^{ης}$ Ιανουαρίου επιβεβαιώνουν την ανωμαλία που ξεκίνησε να φαίνεται από τις 30 Δεκεμβρίου. Τα δεδομένα των επόμενων 24-ωρων θα είναι καθοριστικά για τον προσδιορισμό της διάρκειας της ψυχρής εισβολής.

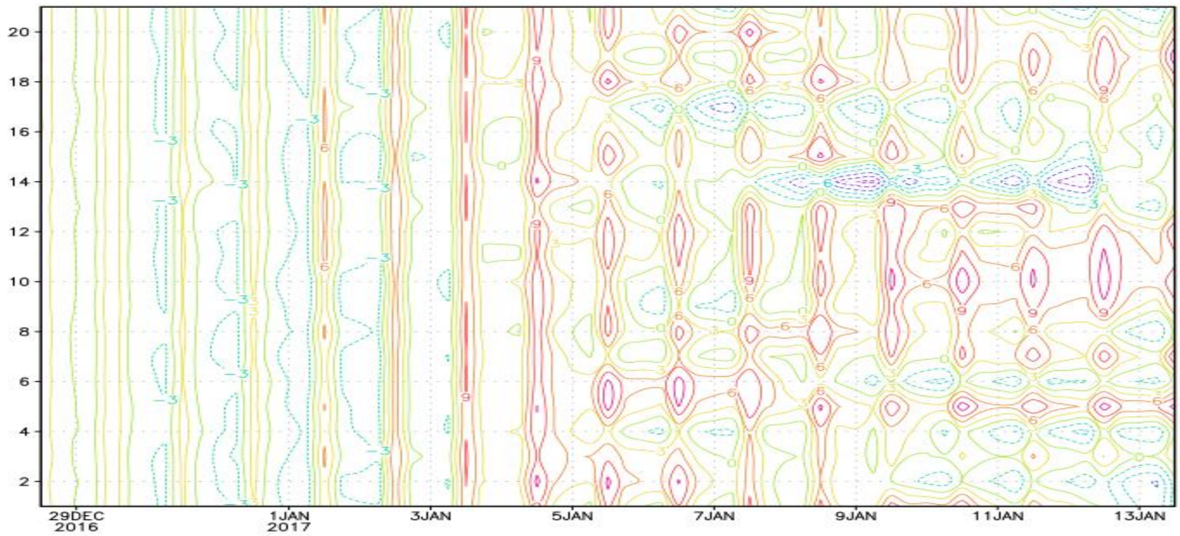
Η ημερομηνία έναρξης της ψυχρής εισβολής έχει παγιωθεί στις 6 Ιανουαρίου όπως δείχνουν τα διαγράμματα Hovmöller που αρχικοποιήθηκαν στις 2 του μηνός, 1200 UTC (σχήμα 6.7). Η λήξη του φαινομένου ακόμα φαίνεται να μην έχει συγκεκριμένη ημερομηνία στην πρόγνωση της 2 Ιανουαρίου αν και μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι είναι πριν τις 15 Ιανουαρίου καθώς οι θερμοκρασίες για τα περισσότερα μέλη είναι άνω του μηδενός μετά από αυτή την ημέρα. Οι ακραίες τιμές των θερμοκρασιών συνεχίζονται (της τάξης των -12^{o}C), μετά τις 6 Ιανουαρίου και δείχνουν να αυξάνονται σταδιακά μετά τις 11-12 Ιανουαρίου αν και κάποια μέλη εξακολουθούν να δείχνουν αρνητικές θερμοκρασίες ακόμα και μετά τις 15 του μηνός.

Φτάνοντας στα δεδομένα των προγνώσεων της 3^{ης} Ιανουαρίου (σχήμα 6.8), μόλις 3 ημέρες πριν από την έναρξη του φαινομένου, βλέπουμε εντελώς ξεκάθαρα όλες τις παραμέτρους της εισβολής: η έναρξη του φαινομένου είναι στις 6 Ιανουαρίου (όπως έχει επιβεβαιωθεί και από τις προγνώσεις των προηγούμενων ημερών), καθώς οι θερμοκρασίες μειώνονται απότομα από τους 9^{o}C στους -3^{o}C σε διάστημα λίγων ωρών. Η λήξη του φαινομένου γίνεται αντιληπτή από την αύξηση της θερμοκρασίας από τους -3 στους 0^{o}C και την επακόλουθη, συνεχόμενη άνοδό της από τις 12 Ιανουαρίου και μετά. Συνεπώς, σύμφωνα με τις προγνώσεις και τα διαγράμματα Hovmöller, η διάρκεια της ψυχρής εισβολής ήταν από την Παρασκευή 6 Ιανουαρίου μέχρι την Πέμπτη 12 Ιανουαρίου 2017 (6 ημέρες).

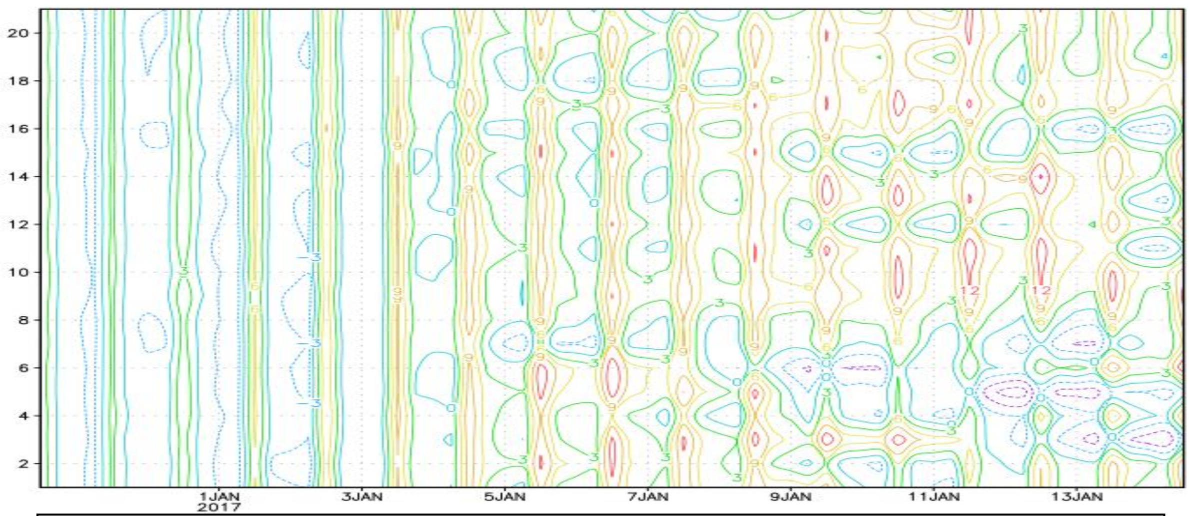
Φτάνοντας στο τέλος της ανάλυσης των προγνώσεων συμπεριλαμβάνουμε και τα δεδομένα 2 ημέρες πριν την έναρξη, στις 4 Ιανουαρίου, (και 8 ημερών πριν την λήξη) της εισβολής (σχήμα 6.9). Πέρα από την προφανή ψυχρή εισβολή, τα δεδομένα των θερμοκρασιών μετά τις 12 Ιανουαρίου επιβεβαιώνουν και πάλι την λήξη του φαινομένου καθώς για όλα τα μέλη οι θερμοκρασίες είναι ίσες ή άνω του μηδενός. Παρά την χαμηλή χωρική ανάλυση (34 km που είναι διαθέσιμα ανά μία μοίρα), η ένταση του φαινομένου φάνηκε αλλά υπερεκτιμήθηκε καθώς το μοντέλο έδωσε θερμοκρασίες έως και -12^{o}C.



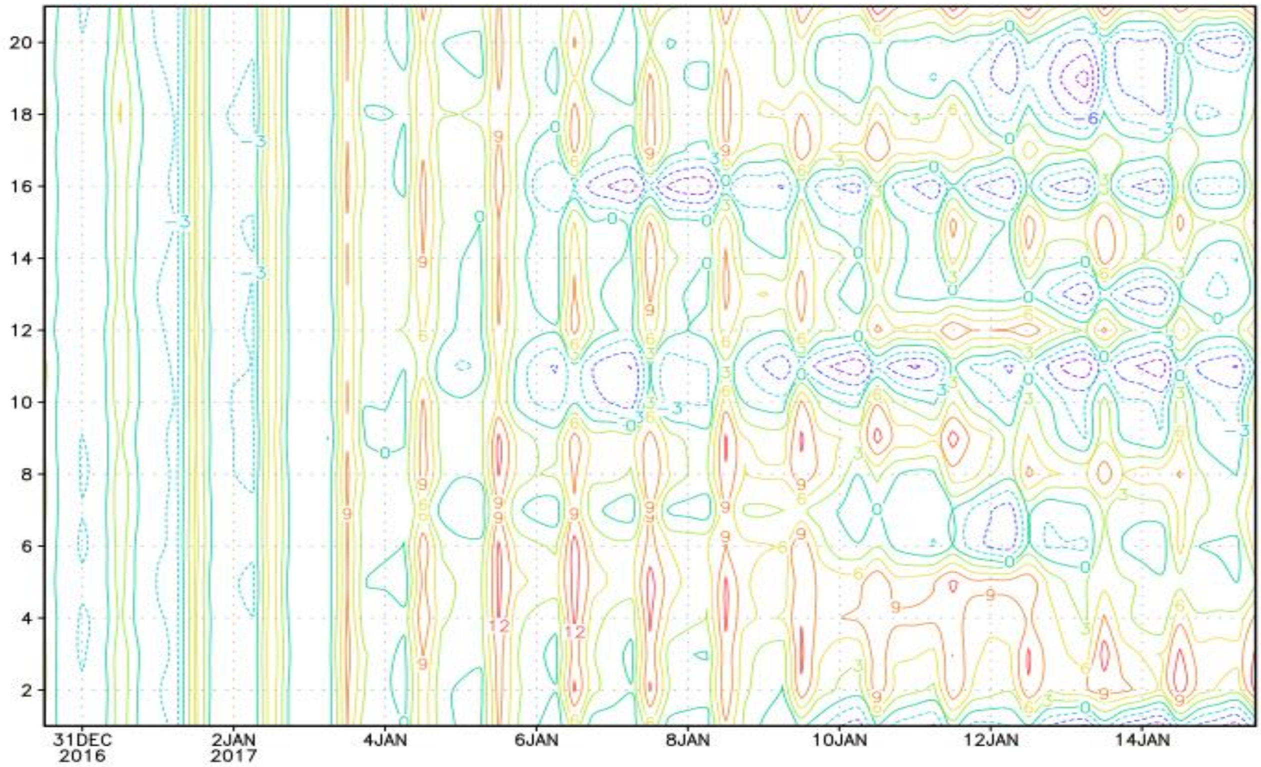
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα Hovmöller με τις στοχαστικές προγνώσεις της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα από το GEFS για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης που αρχικοποιήθηκαν στις 1200 UTC 27/12/16. Στην τεταγμένη εμφανίζονται τα 21 μέλη της συνολικής πρόγνωσης.



