



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΠΑΕΥΑΓΓΕΛΟΥ
Πτυχιούχος Φυσικός

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ
ΕΝΤΟΝΗΣ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

‘ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ’

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2019





ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΠΑΕΥΑΓΓΕΛΟΥ
Πτυχιούχος Φυσικός

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΤΟΝΗΣ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 21/02/2019

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Πυθαρούλης Ιωάννης, Επιβλέπων
Καθηγητής Φείδας Χαράλαμπος, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
Καθηγητής Ζάνης Πρόδρομος Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

© Νικόλαος Παπαευαγγέλου, Φυσικός, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΝΤΟΝΗΣ
ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ– *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Nikolaos Papaevangelou, Physicist , 2019

All rights reserved.

SYNOPTIC AND DYNAMIC STUDY OF AN INTENSE CYCLOGENESIS EVENT
IN THE MEDITERRANEAN– *Master Thesis*

Citation:

Παπαευαγγέλου Ν., 2019. Συνοπτική και δυναμική μελέτη μίας περίπτωσης έντονης κυκλογένεσης στη Μεσόγειο–, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. , σελ 114

Papaevangelou N., 2019. – Synoptic and dynamic study of an intense cyclogenesis event in the Mediterranean. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 114 pp.

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

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με ειδίκευση στη Μετεωρολογία-Κλιματολογία. Κύριος στόχος της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των συνοπτικών και δυναμικών χαρακτηριστικών στην εκρηκτική κυκλογένεση της περιόδου 5-7 Φεβρουαρίου του 2012.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Πυθαρούλη, επιβλέποντα της εν λόγω μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη συμβολή του στην επιστημονική μου κατάρτιση καθώς και για την άριστη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης, αλλά και κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, καθηγητή Φείδα Χαράλαμπο και καθηγητή Ζάνη Πρόδρομο για το ενδιαφέρον που μου έδειξαν με τις εύστοχες υποδείξεις και παρατηρήσεις τους. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας για την άριστη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους γονείς μου Γιώργο και Ερμιόνη και την αδερφή μου Βασιλική για τη συνεχή συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Παπαευαγγέλου Νικόλαος



Abstract / Περίληψη (σελ. 9)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ (σελ. 11)

- 1.1) Θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου (σελ.11)
- 1.2) Διάρθρωση εργασίας (σελ.15)
- 1.3) Εκρηκτική κυκλογένεση της 5,6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012 (σελ.16)
- 1.4) Σκοπός της εργασίας (σελ.18)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (σελ.20)

- 2.1) Περιοχή και περίοδος μελέτης (σελ.20)
- 2.2) Δεδομένα (σελ.21)
- 2.3) Οπτικοποίηση δεδομένων (σελ.23)
- 2.4) Υπολογισμός παραγώγων δεδομένων (σελ.23)
- 2.5) Μέθοδος μελέτης (σελ.26)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (σελ.27)

- 3.1) Τροχιά του βαρομετρικού χαμηλού (σελ.27)
- 3.2) Σύγκριση των επιχειρησιακών δεδομένων του ECMWF με τις παρατηρήσεις σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών-ΕΑΑ (σελ.29)
- 3.3) Παρατηρήσεις εδάφους (σελ.33)
 - 3.3.1) Βαρομετρική πίεση (σελ.33)

3.3.2) Άνεμος (σελ.34)

3.4) Υετός (σελ.38)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (σελ.45)

4.1) Εισαγωγή (σελ.45)

4.2) Προκυκλογενετική περίοδος 00UTC 04 Φεβ. 2012 – 18UTC 05 Φεβ. 2012 (σελ.45)

4.2.1) Κρίσιμα σημεία της συνοπτικής μελέτης (Προκυκλογενετική περίοδος) (σελ.50)

4.2.1.α) Κατώτερη Τροπόσφαιρα (σελ.50)

4.2.1.β) Μέση και ανώτερη Τροπόσφαιρα (σελ.50)

4.3) Περίοδος της εκρηκτικής κυκλογένεσης 18UTC 05 Φεβ. 2012 – 00UTC 07 Φεβ. 2012 (σελ.53)

4.3.1) Μέσης κλίμακας φαινόμενα – Συνεισφορά της δυνητικής αστάθειας στην ανάπτυξη του στροβίλου (σελ.58)

4.3.2) Εξέλιξη του πεδίου της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας το διάστημα 00UTC – 18UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (σελ.60)

4.4) Περίοδος κυκλόλυσης 00UTC 07 Φεβ. 2012 – 12UTC 07 Φεβ. 2012 (σελ.63)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗΣ (σελ.66)

5.1) Μεταφορά στροβιλισμού(σελ.66)

5.2) Δυνητικός στροβιλισμός (Potential Vorticity) (σελ.69)

5.2.1) Σύγκριση της θέσης της ανωμαλίας της Τροπόπαυσης μεταξύ των δεδομένων του ECMWF και δορυφορικών εικόνων (σελ.78)

5.2.2) Ανάλυση των χαρτών του ύψους της Τροπόπαυσης (σελ.78)

5.2.3) Κατακόρυφες τομές (σελ.80)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗ (σελ.85)

6.1) Χρονική περίοδος 00UTC – 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 (σελ.87)

6.2) Χρονική περίοδος 00UTC – 18UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (σελ.91)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΖΗΤΗΣΗ (σελ.94)

8.1) Ανασκόπηση των συνοπτικών συνθηκών της περιόδου Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου 2012 (σελ.94)

8.2) Ατμοσφαιρικές διεργασίες κατά την διάρκεια της προκυκλογενετικής και κυκλογενετικής περιόδου (σελ. 98)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (σελ.106)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (σελ.109)

ABSTRACT:

During the last decades a lot of attention has been given to the explosive cyclones, or meteorological “bombs”, which are extra-tropical low pressure systems that deepen at an unusually rapid rate. The accurate analysis and prediction of these cyclones by the operational models is a challenge, especially in closed maritime regions such as the Mediterranean Sea. This study examines a case of explosive cyclogenesis in the Ionian Sea on 5th, 6th and 7th of February 2012, using mainly gridded ECMWF operational data ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$ latitude - longitude) and surface observations. This cyclone had a high social and economic impact, causing two deaths and many damages on Greece. The aim of this study is to investigate the conditions that contributed to its rapid deepening and strong intensity through high resolution data analysis. Its minimum mean sea-level pressure was 978.4 hPa, while its deepening rate reached ~ 1.8 Bergeron (14 hPa/ 12 hours). It has been found that the system developed under the combined influence of a longwave trough, an anomaly of the dynamic tropopause, a strong jet-streak which induced divergence in the upper troposphere and a very dry and thin air layer, located above the boundary layer, which led to strong convective instability.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Τις τελευταίες δεκαετίες, η επιστημονική κοινότητα έχει δώσει μεγάλη προσοχή στις εκρηκτικές κυκλογενέσεις ή μετεωρολογικές «βόμβες» οι οποίες είναι υφέσεις που βαθαίνουν με ασυνήθιστα γρήγορο ρυθμό. Η ακριβής ανάλυση και πρόγνωση αυτών των υφέσεων από τα επιχειρησιακά μοντέλα αποτελεί πρόκληση, ειδικά σε κλειστές θαλάσσιες περιοχές όπως η Μεσόγειος Θάλασσα. Η παρακάτω μελέτη εξετάζει μία περίπτωση εκρηκτικής κυκλογένεσης στο Ιόνιο πέλαγος στις 5,6 7 Φεβρουαρίου του 2012, χρησιμοποιώντας κυρίως τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF (με οριζόντια χωρική διακριτοποίηση $0,125^\circ \times 0,125^\circ$) και παρατηρήσεις εδάφους. Το συγκεκριμένο σύστημα χαμηλών πιέσεων δημιούργησε σημαντικές κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις στον Ελληνικό χώρο, προκαλώντας πολλές καταστροφές αλλά και δύο θανάτους. Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να ερευνήσει τις συνθήκες που συνέβαλαν στην εκρηκτική βάθυνση του συστήματος με την βοήθεια δεδομένων υψηλής ανάλυσης. Η ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή βαρομετρικής πίεσης ήταν

978.4hPa την στιγμή που ο ρυθμός βάθυνσης πλησίασε τα 1.8 Bergeron (14hPa/12ώρες). Βρέθηκε ότι το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε κάτω από την επίδραση ενός μεγάλου μήκους κύματος αυλώνα, μίας ανωμαλίας της δυναμικής Τροπόπαυσης, ενός ισχυρού μεγίστου του αεροχειμάρρου (jet-streak) το οποίο αύξησε τις τιμές της απόκλισης στην ανώτερη τροπόσφαιρα και ενός πολύ λεπτού στρώματος ξηρού αέρα επάνω από το οριακό στρώμα το οποίο δημιούργησε συνθήκες δυνητικής αστάθειας.