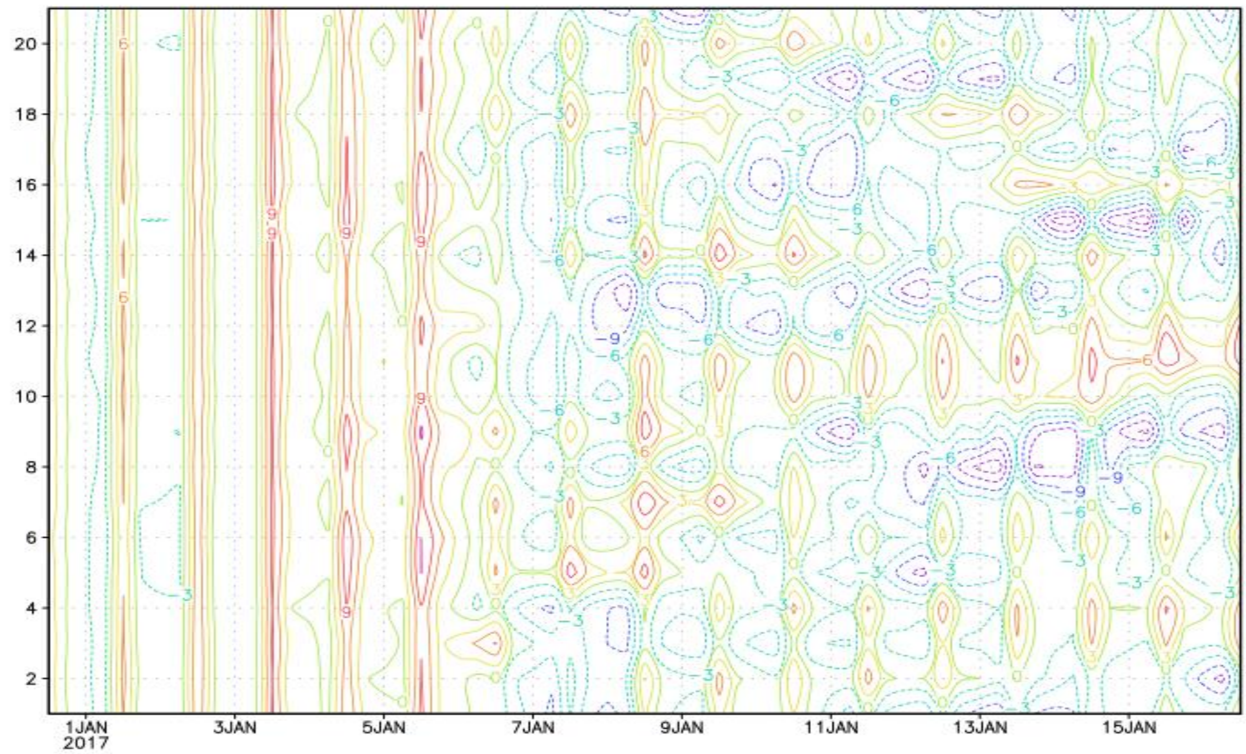
Σχήμα 6.2: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 28/12/16.



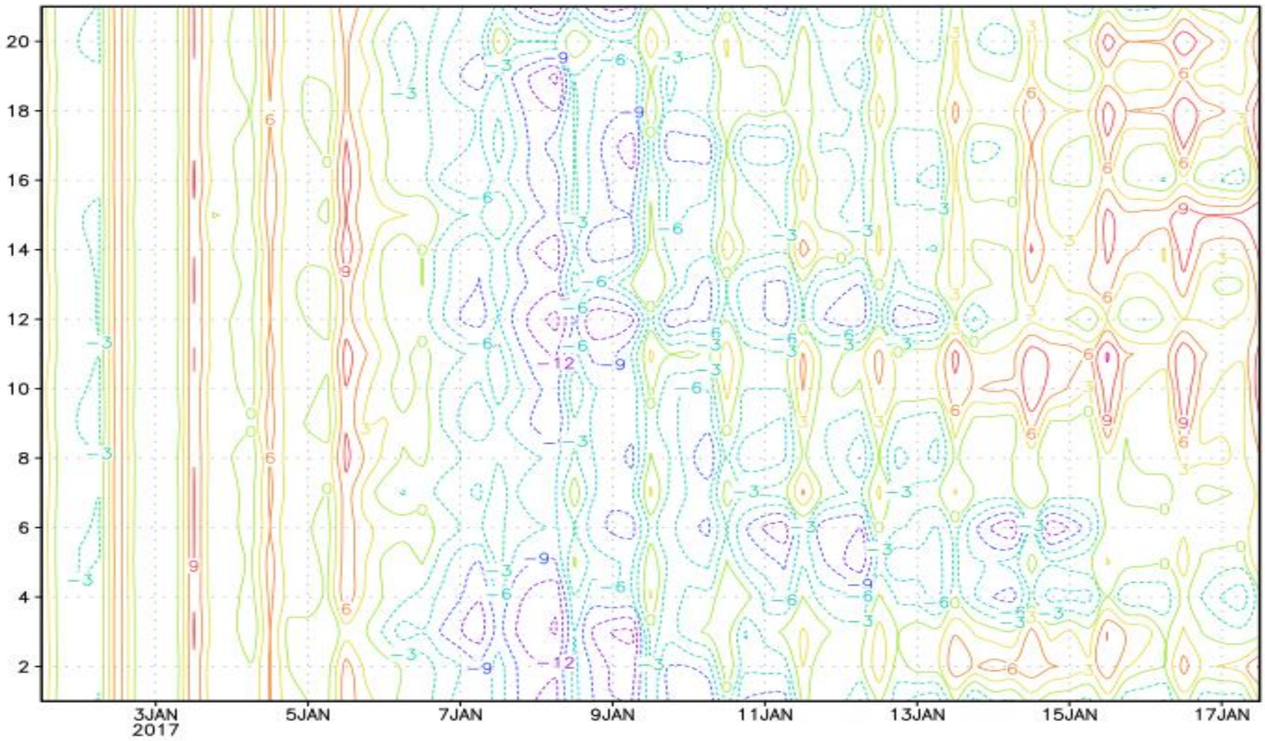
Σχήμα 6.3: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 29/12/16.



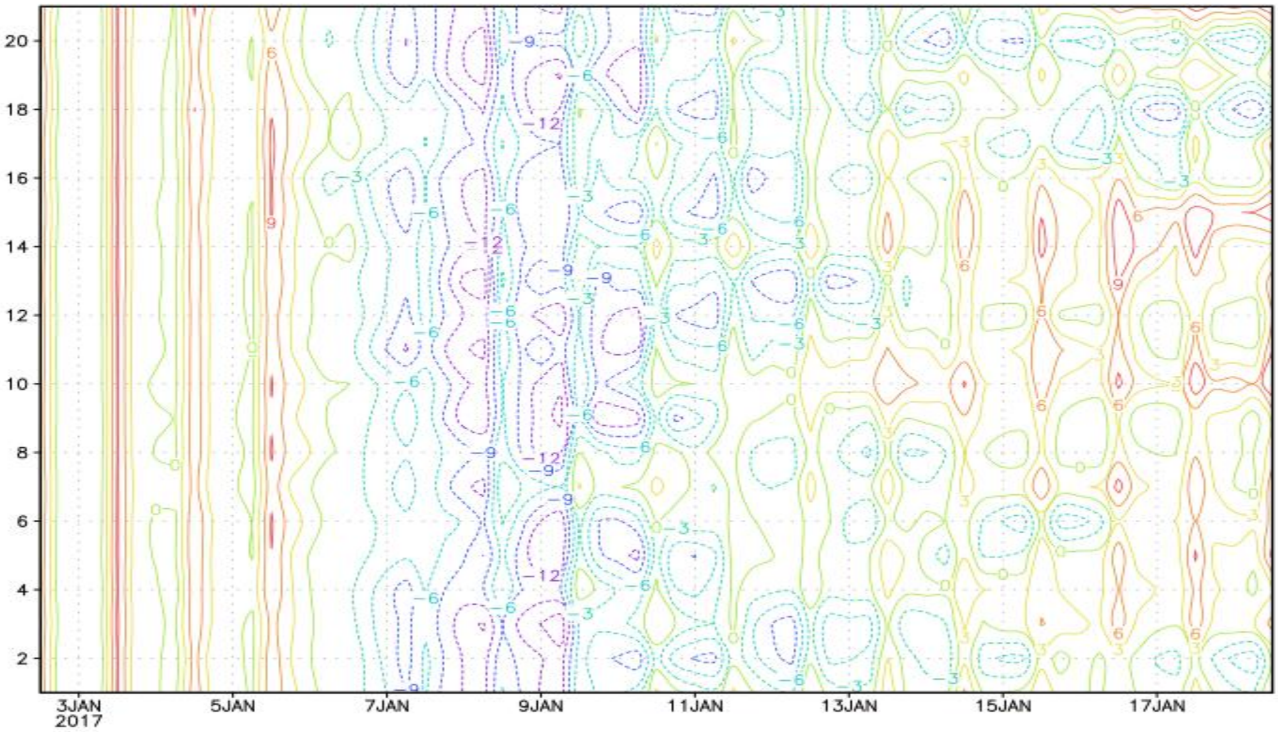
Σχήμα 6.4: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 30/12/16.



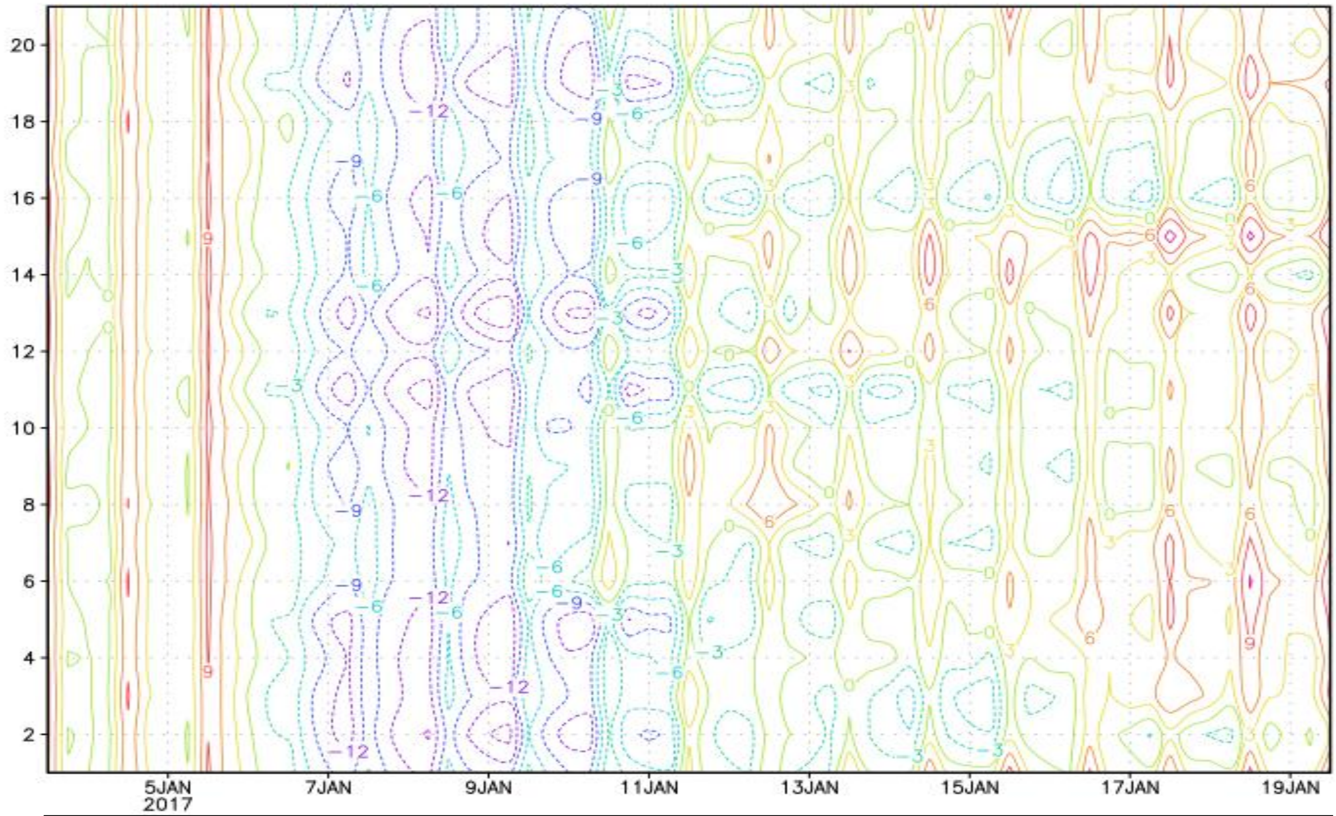
Σχήμα 6.5: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 31/12/16.



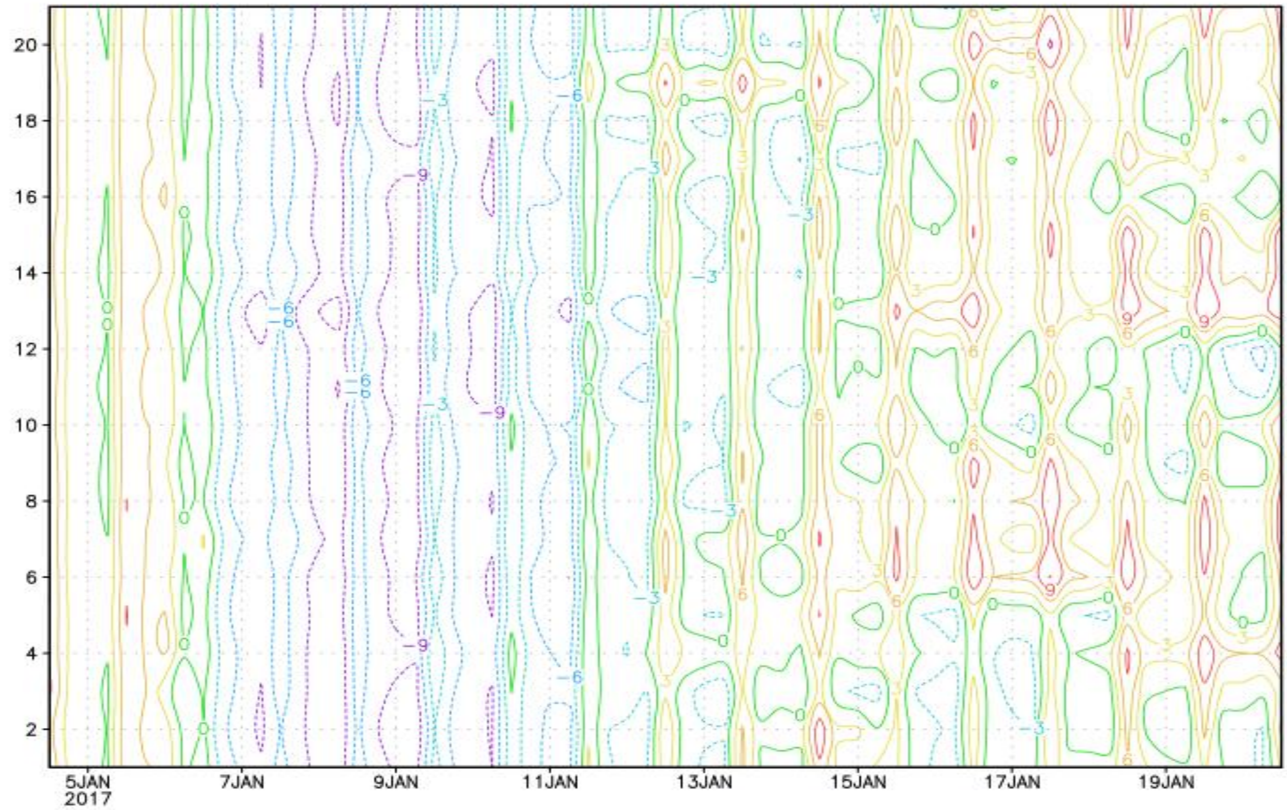
Σχήμα 6.6: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 01/01/17.



Σχήμα 6.7: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 02/01/17.



Σχήμα 6.8: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 03/01/17.

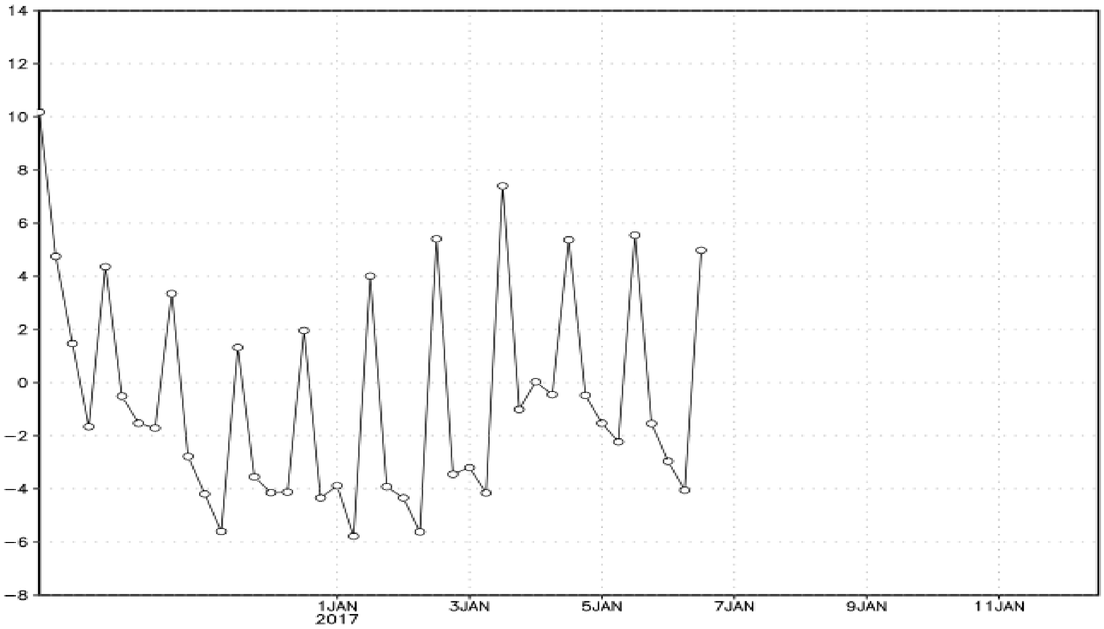


Σχήμα 6.9: Όπως στο σχήμα 6.1 αλλά από τις 04/01/17.

6.3 Μελέτη Προγνωσιμότητας Ντετερμινιστικών Προγνώσεων

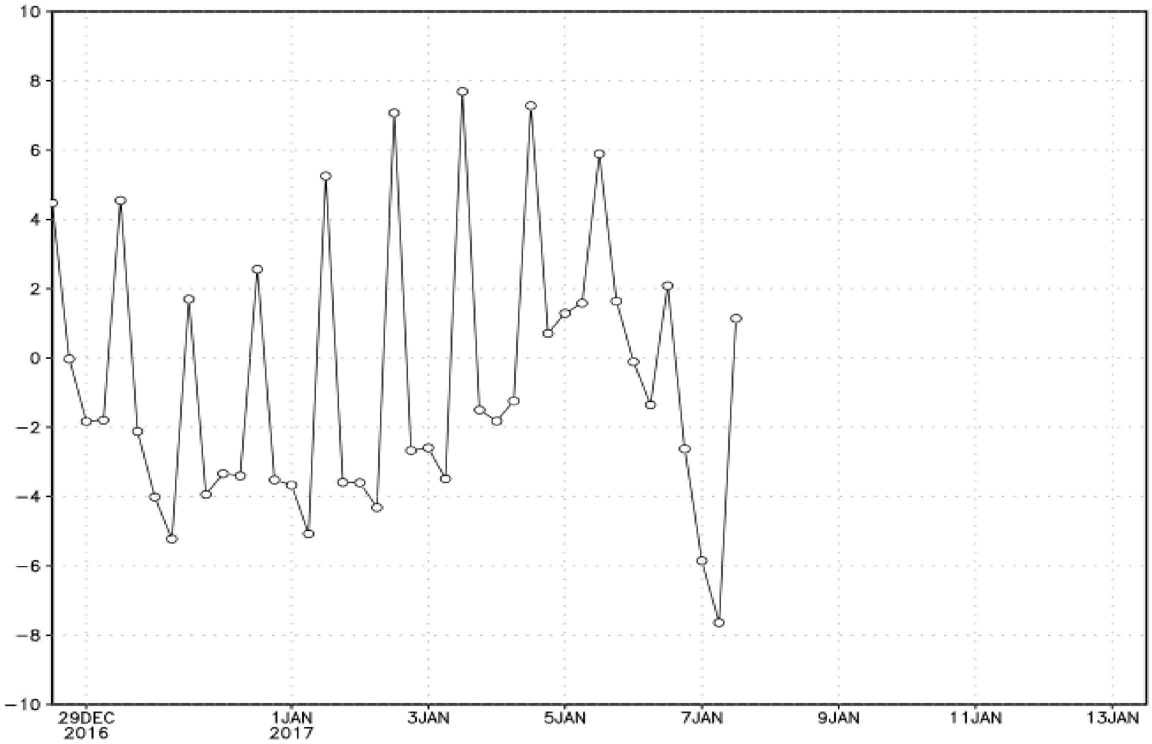
Στις παρακάτω παραγράφους θα περιγραφτούν οι ντετερμινιστικές προγνώσεις οι οποίες παρέχουν μετρήσεις της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα για τις επόμενες 16 ημέρες από την ημέρα της πρόγνωσης και πραγματοποιήθηκαν από τις 27 Δεκεμβρίου μέχρι τις 5 Ιανουαρίου. Οι ντετερμινιστικές προγνώσεις έχουν τις βέλτιστες αρχικές συνθήκες (ανάλυση) με οριζόντια διακριτοποίηση 13 km και 34 km για προγνωστικό ορίζοντα 0-10 και 10-16 ημερών, αντίστοιχα. Επίσης, όλες οι προγνώσεις που παρατίθενται παρακάτω είναι για τον μετεωρολογικό σταθμό του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης (όπως και οι στοχαστικές) επειδή η ψυχρή εισβολή ήταν εντονότερη στα βόρεια της χώρας.