1.1) Θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου

Εκρηκτική κυκλογένεση είναι η φυσική διαδικασία της έντονης βάθυνσης μιας εξωτροπικής ύφεσης (extra-tropical cyclone). Πρόκειται για ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 30 μοιρών και του οποίου η σφοδρότητα είναι τις περισσότερες φορές συγκρίσιμη με αυτή των τροπικών κυκλώνων. Σύμφωνα με τους Lionello et al. (2006) και Homar et al. (2007) αυτού του είδους τα συστήματα συνήθως συνοδεύονται από ισχυρές βροχοπτώσεις και ισχυρούς ανέμους με αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές να έχουν σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Η πρώτη κλιματολογική μελέτη εκρηκτικών κυκλογενέσεων έγινε από τους Sanders and Gyakum (1980), οι οποίοι όρισαν το κριτήριο το οποίο πρέπει να πληροί μία κυκλογένεση, για να μπορεί να θεωρηθεί «εκρηκτική», οπότε και η αντίστοιχη ύφεση καλείται «Μετεωρολογική βόμβα». Έτσι, λοιπόν, σύμφωνα με τη μελέτη τους, μία ύφεση μπορεί να χαρακτηριστεί ως «Μετεωρολογική βόμβα», όταν η πίεση στο κέντρο του συστήματος μειώνεται κατά τουλάχιστον 6 hPa ανά 6-ωρο και για 24 ώρες σε γεωγραφικό πλάτος 60 μοιρών. Για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη η παραπάνω σχέση αλλάζει και γίνεται:

$$|\text{Ρυθμός βάθυνσης}| \geq 1 \text{ Bergeron} = \frac{24\text{mb}}{24\text{h}} \times \frac{\sin \varphi}{\sin 60} \quad (1.1.1)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος. Επομένως σύμφωνα με τη σχέση (1.1.1) ο ρυθμός πτώσης της πίεσης της ύφεσης, για να μπορεί αυτή να θεωρηθεί «Μετεωρολογική βόμβα», θα πρέπει να είναι απολύτως μεγαλύτερος ή ίσος του 1 Bergeron. Ο Sanders (1986) επιπλέον κατέταξε τις μετεωρολογικές βόμβες του Βορείου Ατλαντικού σύμφωνα με το ρυθμό πτώσης της κεντρικής πίεσής τους ως εξής: Ασθενής: 1-1.2 Bergeron, Μέτρια: 1.3-1.8 Bergeron, ισχυρή: >1.8 Bergeron. Στην Μεσόγειο, οι εκρηκτικές κυκλογενέσεις σύμφωνα με τους Conte et al. (1997) κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες: C1 (1-1.15 B), C2(1.16-1.30B), C3(1.31-1.45 B) και C4 (> 1.45 B).

Η Μεσόγειος είναι γενικά μία ευρέως γνωστή περιοχή για την κυκλογενετική της δραστηριότητα (Petterssen, 1956). Η γεωγραφική της

θέση, μεταξύ της Ευρώπης και της Αφρικής καθώς και η περίπλοκη μορφολογία εδάφους (Michaelides et al. 2018), συχνά ευνοεί την ανάπτυξη έντονων χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων. Ηπειρωτικές τροπικές (cT) αέριες μάζες από τη Σαχάρα είναι δυνατό να καταστούν δυνητικά ασταθείς κατά την κίνησή τους επάνω από τα θερμά νερά της Μεσογείου, ενώ, συγχρόνως, αρκτικές αέριες μάζες από τα βόρεια, ειδικά από την Ανατολική Ευρώπη, αυξάνουν τη βαροκλινικότητα, τουλάχιστον στα κατώτερα επίπεδα. Ακόμη, η πολύπλοκη ορογραφία (Άτλαντας, Άλπεις) δημιουργεί πολύ συχνά ορογραφικές κυκλογενέσεις, ενώ η ύπαρξη τοπικών μεγίστων της επιφανειακής θερμοκρασίας θάλασσας (Sea Surface Temperature, SST) συνεισφέρει πολλές φορές σημαντικά στην δημιουργία έντονων κυκλώνων. Παρ' όλ' αυτά οι εκρηκτικές κυκλογενέσεις στην Μεσόγειο είναι ένα όχι και τόσο συχνό φαινόμενο, κυρίως αυξανόμενου του γεωγραφικού μήκους, κατά μήκος της Μεσογείου, καθώς αυξάνει η απόσταση από την ζώνη των διαταραχών του Β. Ατλαντικού (storm track), την κύρια πηγή διαταραχών για την Ευρωπαϊκή περιοχή. Οι εκρηκτικές κυκλογενέσεις εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου (Conte 1986; Conte et al. 1997) και συγκεκριμένα την περίοδο Νοεμβρίου – Μαρτίου (Kouroutzoglou et al. 2011a, b, 2013a).

Σύμφωνα με την μέχρι τώρα υπάρχουσα θεωρία, υπάρχουν δύο μηχανισμοί για την δημιουργία εκρηκτικών κυκλογενέσεων. Ο πρώτος μηχανισμός είναι ο μηχανισμός KF των Karacostas and Flocas (1983) και ο δεύτερος, ο μηχανισμός CC των Capaldo et al. (1980). Ο κυρίαρχος μηχανισμός για την περιοχή της Μεσογείου είναι ο KF ο οποίος χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μεγάλης κλίμακας αυλώνα, ο οποίος εισέρχεται στη λεκάνη της Μεσογείου από τα βορειοδυτικά, με μία μικρής κλίμακας ύφεση στη βόρεια ακτή της Μεσογείου, είτε ορογραφικού τύπου, κυρίως στην υπήνεμη πλευρά των Άλπεων, είτε δημιουργούμενης από δυναμικά ασταθή ράχη. Στον μηχανισμό KF κυριαρχεί ο ρόλος των ανώτερων στρωμάτων της τροπόσφαιρας. Ο λιγότερο συχνός, για την Μεσόγειο, μηχανισμός CC χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση μίας μεγαλύτερης έκτασης ύφεσης από τα μέσα γεωγραφικά πλάτη με μία μικρότερης κλίμακας ύφεση από την Αφρική, η οποία εισέρχεται στη Μεσόγειο από τα νότια. Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό απαιτείται μεγάλη βαροκλινικότητα στα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας.

Κατά το μηχανισμό KF, όπως αναλύεται στην ομώνυμη δημοσίευση, η δημιουργία του στροβίλου είναι αποτέλεσμα διαδικασιών στην ανώτερη τροπόσφαιρα οι οποίοι αλληλοεπιδρούν με μία μικρού μήκους κύματος διαταραχή, ενώ επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η αυξανόμενη καθ' ύψος μεταφορά στροβιλισμού, καθώς και η ψυχρή μεταφορά. Σύμφωνα με

αυτή την μελέτη οι ισχυρές ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε επόμενο στάδιο. Περιπτώσεις ισχυρών εκρηκτικών κυκλογενέσεων έχουν μελετηθεί και σε άλλες εργασίες όπως Prezerakos and Michaelides (1989), Lagouvardos et al. (2007), Karacostas et al. (2010), Λυσίτσα (2010), Brikas et al. (2013) και Floca (1990) ενώ επίσης έχουν μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό και οι υφέσεις με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα οι οποίες διήλθαν από την λεκάνη της Μεσογείου (Lagouvardos et al. 1999; Pytharoulis et al. 2000; Reale and Atlas 2001; Emanuel 2005; Fita et al. 2007 and Jansa' et al. 2007).

Όσον αφορά τη χωρική κατανομή των εξωτροπικών εκρηκτικών κυκλώνων στους ωκεανούς, με αυτήν έχουν ασχοληθεί οι Sanders and Gyakum (1980), ο Roebber (1984), οι Rogers and Bosart (1986), οι Gyakum et al. (1989), οι Chen et al. (1992) και οι Lim and Simmonds (2002). Στη Μεσόγειο, σύμφωνα με την κλιματολογική μελέτη των Kouroutzoglou et al. (2011 a,b), οι υφέσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως κοντά στη βόρεια ακτογραμμή της λεκάνης της Μεσογείου με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στον Κόλπο του Λέοντα, στον κόλπο της Γένοβας, καθώς και στα ανοιχτά των περιοχών αυτών (Λιγυρικό πέλαγος).

Επιπρόσθετα πολλοί ερευνητές έχουν στραφεί και στην μελέτη του ρόλου των επιφανειακών ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας επάνω σε αυτού του είδους τις υφέσεις όπως οι Gyakum and Danielson, (2000), οι Martin and Otkin, (2004) και οι Katsafados et al. (2011). Ακόμη, πολλές εργασίες εστιάζονται στην προσομοίωση των περιπτώσεων εκρηκτικής κυκλογένεσης με την χρήση αριθμητικών μοντέλων (Yamamoto and Hirose, 2007; Kathleen and Capehart, 2008). Τα πιο χαρακτηριστικά συμπεράσματα από τις παραπάνω μελέτες είναι ότι: α) οι ισχυρές μετεωρολογικές «βόμβες» επηρεάζονται έντονα όταν βρεθούν σε περιβάλλον με έντονη βαθμίδα SST β) τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους όπως και η κατανομή ξηράς - θάλασσας έχουν σημαντική επίδραση στα φαινόμενα αυτού του είδους¹ γ) οι αριθμητικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία στις οριακές συνθήκες τις επιφάνειας.