Ξεκινώντας από την πρόγνωση της 27ης Δεκεμβρίου παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ακόμα κάποια ανωμαλία στις τιμές της θερμοκρασίας για την χρονική περίοδο ενδιαφέροντος, ούτε φαίνεται η έναρξη της εισβολής στις 6 του μηνός, παρ'όλα αυτά παρατηρείται μια μείωση των ελαχίστων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας κάτω από τους 0^oC από την 31η Δεκεμβρίου η οποία μάλιστα συνεχίζεται μέχρι τις 7 Ιανουαρίου (σχήμα 6.10).



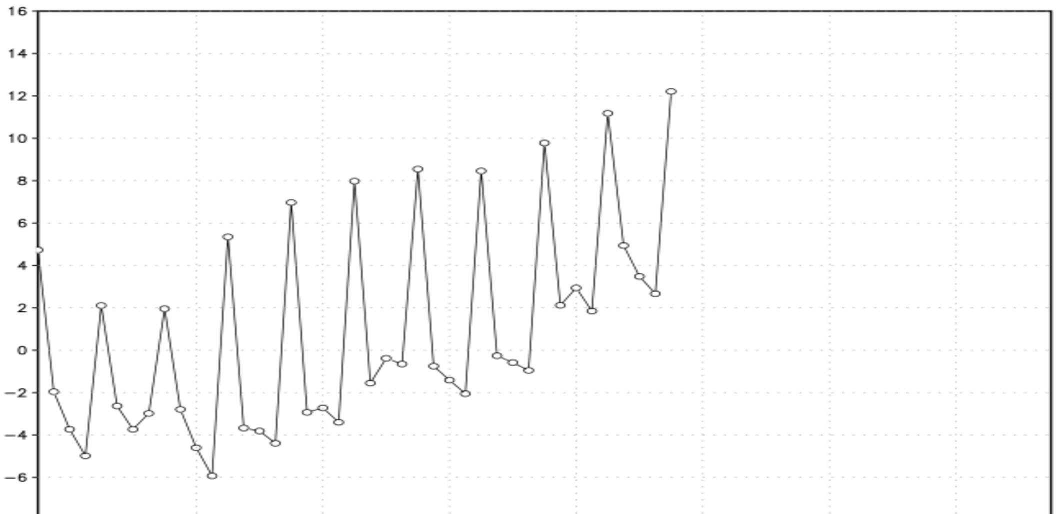
Σχήμα 6.10: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 27/12/16 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

Στην ντετερμινιστική πρόγνωση της 28ης Δεκεμβρίου (9 ημέρες πριν την έναρξη της εισβολής) έχουμε την πρώτη ένδειξη για την έναρξη και την ένταση της εισβολής καθώς βλέπουμε την ξαφνική πτώση της θερμοκρασίας περίπου στους -8^{o}C στις 7 Ιανουαρίου (σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 28/12/16 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

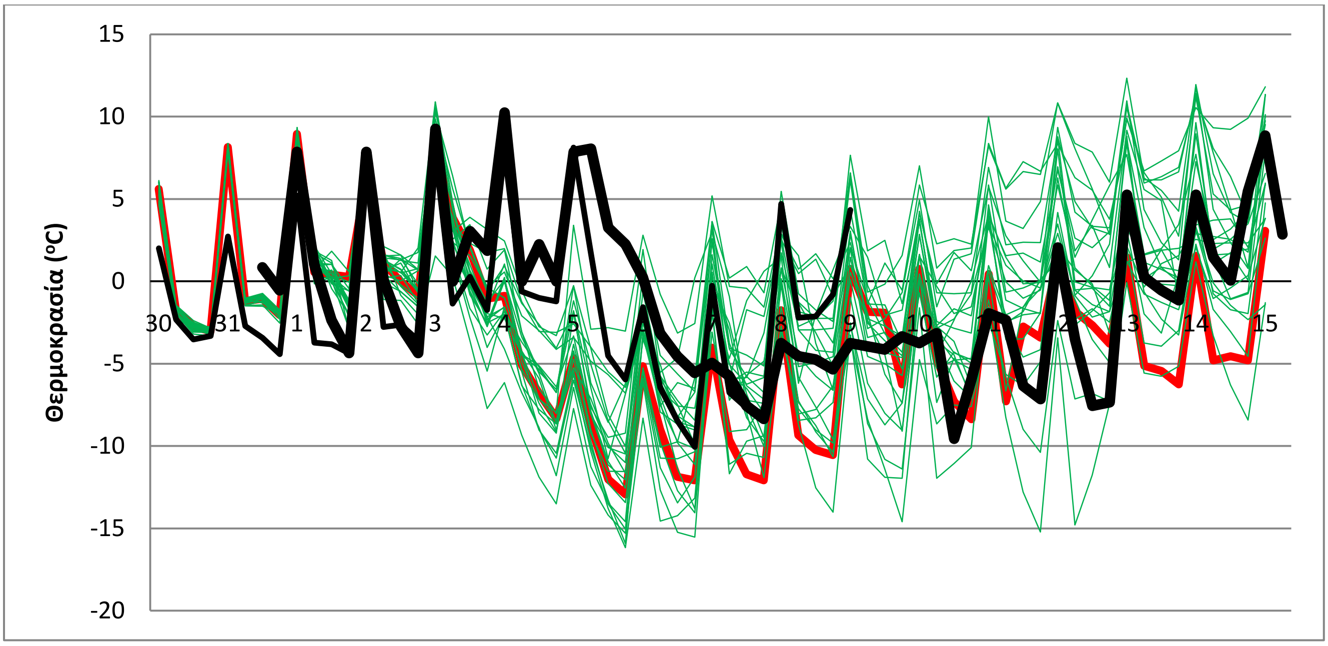
Η πρόγνωση της 29ης Δεκεμβρίου φαίνεται να μην ‘βλέπει’ την ψυχρή εισβολή καθώς όλες οι τιμές της θερμοκρασίας αυξάνονται σταδιακά, μέχρι την



Σχήμα 6.12: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 29/12/16 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

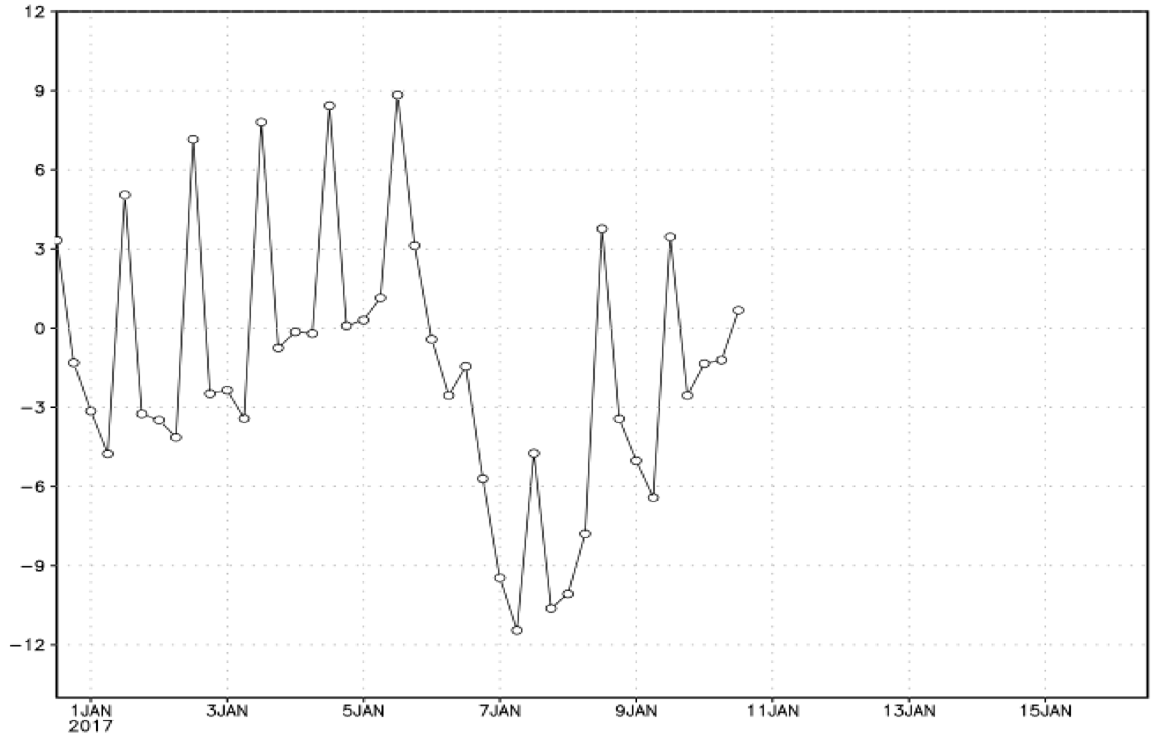
μέγιστη τιμή των 12°C, από την 1η μέχρι την τελευταία μέρα της πρόγνωσης στις 9 Ιανουαρίου (σχήμα 6.12). Παρ'όλα αυτά οι θερμοκρασίες για τη χρονική περίοδο 30 Δεκεμβρίου – 6 Ιανουαρίου παραμένουν κάτω από το 0°C, τουλάχιστον για τη διάρκεια της νύχτας, και φτάνουν τιμές έως και -6°C.

Στις 30 Δεκεμβρίου υπάρχει η πρώτη ξεκάθαρη εικόνα ψυχρής εισβολής με την έναρξή της στις 6 Ιανουαρίου φτάνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία των -10°C στις 7 Ιανουαρίου (σχήμα 6.13, λεπτή μαύρη γραμμή). Οι θερμοκρασίες αρχίζουν την άνοδό τους στις 9 του μηνός παραμένοντας όμως κάτω από τους 0°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ήδη μία εβδομάδα πριν την έναρξη του φαινομένου οι ντετερμινιστκές προγνώσεις από τις 28 και 30 Δεκεμβρίου προβλέπουν την έναρξη της εισβολής στις 6 Ιανουαρίου. Στο σχήμα 6.13 βλέπουμε την σύγκριση της ντετερμινιστικής πρόγνωσης (λεπτή μαύρη γραμμή) που αρχικοποιήθηκε στις 30 Δεκεμβρίου σε σχέση με τις παρατηρήσεις (χοντρή μαύρη γραμμή), όπως επίσης και σε σχέση με το 1° μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης (κόκκινη γραμμή) και τα υπόλοιπα μέλη (2-21, πράσινες γραμμές). Βλέπουμε ότι οι παρατηρήσεις βρίσκονται σε γενικές γραμμές ανάμεσα από τη ντετερμινιστική και το 1° μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης. Η ντετερμινιστική φαίνεται να προσεγγίζει τις πραγματικές τιμές ελαφρώς καλύτερα στις 7 και 8 του μηνός ενώ το 1° μέλος της στοχαστικής φαίνεται να ταυτίζεται περισσότερο με τις παρατηρήσεις από τις 5 μέχρι τις 7 Ιανουαρίου. Επίσης παρατηρούμε την σωστή πρόγνωση της ψυχρής εισβολής (σε γενικό πάντα πλαίσιο) από την ντετερμινιστική και από όλα τα μέλη της στοχαστικής πρόγνωσης στις 6 Ιανουαρίου.



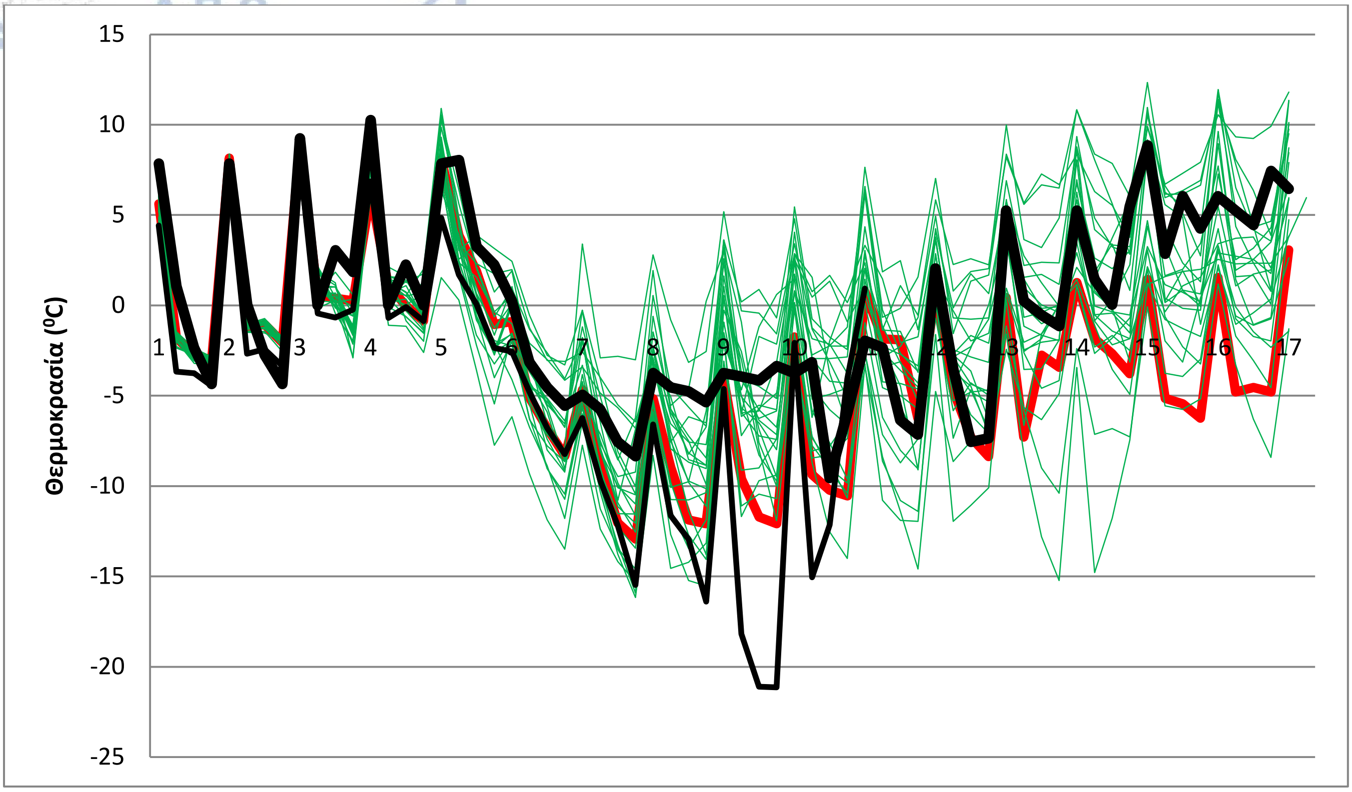
Σχήμα 6.13: Σύγκριση της ντετερμινιστικής και στοχαστικής πρόγνωσης οι οποίες αρχικοποιήθηκαν στις 1200 UTC 30/12/16 σε σχέση με τις παρατηρήσεις από το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1-9 Ιανουαρίου 2017. α) Χοντρή μαύρη γραμμή: παρατηρήσεις, β) Λεπτή μαύρη γραμμή: ντετερμινιστική πρόγνωση, γ) Κόκκινη γραμμή: 1ο μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης, δ) Πράσινες γραμμές: μέλη 2-21 στοχαστικής πρόγνωσης. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος.

Η στοχαστική πρόγνωση της 31^{ης} Δεκεμβρίου δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από αυτήν του προηγούμενου 24-ώρου, καθώς η έναρξη της ψυχρής εισβολής προβλέπεται και πάλι στις 6 Ιανουαρίου ενώ η λήξη της στις 10-11 Ιανουαρίου. Η έντασή της όμως είναι ισχυρότερη και πάλι στις 7 Ιανουαρίου (η οποία δείχνει να είναι η μέρα με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες σύμφωνα με τις προγνώσεις της 28^{ης} και 30^{ης} Δεκεμβρίου) με την θερμοκρασία να φτάνει τους -11^{o}C. Στη συνέχεια οι θερμοκρασίες αυξάνονται και πάλι με ένα τοπικό ελάχιστο (-6^{o}C) στις 9 Ιανουαρίου (σχήμα 6.14).



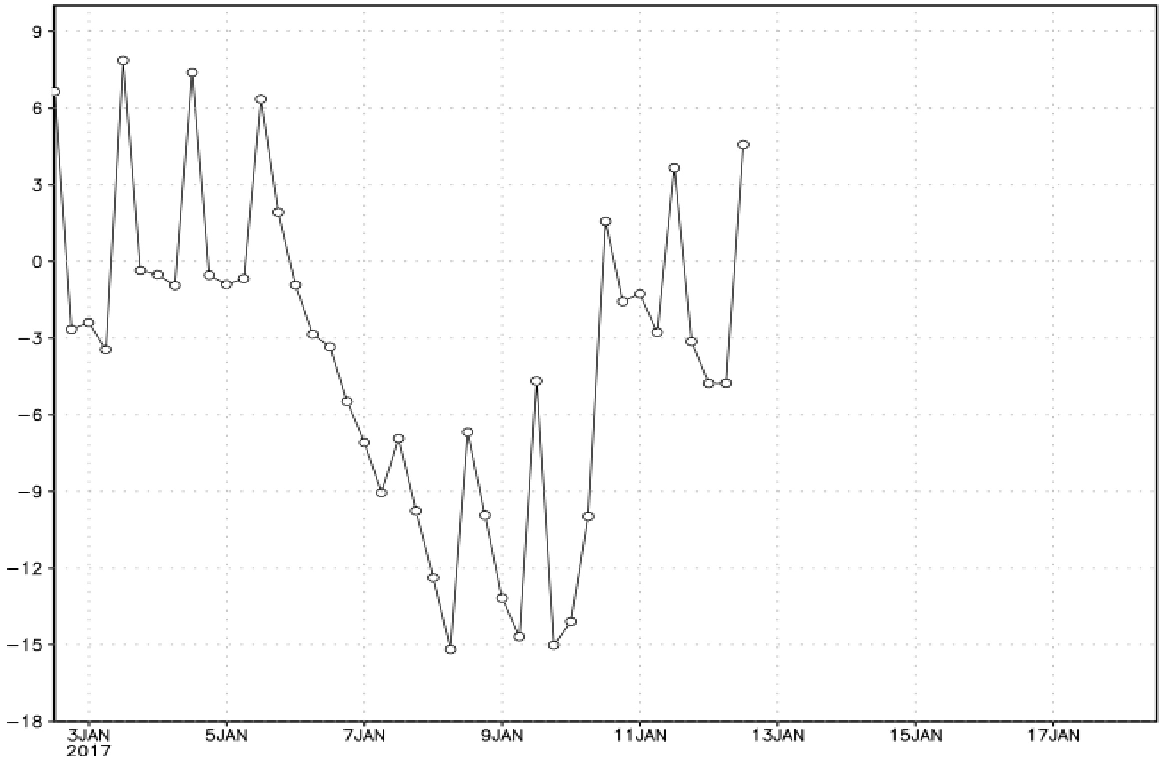
Σχήμα 6.14: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 30/12/16 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

Στην πρόγνωση της 1^{ης} Ιανουαρίου φαίνεται μια περισσότερο σταδιακή μείωση των θερμοκρασιών από τις 5 Ιανουαρίου κιόλας (λεπτή μαύρη γραμμή, σχήμα 6.15), μέχρι την ελάχιστη τιμή των -21^{o}C περίπου, στις 10 Ιανουαρίου (σχήμα 6.15). Εδώ σαφώς βλέπουμε μια υπερεκτίμηση της έντασης της εισβολής καθώς η ελάχιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε στα 2 μέτρα στο σταθμό της Θεσσαλονίκης (χοντρή μαύρη γραμμή, σχήμα 6.15) ήταν -9,95^{o}C όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η άνοδος των θερμοκρασιών παρατηρείται από τις 12 Ιανουαρίου. Αν παρατηρήσουμε τις πραγματικές τιμές σε σύγκριση με την ντετερμινιστική πρόγνωση βλέπουμε ότι υπάρχει απόκλιση των δύο μετά τις 5 του μηνός. Επίσης βλέπουμε ότι η χρονική περίοδος 6-12 Ιανουαρίου χαρακτηρίζεται από ολικό παγετό κάτι εξαιρετικά ακριβές και κοντά στις πραγματικές μετρήσεις του σταθμού της Θεσσαλονίκης αλλά με μια σαφή υπερεκτίμηση της έντασης του φαινομένου από την ντετερμινιστική πρόγνωση αλλά και από τις στοχαστικές προγνώσεις (κόκκινη και πράσινες γραμμές). Σε γενικές γραμμές βλέπουμε ότι οι στοχαστικές και η ντετερμινιστική πρόγνωση (κυρίως) υπερεκτίμησαν την ένταση της ψυχρής εισβολής αλλά προέβλεψαν με μεγάλη ακρίβεια την χρονική διάρκεια του ολικού παγετού που επικράτησε την περίοδο 7-11 Ιανουαρίου.