Παρ' όλα αυτά η επίδραση των ανώτερων στρωμάτων, σύμφωνα και με τις περισσότερες μελέτες, συνιστά τον καθοριστικότερο παράγοντα για την εκρηκτική βάθυνση αυτών των υφέσεων. Ειδικότερα οι Lagouvardos et al. (2007) απέδειξαν με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου το σημαντικό ρόλο των ανώτερων στρωμάτων και συγκεκριμένα της ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης στην «μετεωρολογική βόμβα» της 21 – 22 Ιανουαρίου 2004 στο Αιγαίο πέλαγος. Επιπρόσθετα, έδειξαν πως στη

¹ π.χ. η παρουσία ξηράς στον ψυχρό τομέα της μετ. βόμβας και θάλασσας στο θερμό τομέα της

συγκεκριμένη περίπτωση οι ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο μόνο στην ώριμη φάση του φαινομένου. Τέλος οι Homar et al. (2002) διαπίστωσαν ότι στα αρχικά στάδια των εκρηκτικών κυκλογενέσεων της δυτικής Μεσογείου ο στρόβιλος βρίσκεται σε ένα περιβάλλον με έντονη βαροκλινικότητα. Στα επόμενα στάδια, η ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού καθίσταται ο καθοριστικότερος παράγων στην περαιτέρω βάθυνση της μετ. βόμβας.

Παρ' όλο, όμως, που υπάρχει πληθώρα εργασιών, που αποσαφηνίζει πλήρως, και μάλιστα ποσοτικά, τη συμπεριφορά ανώτερων και κατώτερων στρωμάτων της τροπόσφαιρας, κατά τη διάρκεια του φαινομένου της εκρηκτικής κυκλογένεσης, ο ακριβής ρόλος των ατμοσφαιρικών αυτών διεργασιών στη βάθυνση της βόμβας δεν έχει αποσαφηνιστεί. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία μελετάται συνοπτικά και δυναμικά μία έντονη μετεωρολογική βόμβα, με στόχο να περιγραφεί ο ρόλος όλων των εμπλεκόμενων, στην εκρηκτική κυκλογένεση, αερίων μαζών, των μεταξύ τους μετώπων και ειδικότερα των αερίων ρευμάτων (ξηρής στρατοσφαιρικής εισβολής, θερμού και ψυχρού αερομεταφορέως) των σχετιζομένων με τα προϋπάρχοντα συστήματα στην περιοχή της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Η πρόθεση του συγγραφέα είναι τα παραπάνω να γίνουν στο βαθμό που το επιτρέπει η χρήση των διαγνωστικών δεδομένων του ECMWF. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα σενάρια που προκύπτουν από τη δυναμική και συνοπτική αυτή ανάλυση, με στόχο η παρούσα εργασία να αποτελέσει έναυσμα, ώστε, με τον υπολογισμό παραγώγων δεδομένων από το ECMWF, καθώς και των τροχιών των αερίων δειγμάτων, να μελετηθούν εκτενέστερα ανάλογες περιπτώσεις εκρηκτικής κυκλογένεσης και οι μηχανισμοί τους να αποσαφηνιστούν πλήρως.

1.2) Διάρθρωση εργασίας

Παρακάτω δίδεται ο σκελετός της εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο αρχικά προσεγγίζεται το φαινόμενο της εκρηκτικής κυκλογένεσης από θεωρητικής πλευράς, περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5,6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012 ενώ συγχρόνως δίνεται και ο σκοπός της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα δεδομένα και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3) αναλύεται η τροχιά που ακολούθησε η εκρηκτική κυκλογένεση ενώ γίνεται μία προσπάθεια να συγκριθούν τα δεδομένα του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Center for Medium range Weather Forecasts, ECMWF) με τις παρατηρήσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) όταν το σύστημα πλησίασε τα νησιά του Ιονίου πελάγους και την Πελοπόννησο. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται και οι παρατηρήσεις των σταθμών από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4) πραγματοποιείται η συνοπτική ανάλυση. Για την καλύτερη δυνατή μελέτη του συνοπτικού περιβάλλοντος του φαινομένου η χρονική περίοδος 4-7 Φεβρουαρίου 2012 διαχωρίζεται σε 3 υποπεριόδους: α) Στην προκυκλογενετική περίοδο (00UTC 04 Φεβρουαρίου 2012-18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 / Κεφάλαιο 4.2) β) στην περίοδο της εκρηκτικής κυκλογένεσης (18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012-00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 / Κεφάλαιο 4.3). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η κυκλογένεση ήταν «εκρηκτική» έως τις 18 UTC 06 Φεβρουαρίου του 2012. Το τελευταίο εξάωρο έως και τις 00 UTC στις 07 Φεβρουαρίου του 2012 το σύστημα συνεχίζει να βαθαίνει αλλά πλέον ο ρυθμός βάθυνσης δεν πληροί τα κριτήρια για να χαρακτηριστεί «εκρηκτικός» γ) στην περίοδο της κυκλόλυσης (00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012-12UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 / Κεφάλαιο 4.4). Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η δυναμική μελέτη του φαινομένου. Μελετάται η συνεισφορά της μεταφοράς στροβιλισμού (Κεφάλαιο 5.1) αλλά και το πεδίο του δυνητικού στροβιλισμού (Κεφάλαιο 5.2). Αξίζει να σημειωθεί πως στο πεδίο του δυνητικού στροβιλισμού γίνεται και η επαλήθευση των αναλύσεων του Ευρωπαϊκού κέντρου με δορυφορικές εικόνες (Κεφάλαιο 5.2.1). Έπειτα διερευνώνται οι συνθήκες της Τροπόσφαιρας, πριν αλλά και κατά την διάρκεια του φαινομένου, μέσω της χρήσης κατακόρυφων τομών (Κεφάλαιο 5.2.3). Στην συνέχεια, και στο κεφάλαιο 6, αναλύονται χάρτες της ανώτερης τροπόσφαιρας, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των αεροχειμάρρων. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση του φαινομένου (Κεφάλαιο 7). Τέλος τα συμπεράσματα της εργασίας εξάγονται στο κεφάλαιο 8.

1.3) Εκρηκτική κυκλογένεση της 5,6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012

Την περίοδο 5, 6 και 7 Φεβρουαρίου 2012 παρατηρήθηκε ένα ισχυρό σύστημα χαμηλών πιέσεων στην περιοχή της κεντρο-ανατολικής Μεσογείου και συγκεκριμένα του Ιονίου πελάγους, το οποίο προκάλεσε σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις σε ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια. Αξίζει να σημειωθεί πως έντονα καιρικά φαινόμενα και καταστροφές παρατηρήθηκαν και πριν την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Ο λόγος ήταν η ύπαρξη ενός ισχυρού μετώπου στην κεντρική Μεσόγειο το οποίο, σε συνδυασμό με τις ευνοϊκές συνθήκες στην ανώτερη τροπόσφαιρα, προκαλούσε αξιοσημείωτες βροχοπτώσεις στα δυτικά κυρίως ηπειρωτικά της χώρας, ενώ εξ' ίσου μεγάλα ποσά βροχής σημειώνονταν και στην ανατολική Μακεδονία – Θράκη, λόγω της τοπογραφικής ανύψωσης του ισχυρού νοτίου ρεύματος του θερμού τομέα. Μάλιστα, οι έντονες βροχοπτώσεις στην περιοχή της Πελοποννήσου μία ημέρα πριν από την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης είχαν ως αποτέλεσμα τον θάνατο μίας γυναίκας στην περιοχή του Πύργου. Σύμφωνα με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, την συγκεκριμένη ημέρα (5 Φεβρουαρίου) στο μετεωρολογικό σταθμό του Πύργου καταγράφηκαν 93.6 χιλιοστά βροχής.

Την περίοδο 5, 6 και 7 Φεβρουαρίου παρατηρήθηκε ένα βαθύ σύστημα χαμηλών πιέσεων στο Ιόνιο πέλαγος. Η βάθυνση αυτού του συστήματος (σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF) διήρκεσε περίπου 30 ώρες (από τις 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 έως και τις 00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012). Το 12ωρο με την εντονότερη βάθυνση, παρατηρήθηκε από τις 06UTC έως τις 18UTC στις 06 Φεβρουαρίου, διάστημα στο οποίο ο ρυθμός πτώσης πίεσης άγγιξε τα 14hPa/12h. Επιπλέον οι χαμηλές πιέσεις στην περιοχή του Ιονίου πελάγους σε συνδυασμό με τις υψηλές πιέσεις στα Βαλκάνια και την Ευρώπη προκάλεσαν ισχυρούς ανέμους στο μεγαλύτερο κομμάτι της ανατολικής Μεσογείου. Οι μεγαλύτερες τιμές (μεγαλύτερες από 40 κόμβους) παρατηρήθηκαν στις βορειότερες περιοχές του Αιγαίου και τις νοτιότερες του Ιονίου πελάγους. Εκτός όμως από τους ισχυρούς ανέμους το συγκεκριμένο σύστημα προκάλεσε και ισχυρές βροχοπτώσεις στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρας. Συγκεκριμένα το ισχυρό βορειοανατολικό ρεύμα στο βόρειο Αιγαίο σε συνδυασμό με την ορογραφία στις ανατολικές περιοχές της χώρας προκάλεσε ανολισθήσεις οι οποίες οδήγησαν σε μεγάλης διάρκειας αλλά και μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις στα ανατολικά κυρίως τμήματα της κεντρικής Ελλάδας. Χαρακτηριστική είναι η μέτρηση των 175mm/ημέρα η οποία καταγράφηκε στην Μακρινίτσα στο Πήλιο στις 06 Φεβρουαρίου.

Το παραπάνω σύστημα μέσω των ισχυρών ανέμων αλλά και των βροχοπτώσεων επηρέασε κατά πολύ μεγάλο βαθμό τις δραστηριότητες στην Ελληνική περιοχή. Έτσι στις 6 Φεβρουαρίου πολλά προβλήματα λόγω της ισχυρής βροχόπτωσης αντιμετώπισε η ανατολική Μακεδονία και η Θράκη, περιοχές της κεντρικής Ελλάδας, τα νότια κυρίως προάστια της Αττικής καθώς και η Τρίπολη. Την ίδια μέρα, λόγω των θυελλωδών ανέμων στην δυτική κυρίως χώρα (κυρίως λόγω του καταβάτη ανατολικού ανέμου) υπήρξαν πολύ μεγάλα προβλήματα στην ηλεκτροδότηση πολλών περιοχών καθώς και ακυρώσεις πτήσεων (κυρίως ατο αεροδρόμιο των Ιωαννίνων). Στις 7 Φεβρουαρίου παρά την εξασθένηση του συστήματος, συνεχίστηκαν τα προβλήματα κυρίως λόγω της υπερχειλίσης πολλών ποταμών και χειμάρρων. Ένας τέτοιος χειμάρρος παρέσυρε μία γυναίκα στην Σύμη με αποτέλεσμα τον θάνατο της. Από τα ξημερώματα της 7^{ης} Φεβρουαρίου η θερμοκρασία στην βόρεια κυρίως χώρα έπεσε σημαντικά με αποτέλεσμα οι βροχοπτώσεις να μετατραπούν σε χιονοπτώσεις ακόμη και σε μεγάλα αστικά κέντρα όπως στη Βέροια, την Κοζάνη, την Φλώρινα, την Πτολεμαΐδα κ.α., γεγονός που προκάλεσε σημαντικά προβλήματα στις μετακινήσεις κυρίως των οχημάτων.

Παρ' όλες τις πολύ σημαντικές επιδράσεις του στον άνθρωπο, το συγκεκριμένο σύστημα δεν έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό. Έως αυτή την χρονική στιγμή υπάρχουν δύο μελέτες. Στην πρώτη μελέτη επιχειρήθηκε η ανάλυση του φαινομένου με την βοήθεια δορυφορικών δεδομένων (Metheniti, 2012) ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ECMWF Re-Analyses (ERA) – interim, με σχετικά χαμηλή (coarse) οριζόντια ανάλυση περίπου 79 χιλιόμετρα με σκοπό να περιγραφούν τα συνοπτικά και δυναμικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος (Paschos et al. 2014).

Τέλος, το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί αρκετά σημαντικό από δυναμικής άποψης και λόγω της εμπλοκής που είχε ο υποτροπικός αεροχείμαρρος στην εξέλιξή του (Μπρίκας, 2006). Λεπτομερής εξέταση των ισοταχών, περίπου στην ισοβαρική επιφάνεια των 250hpa, έδειξε πως ο υποτροπικός αεροχείμαρρος την συγκεκριμένη περίοδο, βρισκόταν στα νότια της Μεσογείου, αρκετά κοντά δηλαδή στο να συμβάλλει, με τις αγεωστροφικές κυκλοφορίες του, στην εξέλιξη του φαινομένου.

1.4) Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, με τη βοήθεια δεδομένων υψηλής ανάλυσης, να μελετηθούν οι ατμοσφαιρικές διεργασίες, οι οποίες οδήγησαν στον σχηματισμό αλλά και στην περαιτέρω εξέλιξη της ύφεσης της 5, 6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου στην περιοχή του Ιονίου πελάγους, ενός συστήματος αρκετά σπάνιου αλλά και συγχρόνως ισχυρού, το οποίο βάθυνε με εκρηκτικό ρυθμό.

Η ένταση του συστήματος αποτυπώνεται στις πολύ σημαντικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες σε ολόκληρη την ανατολική Μεσόγειο αλλά κυρίως στην Ελληνική επικράτεια. Η συγκεκριμένη ύφεση αλλά και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες πριν την δημιουργία της ύφεσης είναι υπεύθυνες για τον θάνατο δύο ανθρώπων, για πολύ σημαντικές καταστροφές στις υποδομές της χώρας αλλά και για καθυστερήσεις και ακυρώσεις στον τομέα της ναυσιπλοΐας και αεροπλοΐας.

Στόχος είναι να δοθεί η βάση για τη δημιουργία ενός ιδεατού μοντέλου της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5 – 7 Φεβρουαρίου 2012, το οποίο μπορεί να ελεγχθεί σε μετέπειτα έρευνες με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, αλλά και με τη βοήθεια τροχιών των αερίων δειγμάτων (air parcel trajectories).

Ένα ακόμη στοιχείο το οποίο καθιστά απαραίτητη τη μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος είναι, εκτός από την ένταση του, και η σπανιότητα του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύχθηκε, για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο αλλά και θέση. Στο διάστημα πριν αλλά και κατά την διάρκεια της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5,6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012, το καιρικό μοτίβο στην λεκάνη της Μεσογείου χαρακτηριζόταν από έντονες θερμοκρασιακές αντιθέσεις. Στο δυτικό κομμάτι επικρατούσαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες την στιγμή που στο ανατολικό οι θερμοκρασίες ήταν πολύ πιο πάνω από την μέσες κλιματικές τιμές. Επάνω σε αυτήν τη βαροκλινική ζώνη και μέσα στο θερμό αέρα έλαβε χώρα η εκρηκτική κυκλογένεση, λόγω της μεταφοράς μεγάλων τιμών δυνητικού στροβιλισμού (Potential Vorticity, PV) από τη στρατόσφαιρα διαμέσου μιας ανώτερης μετωπικής επιφάνειας (upper level frontal zone). Τέλος, η συνοπτική εικόνα της ανώτερης τροπόσφαιρας είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα λόγω της επίδρασης του Υποτροπικού αεροχειμάρρου ο οποίος βρίσκεται στις βορειότερες ακτές της Αφρικής, την στιγμή που ένας βαθύς αυλώνας, σχετιζόμενος με τον πολικό αεροχειμάρρο, επεκτείνεται προς τα νότια, με αποτέλεσμα ο πολικός αεροχειμάρρος να διασταυρώνεται με τον υποτροπικό (jet crossing). Οι συνέπειες του φαινομένου αυτού είναι γνωστές (Newton, 1965) όσον αφορά τη δημιουργία εντόνων ανωτέρων μετωπικών επιφανειών και, άρα,

μεταφοράς PV (Winters and Martin, 2017) και κυκλογένεσης στην επιφάνεια.

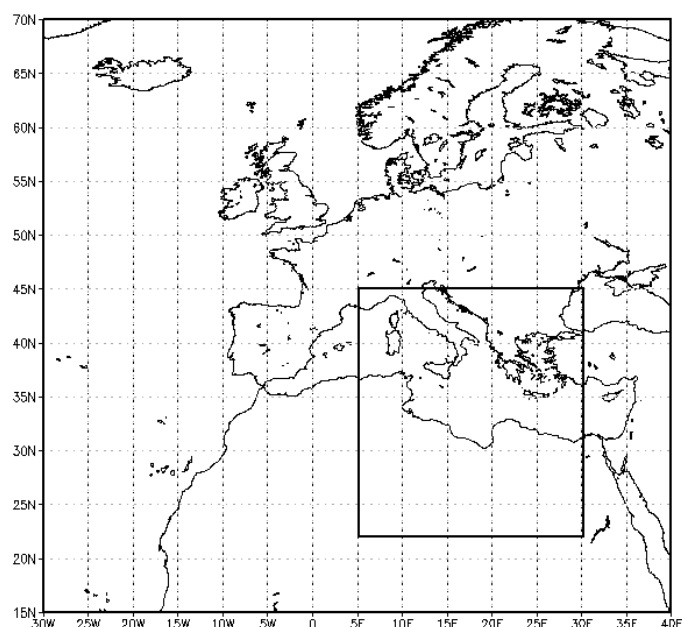


2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:

2.1) Περιοχή και περίοδος μελέτης

Ως περιοχή λεπτομερούς μελέτης επιλέγεται η περιοχή από 5° έως 30°E και από 22.5° έως 45°N, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα (2.1). Η επιλογή αυτού του πλαισίου έγινε διότι στο εσωτερικό του κινήθηκαν τα μετεωρολογικά συστήματα από τα οποία προήλθε ο κύριος στρόβιλος της εκρηκτικής κυκλογένεσης.



Σχήμα 2.1) Χάρτης της περιοχής μελέτης. Το εσωτερικό πλαίσιο δείχνει την περιοχή λεπτομερούς μελέτης.