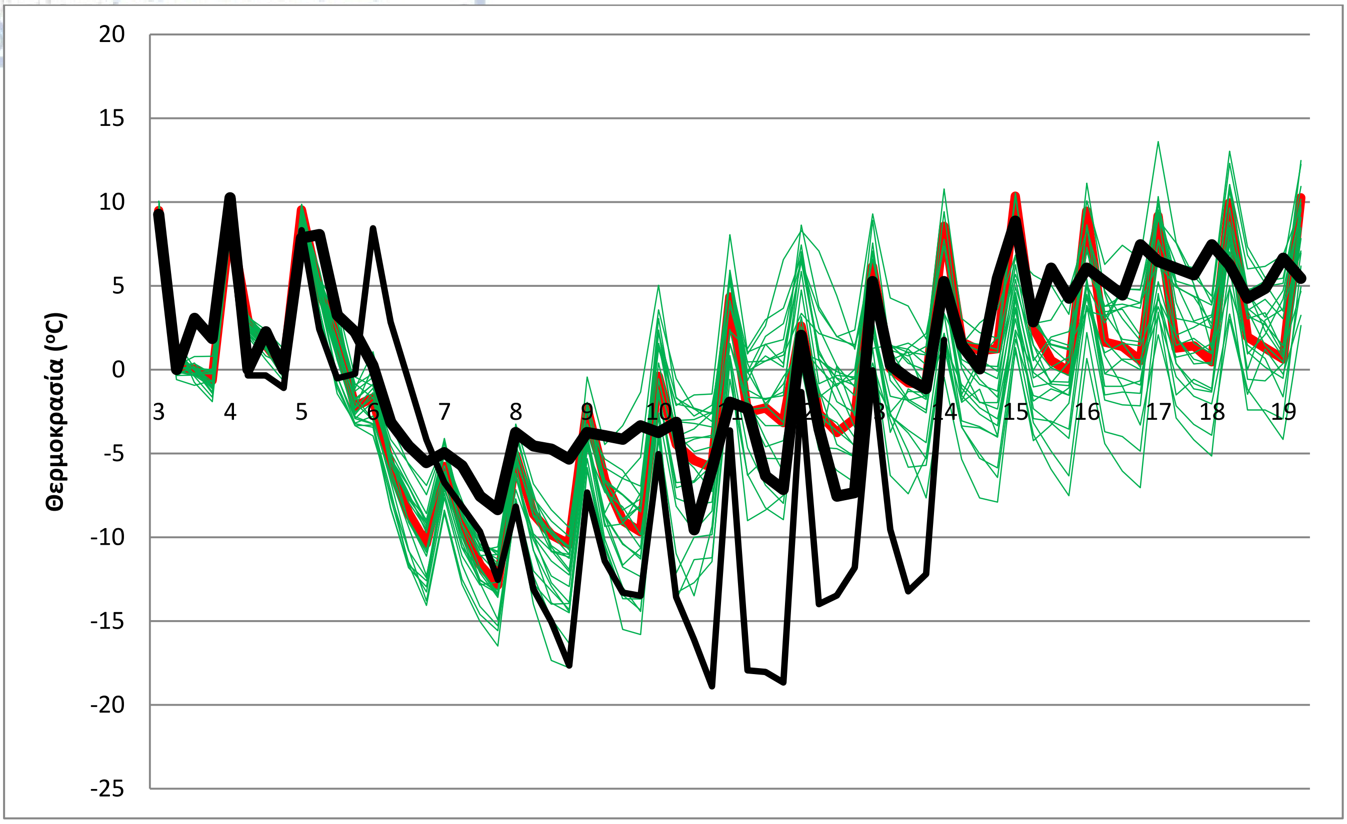
Σχήμα 6.15: Σύγκριση της ντετερμινιστικής και στοχαστικής πρόγνωσης οι οποίες αρχικοποιήθηκαν στις 1200 UTC 01/01/17 σε σχέση με τις παρατηρήσεις από τον σταθμό της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1-11 Ιανουαρίου 2017. α) Χοντρή μαύρη γραμμή: παρατηρήσεις, β) Λεπτή μαύρη γραμμή: ντετερμινιστική πρόγνωση, γ) Κόκκινη γραμμή: 1ο μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης, δ) Πράσινες γραμμές: μέλη 2-21 στοχαστικής πρόγνωσης. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος.

Η πρόγνωση του επόμενου 24-ώρου δείχνει ακόμα πιο ξεκάθαρα όλες τις παραμέτρους της ψυχρής εισβολής. Παρατηρούμε την έναρξή της στις 6 Ιανουαρίου (πλέον η ημερομηνία 06/01 έχει σταθεροποιηθεί ως η έναρξη του φαινομένου ήδη από τις 30 Δεκεμβρίου και απλώς συνεχίζει να επιβεβαιώνεται από τις επόμενες προγνώσεις) και την λήξη της στις 12-13 Ιανουαρίου. Οι θερμοκρασίες παραμένουν κάτω από τους 0^{o}C εκείνες τις ημέρες (-5^{o}C) αλλά παρουσιάζουν τουλάχιστον 10 βαθμούς διαφορά από το προβλεπόμενο ελάχιστο των -15^{o}C κατά το χρονικό διάστημα 8-10 Ιανουαρίου. Επίσης παρατηρούμε ακόμα μια υπερεκτίμηση ως προς την ένταση της εισβολής από το ντετερμινιστικό μοντέλο (σχήμα 6.16).



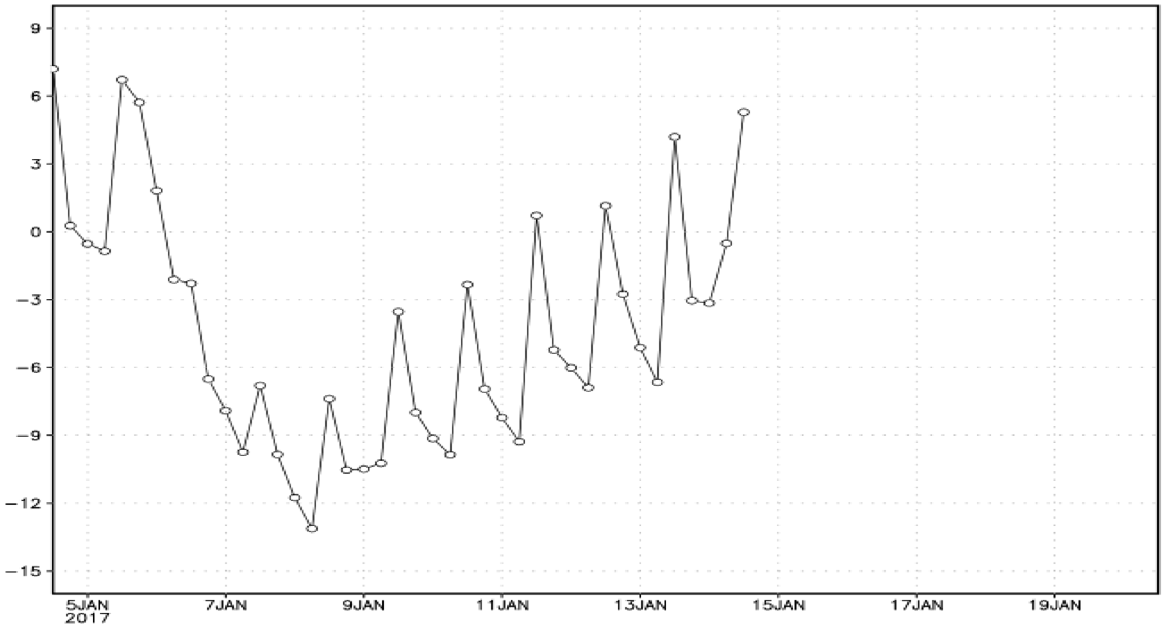
Σχήμα 6.16: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 02/01/17 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

Φτάνοντας στην πρόγνωση της 3ης Ιανουαρίου, 3 ημέρες πριν την έναρξη του φαινομένου) πλέον θέλουμε να δούμε την εκτίμηση της διάρκειας του φαινομένου (η έναρξη είναι ξεκάθαρη στις 6 του μηνός) η οποία σε αντίθεση με την πρόγνωση του προηγούμενου 24-ώρου δεν φαίνεται να την εκτιμά σε πολύ μεγάλο βαθμό. Παρατηρείται μια συνεχής άνοδος των τιμών της θερμοκρασίας από τις 10 Ιανουαρίου μέχρι και την τελευταία μέρα της πρόγνωσης στις 19 Ιανουαρίου (λεπτή μαύρη γραμμή, σχήμα 6.17) και οι θερμοκρασίες δείχνουν να ανέρχονται πάνω από τους 0^{o}C στις 14 Ιανουαρίου. Επίσης στο διάστημα 10-11 Ιανουαρίου προβλέπονται εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (-19^{o}C) οι οποίες απέχουν περίπου 10 βαθμούς από τις πραγματικές μετρήσεις όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (με την χοντρή μαύρη γραμμή απεικονίζονται οι παρατηρήσεις του σταθμού Θεσσαλονίκης). Το χαρακτηριστικό του ολικού παγετού για το χρονικό διάστημα 6-12 Ιανουαρίου όμως είναι βέβαιο και επιβεβαιώνεται από την συγκεκριμένη και από όλες τις επόμενες προγνώσεις. Αν δούμε την γενική εικόνα του σχήματος 6.17 παρατηρούμε ότι η ντετερμινιστική πρόγνωση έχει υπερεκτιμήσει και πάλι την ένταση της ψυχρής εισβολής, ενώ προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τις θερμοκρασίες στο διάστημα 3-6 Ιανουαρίου μετά το οποίο φαίνεται να αποτυγχάνει στην ακριβή πρόγνωση της έντασης του φαινομένου. Το 1ο μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις πραγματικές τιμές για το διάστημα 12-15 ενώ για το διάστημα 6-10 του μηνός αποκλίνει χαμηλότερα από τις μετρήσεις αλλά σε μικρότερο βαθμό από τη ντετερμινιστική πρόγνωση.