Ως ευρύτερη περιοχή μελέτης επιλέγεται μία πολύ μεγάλη έκταση από τις 30°W έως της 40°E και από τις 15° έως τις 70°N με σκοπό να αποτυπωθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το μεγάλης κλίμακας περιβάλλον του φαινομένου. Η περιοχή μελέτης είναι εμφανώς μετατοπισμένη νοτιότερα από ό,τι θα απαιτούσε η μελέτη ενός πιο «συνηθισμένου» καιρικού συστήματος, καθώς, όπως οι περισσότερες βόμβες (Whitaker et al., 1988; Brikas et al., 2014), έτσι και η συγκεκριμένη εκρηκτική κυκλογένεση οφειλόταν σε μεγάλο βαθμό σε σύστημα «νότιας» προέλευσης, που, στην περίπτωση της Μεσογείου, σημαίνει τη Β. Αφρική. Τέλος η περίοδος μελέτης είναι από τις 00UTC 04 Φεβρουαρίου 2012 έως τις 12UTC 07 Φεβρουαρίου 2012.

2.2) Δεδομένα

Η παρακάτω συνοπτική δυναμική και θερμοδυναμική ανάλυση της εκρηκτικής κυκλογένεσης στηρίζεται στις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts) καθώς και σε παρατηρήσεις εδάφους.

Οι αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου εμφανίζουν οριζόντια χωρική διακριτότητα $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ενώ συγχρόνως αποτελούνται από τα εξής 20 κατακόρυφα επίπεδα: 1000, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 και 10 hPa. Το χρονικό βήμα τους είναι 6 ώρες ενώ οι μεταβλητές που περιλαμβάνουν είναι οι ακόλουθες: α) απόκλιση, β) ειδική υγρασία, γ) σχετική υγρασία, δ) θερμοκρασία, ε) άνεμο (u και v συνιστώσες), στ) σχετικό στροβιλισμό, ζ) κατακόρυφη ταχύτητα (ωμέγα), η) γεωδυναμικό ύψος, θ) γεωδυναμικό ύψος της δυναμικής τροπόπαυσης (επιφάνεια $PV = 2$ PVU) καθώς και ι) την δυνητική θερμοκρασία, τον άνεμο και την ειδική υγρασία επάνω σε αυτή την επιφάνεια. Όλα τα παραπάνω αρχεία είναι σε μορφή GRIB.

Οι παρατηρήσεις εδάφους προέρχονται από ένα μέρος του συνολικού δικτύου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας αλλά και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μετεωρολογικοί σταθμοί (Πίνακες 2.1 - 2.2):

ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ EMY

Σταθμός	Γεωγ. Πλάτος($^\circ$)	Γεωγ. Μήκος($^\circ$)	Ύψος(m)
Λάρισα	39 39N	22 26E	71.0
Σύρος	37 25N	24 57E	72.0
Βόλος	39 22N	22 57E	2.6
Πάρος	37 00N	25 07E	33.33
Σκύρος	38 54N	24 33E	4.6
Ραφήνα	38 01N	24 00E	6.0
Ζάκυνθος	37 47N	20 54E	10.0
Ανδραβίδα	37 55N	21 17E	11.1
Αστυπάλαια	36 32N	26 22E	73

Πίνακας 2.1) Οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY) οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΕΑ

Σταθμός	Γεωγ. Μήκος(δεκ.)	Γεωγ. Πλάτος(δεκ.)	Υψος(m)
Αιτωλικό	21.36	38.43	3.0
Αμαλιάδα	21.3	37.8	26.0
Αμφίκλεια	22.6	38.6	245.0
Ανδρίτσαινα	21.9	37.4	731.0
Αράχωβα	22.58	38.4	1069.0
Χαλανδρίτσα	21.78	38.1	327.0
Δίον	22.47	40.22	50.0
Ελάτη	22.14	37.62	1207.0
Φολόη	21.7	37.7	600.0
Γαρδίκι	21.25	39.54	1105.0
Ηγουμενίτσα	20.26	39.5	77.0
Υμηττός	23.8	37.9	1011.0
Ιθάκη	20.71	38.36	10.0
Κατάκολο	21.31	37.6	2.0
Κάτω Βλασσιά	21.9	38.0	773.0
Λάππα	21.4	38.09	15.0
Μακρινίτσα	22.98	39.4	850.0
Μαυρολιθάρι	22.3	38.7	1250.0
Μόρνος - Φράγμα	22.12	38.52	445.0
Νευροκόπι	23.8	41.33	585.0
Ωλένη	21.53	37.72	61.0
Παραμυθιά	20.53	39.49	650.0
Πύργος	21.43	37.66	22.0
Πολύδροσο	22.53	38.63	350.0
Στενή	23.83	38.58	450.0
Θεολόγος	23.18	38.66	30.0
Τρίκαλα	21.76	39.5	163.0
Τρίπολη	22.41	37.5	650.0
Βαρθολομιό	21.2	37.85	15.0
Βόλος	22.96	39.37	52.0
Ξάνθη	24.88	41.09	115.0
Ζαχάρω	21.63	37.48	5.0
Ζαγορά	23.1	39.44	505.0
Ζάκυνθος	20.84	37.78	10.0

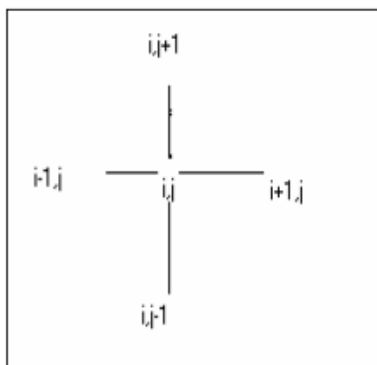
Πίνακας 2.2) Οι μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

2.3) Οπτικοποίηση των δεδομένων

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων ECMWF χρησιμοποιήθηκε το GrADS (Grid Analysis and Display System) του IGES (Institute of Global Environment and Society) – COLA (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies). Το GrADS είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την εύκολη απεικόνιση των δεδομένων των επιστημών της γης και της ατμόσφαιρας. Η συγκεκριμένη εφαρμογή υποστηρίζει πολλές μορφές δεδομένων, συμπεριλαμβανομένου των δυαδικών (binary, stream or sequential), GRIB (εκδόσεις 1 και 2), NetCDF, HDF (εκδόσεις 4 και 5), και BUFR (για δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών) και διανέμεται δωρεάν στο Internet (<http://cola.gmu.edu/grads/>). Τέλος για την επεξεργασία των παρατηρήσεων χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Microsoft Excel.

2.4) Υπολογισμός παραγώγων δεδομένων

Εκτός από τις μεταβλητές που είναι άμεσα διαθέσιμες από το ECMWF, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν και παράγωγες αυτών, με σκοπό να διερευνηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην συγκεκριμένη εκρηκτική κυκλογένεση. Για τον υπολογισμό των παραγώγων μεταβλητών από τις κύριες μεταβλητές χρησιμοποιούνται SCRIPTS του λογισμικού GrADS τα οποία επεξεργάζονται τα πρωτογενή δεδομένα και υπολογίζουν τα παράγωγα δεδομένα επάνω στα ίδια σημεία. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση cdiff η οποία είναι δεύτερης τάξης προσέγγιση κεντρικών διαφορών για τον αριθμητικό υπολογισμό των παραγώγων. Στην παρακάτω εργασία παράγωγα δεδομένα είναι: α) η οριζόντια μεταφορά ποσοτήτων όπως της θερμοκρασίας και του στροβιλισμού β) η δυνητική θερμοκρασία αλλά και η ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία.



Σχήμα 2.2) Το οριζόντιο πλέγμα των δεδομένων. Ο δείκτης i αναφέρεται στον άξονα x , ενώ ο j στον άξονα y . (Brikas, 2006).

A) Οριζόντια μεταφορά θερμοκρασίας

Σύμφωνα με την θερμοδυναμική εξίσωση (Holton, 1992):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \vec{V} \nabla_P \theta - \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} + \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1.1)$$

(1) (2) (3) (4)

Στο αριστερό μέλος της (2.1.1) είναι η τοπική μεταβολή της δυναμικής θερμοκρασίας (όρος 1). Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους (όρος 2) είναι η οριζόντια μεταφορά της δυναμικής θερμοκρασίας σε μία συγκεκριμένη ισοβαρική επιφάνεια, ο δεύτερος όρος (όρος 3) είναι οι αδιαβατικές μεταβολές της θερμοκρασίας ενώ τέλος ο τελευταίος όρος (4) εκφράζει τις διαβατικές διαδικασίες.

Για τον υπολογισμό των παραγώγων της οριζόντιας μεταφοράς της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση - δεύτερης τάξης προσέγγιση κεντρικών διαφορών της πρώτης παραγώγου (το οριζόντιο πλέγμα των δεδομένων απεικονίζεται στο σχήμα 2.2):

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.1.2)$$

B) Μεταφορά στροβιλισμού

Σύμφωνα με την εξίσωση του στροβιλισμού (Holton, 1992):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \vec{V} \nabla_P (\zeta + f) - (\zeta + f) \nabla \vec{V} - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} + \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (2.1.3)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

Το ζ είναι η κατακόρυφη συνιστώσα του σχετικού στροβιλισμού. Ο πρώτος όρος του δευτέρου μέλους (όρος 2) είναι η οριζόντια μεταφορά του απόλυτου στροβιλισμού επάνω σε μία ισοβαρική επιφάνεια (horizontal advection term). Ο δεύτερος όρος (όρος 3) είναι η αύξηση/μείωση του οριζόντιου στροβιλισμού λόγω οριζόντιας σύγκλισης/απόκλισης (horizontal divergence term). Ο όρος (4) είναι η κατακόρυφη μεταφορά στροβιλισμού (vertical vorticity advection). Οι δύο τελευταίοι όροι (5 κ' 6) εκφράζουν τις αυξομειώσεις του σχετικού στροβιλισμού, λόγω αλλαγής του προσανατολισμού του άξονα οριζόντιων στροβίλων, λόγω διαφορικής ανοδικής κίνησης στα δύο άκρα τους (tilting - twisting term).

Όσον αφορά στην τάξη μεγέθους των όρων της εξίσωσης (2.1.3), οι όροι 4, 5 και 6 είναι της τάξης των 10^{-11} s^{-2} . Ο όρος (3) στα χαμηλά και ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας έχει τάξη μεγέθους 10^{-9} s^{-2} έως και 10^{-10} s^{-2} . Στα μεσαία όμως στρώματα, όπου οι κατακόρυφες κινήσεις (οριζόντια απόκλιση) παρουσιάζουν μέγιστο (ελάχιστο), ο όρος (3) έχει τάξη μεγέθους μόνο 10^{-11} s^{-2} . Έτσι, λοιπόν, στην εργασία αυτή και για τη στάθμη των 500 hPa, υπολογίστηκε μόνο ο όρος (2) της παραπάνω σχέσης (2.1.3), ο οποίος και έχει τάξη μεγέθους 10^{-10} s^{-2} . Ο υπολογισμός έγινε, όπως και στην εξίσωση (2.1.2), αντικαθιστώντας το θ με τον απόλυτο στροβιλισμό, που υπολογίστηκε ως το ζ συν την παράμετρο Coriolis, $f=2\Omega\sin\phi$, όπου Ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης.

Γ) Ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία

Για να μελετηθεί η θερμοδυναμική κατάσταση της ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια της περιόδου της εκρηκτικής κυκλογένεσης χρησιμοποιήθηκαν οι ποσότητες της δυνητικής θερμοκρασίας όπως επίσης και της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας. Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δυνητικής θερμοκρασίας, θ είναι: $\theta=T(P_0/P)^K$, όπου T η θερμοκρασία, P η πίεση, το P_0 ισούται με 1000hPa και K η σταθερά Poisson ενώ για την ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία, θ_e , χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.1.5):

ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (Paluch 1979/Emanuel 1994)

$$\theta_e = T \frac{p_0 c_{pd} + r c}{p_d} - \frac{R_v r_v}{c_{pd} + r c} \exp\left(\frac{L_v R_v}{(c_{pd} + r c) T}\right) \quad (2.1.5)$$

όπου θ_e είναι η ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία, c_{pd} η θερμοχωρητικότητα του ξηρού αέρα για σταθερή πίεση, r είναι η αναλογία μίγματος (συνολική ποσότητα), c είναι η θερμοχωρητικότητα του νερού, T είναι η θερμοκρασία, R_d η σταθερά των αερίων για ξηρό αέρα, p_d η μερική πίεση του ξηρού αέρα, p_0 η πίεση αναφοράς, L_v η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, r_v η αναλογία των υδρατμών και R_v η σταθερά των αερίων για τους υδρατμούς.

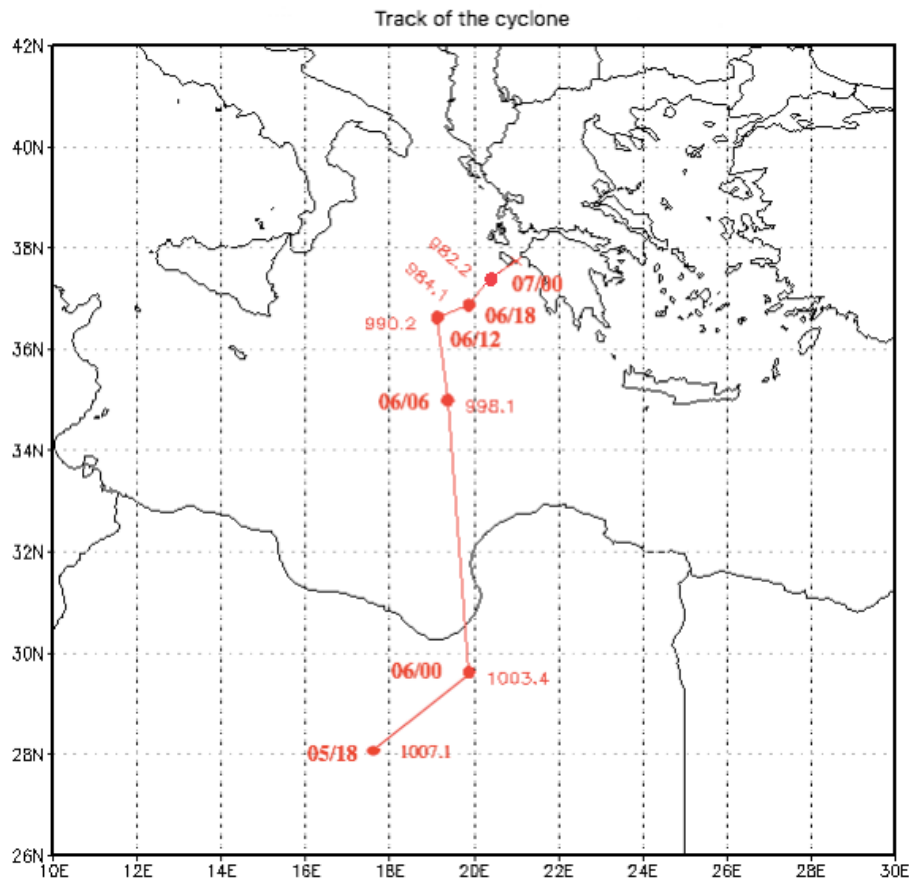
2.5) Μέθοδος μελέτης

Στην παρούσα μελέτη αρχικά παρουσιάζεται η τροχιά της εκρηκτικής κυκλογένεσης, δίνονται και αναλύονται οι πιέσεις στο κέντρο του συστήματος αλλά και οι ρυθμοί βάθυνσής του. Στην συνέχεια οπτικοποιούνται και μελετώνται οι μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών με σκοπό να προσδιοριστούν επακριβώς οι συνθήκες στην επιφάνεια εκείνη την χρονική περίοδο. Έπειτα ακολουθεί η συνοπτική μελέτη του φαινομένου. Για την ευκολότερη παρακολούθηση, το συγκεκριμένο κεφάλαιο έχει διαχωριστεί σε 3 υποενότητες, α) την προκυκλογενετική περίοδο β) την περίοδο της εκρηκτικής κυκλογένεσης και γ) την περίοδο της κυκλόλυσης. Στην συνέχεια επιχειρείται να μελετηθούν οι δυναμικές διαδικασίες του συστήματος μέσα από τις ποσότητες της μεταφοράς του στροβιλισμού, του δυνητικού στροβιλισμού αλλά και με την βοήθεια κατακόρυφων τομών. Οι κατακόρυφες τομές δίνουν πληροφορίες και για την θερμοδυναμική κατάσταση της ατμόσφαιρας για εκείνο το χρονικό διάστημα. Στο επόμενο κεφάλαιο σχεδιάζονται οι χάρτες της οριζόντιας απόκλισης της μάζας στο ύψος των μεγίστων ανέμων με σκοπό να διερευνηθεί η συνεισφορά του μεγίστου του αεροχειμάρρου (jet streak) στην περαιτέρω ενίσχυση του στροβίλου. Ενώ, τέλος, μελετάται και η επίδραση των μέσης κλίμακας φαινομένων.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ:

3.1) Τροχιά του βαρομετρικού χαμηλού



Σχήμα 3.1) Η τροχιά του συστήματος από τις 5 Φεβρουαρίου 18 UTC έως τις 7 Φεβρουαρίου 00 UTC με χρονικό βήμα 6 ωρών σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF. Η ημερομηνία και η ώρα (UTC) δίνονται ως ημερομηνία/ώρα. Η πίεση δίνεται σε hPa.

Στις 5 Φεβρουαρίου και ώρα 18:00 UTC τα πρώτα μεμονωμένα χαμηλά βαρομετρικά εμφανίζονται στην κεντρική Λιβύη. Η ελάχιστη ατμοσφαιρική πίεση στην συγκεκριμένη περιοχή, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι 1007.1 hPa (σχήμα 3.1). Στις 00:00 UTC το ενοποιημένο πλέον σύστημα εντοπίζεται 1.5 μοίρα βορειότερα και περίπου 2.2 μοίρες ανατολικότερα, με βάθος 1003.4 hPa. Μέσα σε ένα διάστημα 6 ωρών η ατμοσφαιρική πίεση μειώθηκε κατά 3.7 hPa. Από τις 00:00 UTC έως τις 06:00 UTC το κέντρο του συστήματος κινείται βόρεια και βρίσκεται πλέον πάνω από θαλάσσια περιοχή, με βάθος 998.1 hPa. Στις 12:00 UTC το σύστημα εντοπίζεται περίπου στις 37 μοίρες γεωγραφικό πλάτος και βαθαίνει κατά 7.9 hPa/6h. Από τις 06:00-12:00 UTC 6/2 το σύστημα εμφανίζει το μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης της ατμοσφαιρικής πίεσης (σχήμα 3.5). Στις 18:00 UTC 6/2 το βαρομετρικό χαμηλό εντοπίζεται λίγα χιλιόμετρα πιο ανατολικά, ενώ συνεχίζει να ενισχύεται.