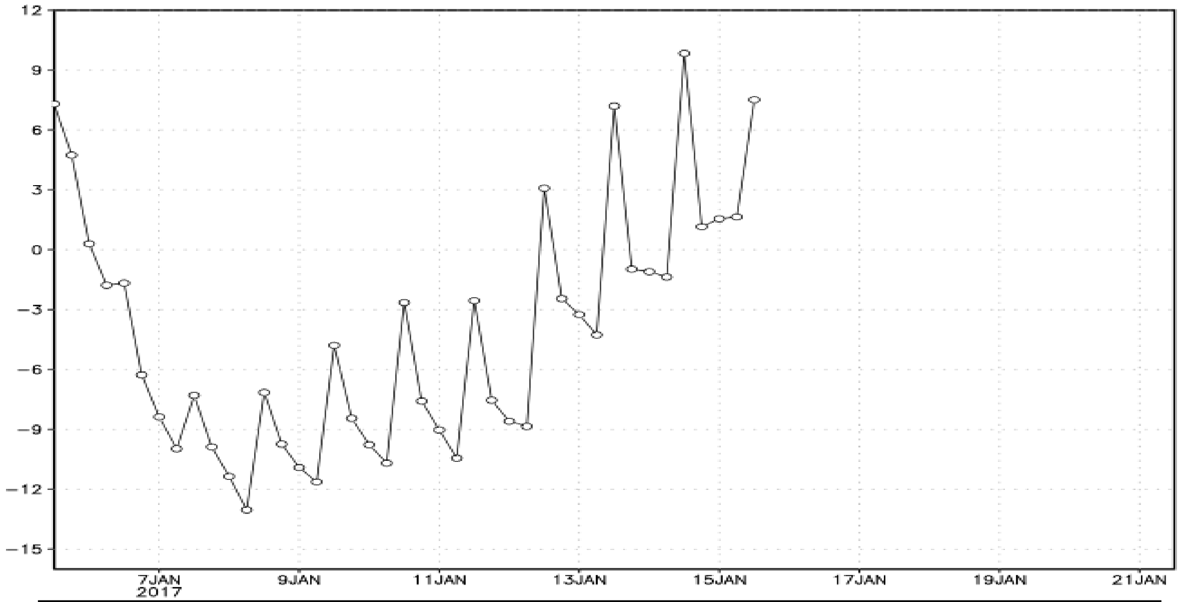
Σχήμα 6.17: Σύγκριση της ντετερμινιστικής και στοχαστικής πρόγνωσης οι οποίες αρχικοποιήθηκαν στις 1200 UTC 03/01/17 σε σχέση με τις παρατηρήσεις από τον σταθμό της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 3-19 Ιανουαρίου 2017. α) Χοντρή μαύρη γραμμή: παρατηρήσεις, β) Λεπτή μαύρη γραμμή: ντετερμινιστική πρόγνωση, γ) Κόκκινη γραμμή: 1ο μέλος της στοχαστικής πρόγνωσης, δ) Πράσινες γραμμές: μέλη 2-21 στοχαστικής πρόγνωσης. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος.

Στην πρόγνωση που πραγματοποιήθηκε στις 4 Ιανουαρίου εξακολουθούμε να βλέπουμε την λήξη του ολικού παγετού στις 12 Ιανουαρίου με τις θερμοκρασίες να ανέρχονται μέχρι τους 5^{o}C στις 14 Ιανουαρίου (σχήμα 6.18). Η ελάχιστη θερμοκρασία που αναμένεται είναι περίπου -13^{o}C. Πλέον είναι ξεκάθαρη η λήξη του ολικού παγετού (και της ψυχρής εισβολής) στις 12 Ιανουαρίου (8 ημέρες πριν από τη λήξη της).



Σχήμα 6.18: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 04/01/17 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

Φτάνοντας στην τελευταία ντετερμινιστική πρόγνωση της 5^{ης} Ιανουαρίου επιβεβαιώνεται η λήξη του παγετού και πάλι στις 12 του μηνός με τις θερμοκρασίες μάλιστα να ανέρχονται μέχρι τους 10^{o}C (σχήμα 6.19). Υπάρχει ακόμα μια μικρή



Σχήμα 6.19: Ντετερμινιστική πρόγνωση της θερμοκρασίας στα 2 μέτρα η οποία αρχικοποιήθηκε στις 1200 UTC 05/01/17 για το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης.

υπερεκτίμηση της έντασής της καθώς η ελάχιστη θερμοκρασία που προβλέπεται φτάνει τους -13^{o}C.

6.4 Σύνοψη

Όσον αφορά τις στοχαστικές προγνώσεις, η πρώτη ένδειξη για την εκδήλωση ψυχρής εισβολής στις αρχές του Ιανουαρίου 2017 φάνηκε στις 30 Δεκεμβρίου 2016 με αρκετά μέλη να απεικονίζουν θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν για το συνεχόμενο χρονικό διάστημα 6-14 Ιανουαρίου. Με βάση το διάγραμμα της 29^{ης} Δεκεμβρίου στο οποίο δεν υπάρχει ξεκάθαρη ανωμαλία των θερμοκρασιών και της 31^{ης} Δεκεμβρίου στο οποίο φαίνεται προφανέστατα, μπορούμε να πούμε ότι η πρώτη υποψία του φαινομένου εκδηλώθηκε στις 30 του μηνός ακριβώς μια εβδομάδα πριν την έναρξή του.

Από τις 31 Δεκεμβρίου μέχρι τις 2 Ιανουαρίου οι προγνώσεις προσέγγιζαν την ημερομηνία έναρξης του φαινομένου στις 6 του μηνός ενώ η λήξη (και η διάρκεια) ήταν ακόμα αμφιλεγόμενη, αν και ήταν βέβαιο ότι δεν θα κρατούσε πάνω από 10 ημέρες λόγω της ένδειξης θετικών θερμοκρασιών μετά τις 15 Ιανουαρίου.

Στις 3 Ιανουαρίου, 3 ημέρες πριν την εισβολή οι μετεωρολόγοι ήταν σε θέση να προβλέψουν με ακρίβεια και τη λήξη της εισβολής στις 12 Ιανουαρίου, δηλαδή 9 ημέρες πριν, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και στις προγνώσεις της 4^{ης} Ιανουαρίου. Με βάση αυτή την επιβεβαίωση κρίθηκε απαραίτητη η διακοπή της μελέτης παραπάνω προγνώσεων καθώς οι 3 βασικές παράμετροι της εισβολής, έναρξη (06/01), διάρκεια (6 ημέρες) και ένταση (έως και -12^{o}C) είχαν ήδη προσδιοριστεί με ακρίβεια. Σημειώνεται επίσης ότι τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από τις μετεωρολογικές παρατηρήσεις των 4 σταθμών που μελετήθηκαν στο 4^{o} κεφάλαιο.

Για τις ντετερμινιστικές προγνώσεις, η πρώτη ένδειξη για ψυχρή εισβολή στις αρχές του Ιανουαρίου του ήταν στις 28 Δεκεμβρίου (9 ημέρες πριν από την έναρξη της εισβολής) με μια ενδεικτική ένταση στους -8^{o}C στις 7 του μηνός. Η πρόγνωση της 29^{ης} Δεκεμβρίου φαίνεται να μην ‘βλέπει’ την εισβολή και μάλιστα να δείχνει συνεχή άνοδο των θερμοκρασιών. Όμως από τις 30 Δεκεμβρίου προβλέπεται για δεύτερη φορά η έναρξη του επεισοδίου στις 6 Ιανουαρίου ενώ η έντασή του φτάνει τους -10^{o}C. Η τρίτη πρόγνωση που δείχνει την έναρξη της εισβολής από τις 6 Ιανουαρίου είναι αυτή της 31^{ης} Δεκεμβρίου, επομένως μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι οι ντετερμινιστικές προγνώσεις προέβλεψαν την εισβολή 6 ημέρες πριν. Οι στοχαστικές προγνώσεις είχαν επιβεβαιώσει την έναρξη τη εισβολής από τις 31 Δεκεμβρίου, οπότε βλέπουμε ότι οι 2 προγνώσεις ταυτίζονται ως προς την προγνωσιμότητα της αρχής του φαινομένου.

Στις επόμενες προγνώσεις (1-5 Ιανουαρίου) υπάρχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά: η έναρξη της ψυχρής εισβολής είναι πλέον αδιαμφισβήτητα στις 6 του μηνός και κατά το χρονικό διάστημα 6-12 Ιανουαρίου η Θεσσαλονίκη χαρακτηρίζεται από ολικό παγετό. Ήδη 12 ημέρες πριν από την λήξη του φαινομένου έχουμε τις πρώτες ενδείξεις για την διάρκειά του. Όσον αφορά την πρόγνωση της έντασής του φαίνεται να υπερεκτιμάται στις ντετερμινιστικές προγνώσεις της 1ης (-21°C), 2ης (-15°C), 3ης (-19°C) και κατά 3 περίπου βαθμούς στις προγνώσεις της 4ης και 5ης Ιανουαρίου, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε σε μεγάλο βαθμό από τις στοχαστικές προγνώσεις οι οποίες έδωσαν ελάχιστη θερμοκρασία αυτή των -12°C.

Συνοψίζοντας, η διάρκεια του επεισοδίου διακρίνεται για πρώτη φορά από την αρχή του χρόνου (12 ημέρες πριν την λήξη του) και επιβεβαιώνεται συνεχώς από τις επόμενες προγνώσεις, όσο πλησιάζουμε προς την έναρξή του. Οι στοχαστικές προγνώσεις προέβλεψαν με επιτυχία την λήξη της εισβολής 9 ημέρες πριν (3 Ιανουαρίου) ενώ φαίνεται ότι οι ντετερμινιστικές είχαν προβλέψει τον ολικό παγετό μία ημέρα νωρίτερα, στις 2 Ιανουαρίου. Τέλος, εάν συγκρίνουμε την συνολική προγνωσιμότητα των δύο ειδών πρόγνωσης βλέπουμε ότι ταυτίζονται ως προς την πρόβλεψη της έναρξης της ψυχρής εισβολής ενώ οι ντετερμινιστικές προγνώσεις κατάφεραν να προβλέψουν τη διάρκειά της μια μέρα νωρίτερα από τις στοχαστικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα παραπάνω στοιχεία και δεδομένα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε τα εξής συμπεράσματα:

1. Η ψυχρή εισβολή έλαβε χώρα από τις 6 μέχρι τις 12 Ιανουαρίου του 2017 στην Ελλάδα με ιδιαίτερη ένταση στην βόρεια και ανατολική Ευρώπη. Το φαινόμενο προκλήθηκε από ένα σύστημα υψηλής πίεσης που εμφανίστηκε πάνω από τη Δυτική Ευρώπη και τον Ανατολικό Ατλαντικό ωκεανό καθώς και τη μεταφορά ψυχρών αερίων μαζών από τη Σιβηρία, κυρίως προς τα Βαλκάνια και την ανατολική Ευρώπη. Εξ'αιτίας αυτών εκδηλώθηκαν εξαιρετικά χαμηλές τιμές θερμοκρασιών και ισχυροί βορειο-ανατολικοί άνεμοι (έως και 150 km/h).