Το κέντρο εμφανίζει πίεση 984.1hpa. Από τις 12:00-18:00 UTC 6/2 η ατμοσφαιρική πίεση στο κέντρο του συστήματος μειώνεται κατά 6.1 hpa (σχήμα 3.4). Από τις 18:00- 00:00UTC σύμφωνα με τα δεδομένα του ECMWF το σύστημα βαθαίνει κατά 1.9hpa. Στις 7/2/12 στις 06:00UTC το χαμηλό βρίσκεται στην θαλάσσια περιοχή της Ζακύνθου. Στις 12:00 UTC σημαντικά πιο αποδυναμωμένο εντοπίζεται λίγο βορειότερα, στην θαλάσσια περιοχή μεταξύ της Κεφαλλονιάς και της Κέρκυρας. Σύμφωνα με τους Sanders and Gyakum, (1980) για να μπορεί να θεωρηθεί μια ύφεση μετεωρολογική βόμβα, πρέπει ο ρυθμός πτώσης της ατμοσφαιρικής πίεσης του κέντρου της ύφεσης να ισούται τουλάχιστον με 1 Bergeron, όπου $1 \text{ Bergeron} = \frac{24\text{mb}}{24\text{h}} \times \frac{\sin \varphi}{\sin 60}$. Επομένως ο ρυθμός βάθυνσης της μετεωρολογικής βόμβας υπολογίζεται από το τύπο $\frac{\Delta p}{24} \times \frac{\sin 60}{\sin \varphi} \text{ Bergeron}$, όπου Δp είναι η διαφορά πίεσης της ύφεσης μέσα στις 24 ώρες και φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του κέντρου της ύφεσης στο μέσο ακριβώς της 24ωρης περιόδου. Σύμφωνα όμως με μία μεταγενέστερη μελέτη του Roebber, (1984) ο όρος “Bergeron” μπορεί να αποδοθεί εκτός από 24 ώρες και σε χρονική κλίμακα 12 ωρών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, από τις 5 Φεβρουαρίου και ώρα 18 UTC έως τις 6 Φεβρουαρίου και ώρα 18 UTC, ο ρυθμός πτώσης της πίεσης στο κέντρο του συστήματος κυμάνθηκε από 9hPa/12h (18UTC 05/02/12 έως 06UTC 06/02/12) έως 14hPa/12h (06UTC 06/02/12 έως 18UTC 06/02/12) (βλ. σχήματα 3.4-3.5). Αυτός ο ρυθμός ελάττωσης της πίεσης αντιστοιχεί σε 1.3 και 1.7 Bergeron.

Το σύστημα επομένως, σύμφωνα με το κριτήριο των Sanders and Gyakum μπορεί να χαρακτηριστεί “μετεωρολογική βόμβα” διότι για 24 ώρες ο ρυθμός βάθυνσης του ήταν πάνω από 1 Bergeron. Συγκεκριμένα, ο μέσος ρυθμός μείωσης της ατμοσφαιρικής πίεσης στο κέντρο του συστήματος, για το συγκεκριμένο 24ωρο (ο οποίος έχει την τιμή 1.5 Bergeron), κατατάσσει το σύστημα στις μέτριας ισχύος «βόμβες», όσον αφορά στην κατάταξη με κριτήρια Ατλαντικού ωκεανού, αλλά με Μεσογειακά κριτήρια το κατατάσσει στις εντονότερες βόμβες, κατηγορίας 4 κατά Conte et al. (1997).

3.2) Σύγκριση των επιχειρησιακών δεδομένων του ECMWF με τις παρατηρήσεις των σταθμών του ΕΑΑ

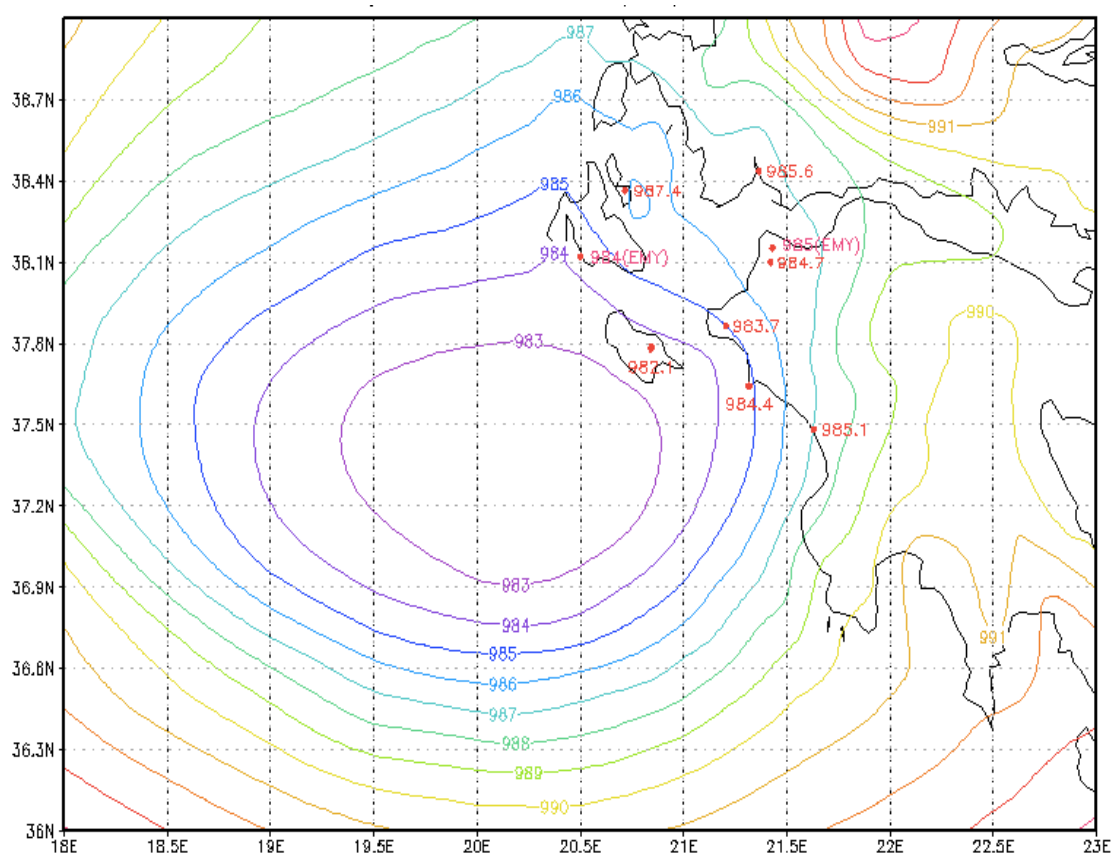
Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί πως όταν το σύστημα πλησίασε την Ελληνική επικράτεια και τα δεδομένα του ECMWF μπορούν να συγκριθούν με δεδομένα παρατηρήσεων από μετεωρολογικούς σταθμούς, τα δεδομένα του ECMWF εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις μετρήσεις των σταθμών όσον αφορά την μεταβλητή της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Συγκεκριμένα, στις 7 Φεβρουαρίου και ώρα 00:00 UTC (Σχήμα 3.2 – 3.4), χρονική στιγμή στην οποία στην περιοχή της Ζακύνθου δεν υπάρχουν επίσημες παρατηρήσεις από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, τα δεδομένα του ECMWF τοποθετούν το κέντρο του χαμηλού νοτιοδυτικά της Ζακύνθου με κέντρο 982.2 hPa. Όμως, 26 χιλιόμετρα πιο βορειανατολικά, στο νησί της Ζακύνθου, σταθμός του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ο οποίος απέχει λίγα χιλιόμετρα από το αεροδρόμιο της Ζακύνθου, καταγράφει την τιμή 982.1 hPa με άνεμο βορειοανατολικής διεύθυνσης, εντάσεως 29 Km/h (μέσος άνεμος 10λέπτου) (σχήμα 3.5), πράγμα που σημαίνει πως κάπου νοτιότερα υπάρχει αρκετά χαμηλότερη παρατηρούμενη πίεση.