2. Ισχυρές χιονοπτώσεις παρατηρήθηκαν σε όλη την Ευρώπη. Στις Βαλκανικές χώρες παρατηρήθηκαν θερμοκρασιακές αποκλίσεις (στα 2μ) πάνω από 15^{o}C χαμηλότερα από τις μέσες θερμοκρασίες και στην υπόλοιπη βορειο-ανατολική Ευρώπη από 6 έως και 15^{o}C χαμηλότερα. Επίσης λαμβάνοντας υπόψιν τη χρονική περίοδο 1981-2010 παρατηρήθηκαν έως και 3 βαθμοί απόκλισης χαμηλότερα από την μέση θερμοκρασία στα 850 hPa για τον Ιανουάριο. Οι θερμοκρασίες έλαβαν τιμές από -5 μέχρι -20^{o}C κατά μέσο όρο (Πολωνία, Ιταλία, Ρουμανία, Τουρκία) με τη χαμηλότερη θερμοκρασία της εισβολής να παρατηρείται στη Σιβηρία και να φθάνει έως και -50 ^{o}C (wwc.meteoinfo.ru, 2017).

3. Για τον Ελληνικό χώρο μελετήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα από 4 σταθμούς: Αθήνα (Ελληνικό), Ελευσίνα, Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν είναι αντίστοιχα, -0,95^{o}C, -2,15^{o}C, -9,95^{o}C και 0,45^{o}C. Η χαμηλότερη τιμή μετρήθηκε στον βορειότερο σταθμό της Θεσσαλονίκης και το υψηλότερο ελάχιστο στον νοτιότερο του Ηρακλείου, ενδεικτικό της εισβολής από τον Βορρά και της εξασθένισής του με τη μείωση του γεωγραφικού πλάτους. Σε όλους τους σταθμούς παρατηρείται η απότομη πτώση στις χρονοσειρές της θερμοκρασίας η οποία λαμβάνει χώρα στο χρονικό διάστημα 6-12 Ιανουαρίου. Εξ'αιτίας του γεωγραφικού του πλάτους, ο σταθμός της Θεσσαλονίκης παρουσιάζει τις περισσότερες ημέρες παγετού και αντιστοίχως ο σταθμός του Ηρακλείου δεν παρουσιάζει καμία αρνητική τιμή θερμοκρασίας στα 2μ.

4. Η πρώτη ένδειξη που είχαν οι μετεωρολόγοι για την ψυχρή εισβολή από τις στοχαστικές προγνώσεις ήταν στις 30 Δεκεμβρίου του 2016 καθώς παρουσιάστηκε μια ανωμαλία χαμηλότερων θερμοκρασιών από τις κανονικές τιμές για την εποχή για το χρονικό διάστημα 6-14 Ιανουαρίου. Ο ακριβής προσδιορισμός της έναρξης της εισβολής έγινε από τις 1-2 Ιανουαρίου (4-5 ημέρες πριν) και των υπόλοιπων παραμέτρων της ψυχρής εισβολής (διάρκεια, ένταση) έγινε από τις 3 Ιανουαρίου από όλα τα προγνωστικά μέλη.

5. Συνεπώς η στοχαστική πρόγνωση χαρακτηρίζεται ως επιτυχής και ακριβής ως προς τον προσδιορισμό της ψυχρής εισβολής. Σε πρώτο στάδιο υπήρχε ένδειξη από τις 30 Δεκεμβρίου (7 ημέρες πριν), και σε δεύτερο στάδιο επιβεβαίωση της έναρξής της από την 1η Ιανουαρίου (5 ημέρες πριν), και της διάρκειάς της από τις 3 Ιανουαρίου (9 ημέρες πριν την λήξη της).

6. Οι ντετερμινιστικές προγνώσεις προέβλεψαν την εισβολή την ίδια ημέρα με τις στοχαστικές (30 Δεκεμβρίου, 7 ημέρες πριν) ενώ την διάρκειά της από τις 2 Ιανουαρίου, δηλαδή μία ημέρα νωρίτερα από τις στοχαστικές. Παρ’όλα αυτά βλέπουμε σε πολλές περιπτώσεις (1-5 Ιανουαρίου) την υπερεκτίμηση της έντασης του επεισοδίου, σε κάποιες περιπτώσεις έως και 12 βαθμούς χαμηλότερα από τις πραγματικές μετρήσεις, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στις στοχαστικές προγνώσεις οι οποίες τελικά αποδεικνύονται πιο ακριβείς ως προς τον προσδιορισμό όλων των παραμέτρων (έναρξη, διάρκεια/λήξη) της ψυχρής εισβολής.

7. Οι επιπτώσεις της ψυχρής εισβολής ήταν πάνω από 61 θανάτοι σε όλη την Ευρώπη εξ’αιτίας των ακραίων θερμοκρασιών και του ψύχους ιδιαίτερα στην Πολωνία, Αλβανία, Π.Γ.Δ.Μ., Βουλγαρία, Τσεχία, Ιταλία και Ελλάδα. Το μεγαλύτερο ποσοστό ήταν άστεγοι και πρόσφυγες (Usatoday, 2017). Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες είχαν ως αποτέλεσμα τις ακυρώσεις πτήσεων σε όλη την Ευρώπη και την δυσκολία των μετακινήσεων στις οδούς, με επιπτώσεις στο εμπόριο, και στις μεταφορές. Διαβάζοντας τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς πόσο σημαντική είναι η έγκαιρη πρόγνωση παρόμοιων φαινομένων και η συνολική συνεργασία της επιστημονικής κοινότητας για μελέτη και έρευνα παρόμοιων περιστατικών.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

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

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

Κορνάρος Γ., 1999 Κλιματικά Στοιχεία των Σταθμών της Ε.Μ.Υ., Διεύθυνση Κλιματολογίας-Εφαρμογών. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Μακρογιάννης Τ.Ι., Σαχσαμάνογλου Χ.Σ., 2004, Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας, 349-352, Χάρις Ε.Π.Ε.

Πετρολιάγκης Θ., 2002, Συμβολή στην Τοπική Πρόγνωση Μετεωρολογικών Παραμέτρων με τη βοήθεια Αριθμητικών Μοντέλων Καιρού, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

Πυθαρούλης Ι., 2016, Σημειώσεις Αριθμητικής Πρόγνωσης Καιρού. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη ‘Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον’, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

Πυθαρούλης Ι., Παπαγεωργίου Ι., 2006, Περιγραφή των Προϊόντων του Ντετερμινιστικού Μοντέλου και του Συστήματος Στοχαστικών Προγνώσεων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Τσοπουρίδης Λ. 2010, Συνοπτική Ανάλυση και Προγνωσιμότητα μιας Έντονης Ψυχρής Εισβολής στον Ελλαδικό Χώρο, Διπλωματική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

Ξενόγλωσση

Balafoutis C.J. and A. Arseni-Papadimitriou, 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.

English S., McNally T., Bormann N., Salonen K., Matricardi M., Horanyi A., Rennie M., Janiskova M., Di Michele S., Geer A., Di Tomaso E., Cardinali C., De Rosnay P., Munoz Sabater J., Bonavita M., Albergel C., Engelen R, Thepaut J., 2013, Impact of satellite data, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

Flocas H.A., Karacostas T.S., Giles B.D., Flocas A.A., 1995, Considerations on the dynamics of a cold spell over Greece, Meteorologische Zeitschrift ISSN 0941-2948, vol 4, no 5, pp. 222-228.

Gadd, A.J. 1981, Numerical modeling of the atmosphere. In: B.W. Atkinson, ed., Dynamical Meteorology: An Introductory Selection, Methuen & co. ltd, London, The Royal Meteorological Society, p. 194-204.

Lagouvardos K., Kotroni V., Kallos G., 1998, An extreme cold surge over the Greek peninsula, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 124, Issue 551, Part A, Pages 2299-2327.

Lagouvardos K., Kotroni V., 2003, The 4-6 January 2002 Heavy Snowfall over Central and Southern Greece: Assessment of MM5 Model Forecasts, National Observatory of Athens, Institute of Environmental Research and Sustainable Development, Athens, Greece.

Louka P., Boucouvala D., Gofa F., Balami M., and Ziakopoulos D., 2010, Operational forecasting of a snowfall event over the Greater Athens Area, Advances in Geosciences., Volume 23, 25-30.

Mason J., 1986, Numerical Weather Prediction, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 407, No. 1832, Predictability in Science and Society (Sep. 8, 1986), pp. 51-60.

Oldenborgh G., Sjoukje P., De Vries H., 2017, Siberian Cold Hits Southeastern Europe, KNMI.

Phillips A.N., 1960, Numerical Weather Prediction, Advances In Computers, Volume 1, Pages 43-90.

World Meteorological Organization, Submitted by Yuejian Zhu., 2016, Commission for Basic Systems OPAG on DPFS, Meeting of the CBS (DPFS) Expert Team on Operational Weather and Forecasting Process and Support.

<u>Ιστοσελίδες</u>

www.accuweather.com

wwa.climatecentral.org

www.ecmwf.int

www.glossary.ametsoc.org

www.knmi.nl

www.hnms.gr

wwc.meteoinfo.ru

www1.wetter3.de

www.sat.dundee.ac.uk

www.meted.ucar.edu

www.weatheronline.co.uk

www.wmo.int

www.severe-weather.eu

www.onthesnow.com

www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php

www.emc.ncep.noaa.gov/GEFS/mconf.php

www.emc.ncep.noaa.gov/GEFS/ghPa/Doc-5.1.1_EPS_activities_NCEP_GEFS.pdf

public.wmo.int/en/media/news/siberian-cold-hits-southeastern-europe

www.bbc.com

www.meteociel.fr

www.usatoday.com

www.thetimes.co.uk