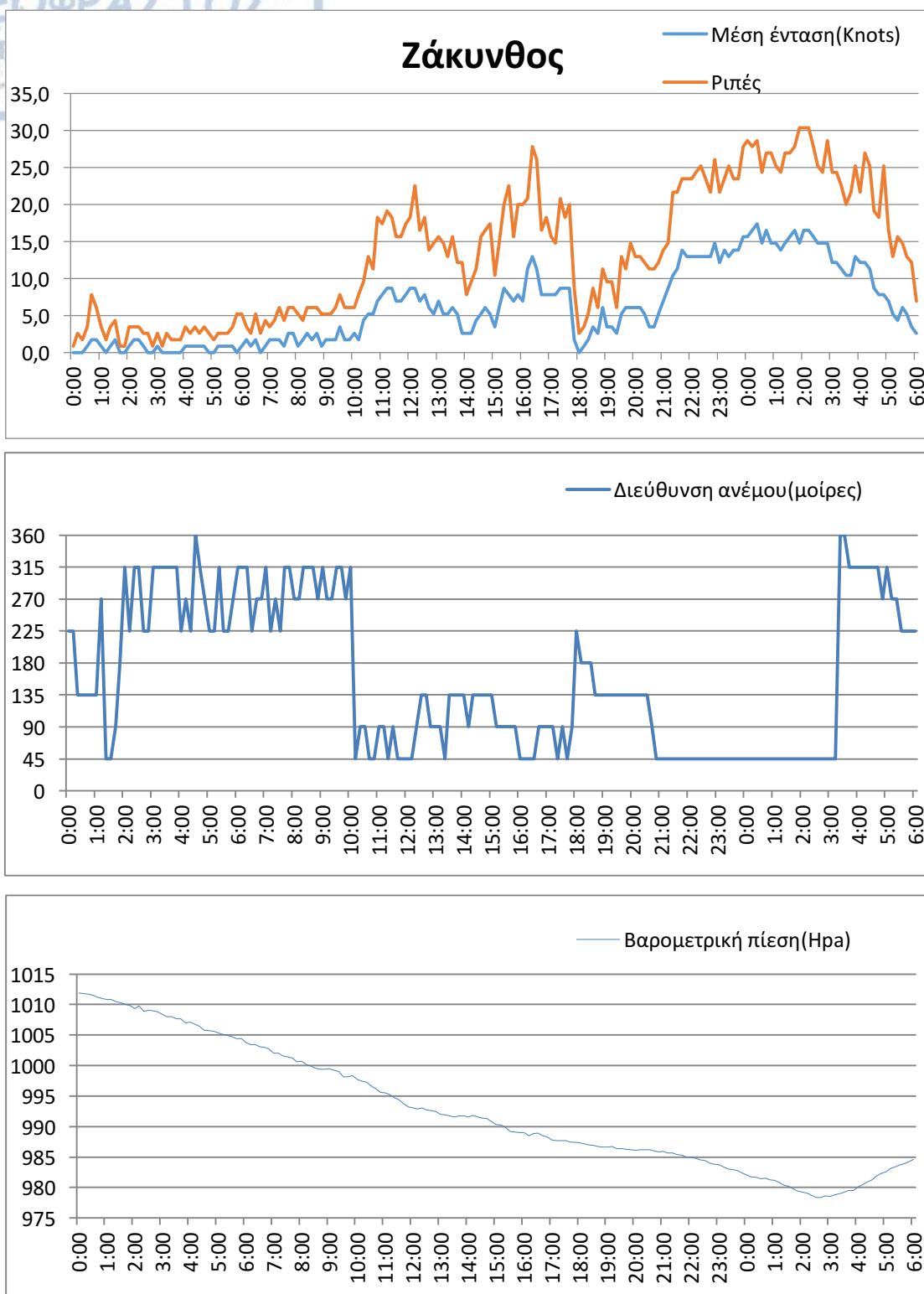
Ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός, πως από τις 02:30-02:40 UTC 7/2 στον ίδιο σταθμό, σημειώνεται η τιμή 978.4 hPa που είναι κατά πολύ μικρότερη από την ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης που εμφανίζουν τα δεδομένα του ECMWF ενώ στις 03:10 UTC (στον εν λόγω σταθμό) παρατηρείται μεταβολή στην διεύθυνση του ανέμου (σχήμα 3.5), το οποίο σημαίνει πως τοπικό κάποιο ελάχιστο πίεσης διέρχεται τη στιγμή εκείνη από την περιοχή. (Αξίζει να σημειωθεί ότι το ύψος του ανεμομέτρου του συγκεκριμένου σταθμού βρίσκεται 5 μέτρα επάνω από το έδαφος). Αφού το εν λόγω ελάχιστο πίεσης δεν οφείλεται σε ισχυρό μέτωπο (βλ. 850 hPa για 00:00-06:00 UTC 7/2), συνάγεται ότι το κέντρο της βόμβας πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή.

Από τα σχήματα 3.4 και 3.5 προκύπτουν τα ακόλουθα. Για τις ~ 02:00 UTC 7 Φεβ., οπότε και από τα πραγματικά δεδομένα της Ζακύνθου, φαίνεται πως διήλθε από τον τοπικό σταθμό ένα ελάχιστο πίεσης, το ECMWF φαίνεται να έχει υπο-εκτιμήσει το βάθος αυτού του ελαχίστου πίεσης. Αυτό φαίνεται από το γεγονός πως για τις 00:00 UTC 7 Φεβ., την πλησιέστερη ώρα, για την οποία ανάλυση του ECMWF είναι διαθέσιμη, η βαροβαθμίδα του ECMWF είναι μόνον 1 - 2 hPa από τη Ζάκυνθο έως την απέναντι ακτή της Πελοποννήσου. Την ίδια ώρα οι παρατηρούμενες εντάσεις ανέμου αγγίζουν και τους 50 κόμβους, οι οποία ταχύτητα ανέμου αντιστοιχεί σε πραγματική διαφορά πίεσης 4 hPa με την απέναντι ακτή. Άρα λοιπόν το ECMWF έχει υποεκτιμήσει τη βαροβαθμίδα και, θεωρώντας ότι οι πιέσεις στην ηπειρωτική Ελλάδα αναπαριστούνται

σωστά, συμπεραίνεται ότι το σύστημα αφομοίωσης (data assimilation) του ECMWF έχει υποεκτιμήσει κατά πολύ το βάθος της βόμβας στην περιοχή νοτιοδυτικά της Ζακύνθου. Προεκτείνοντας αυτό το λάθος χρονικά προς τα πίσω, προκύπτει πως, γενικά, το βάθος της υπό μελέτη βόμβας, άρα και η ένταση όλων των διεργασιών που σχετίστηκαν με τη δημιουργία της, είναι κατά πάσα πιθανότητα υποεκτιμημένες στο ECMWF. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στη μετ. βόμβα του Ικαρίου Πελάγους, τον Ιανουάριο του 2004 (Μπρίκας 2006, Lagouvardos et al., 2007). Οι υποεκτιμήσεις αυτές οφείλονται πιθανόν στο ότι οι μετρήσεις κάποιων σταθμών επιφανείας δε συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα αφομοίωσης του ECMWF.



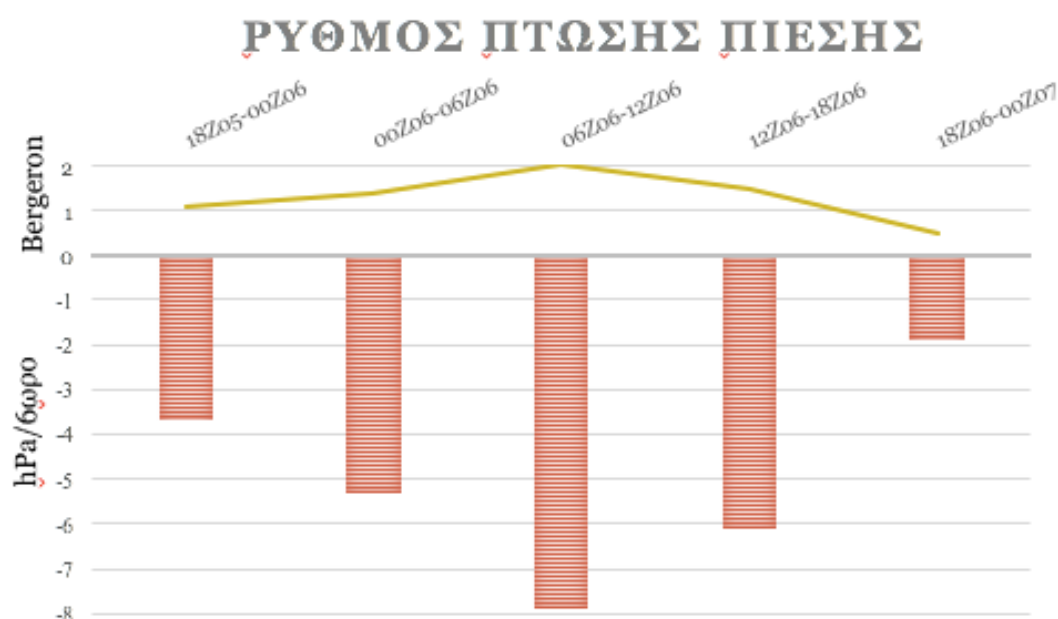
Σχήμα 3.2) Χάρτης της πίεσης στην μέση στάθμη θάλασσας από τα δεδομένα του ECMWF για τις 00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 (ισοπληθείς). Στον χάρτη αποτυπώνονται συγχρόνως και οι τιμές της βαρομετρικής πίεσης από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.3) Η ένταση(μέση ένταση 10λέπτου και δίνεται σε κόμβους όπου 1 κόμβος = 0.514 m/s), διεύθυνση, οι ριπές του ανέμου και η βαρομετρική πίεση για τον μετεωρολογικό σταθμό της Ζακύνθου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για το χρονικό διάστημα 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 έως 06UTC 07 Φεβρουαρίου 2012.



Σχήμα 3.4) Η κεντρική βαρομετρική πίεση (hPa) του συστήματος στις 5-7 Φεβρουαρίου 2012 σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF.

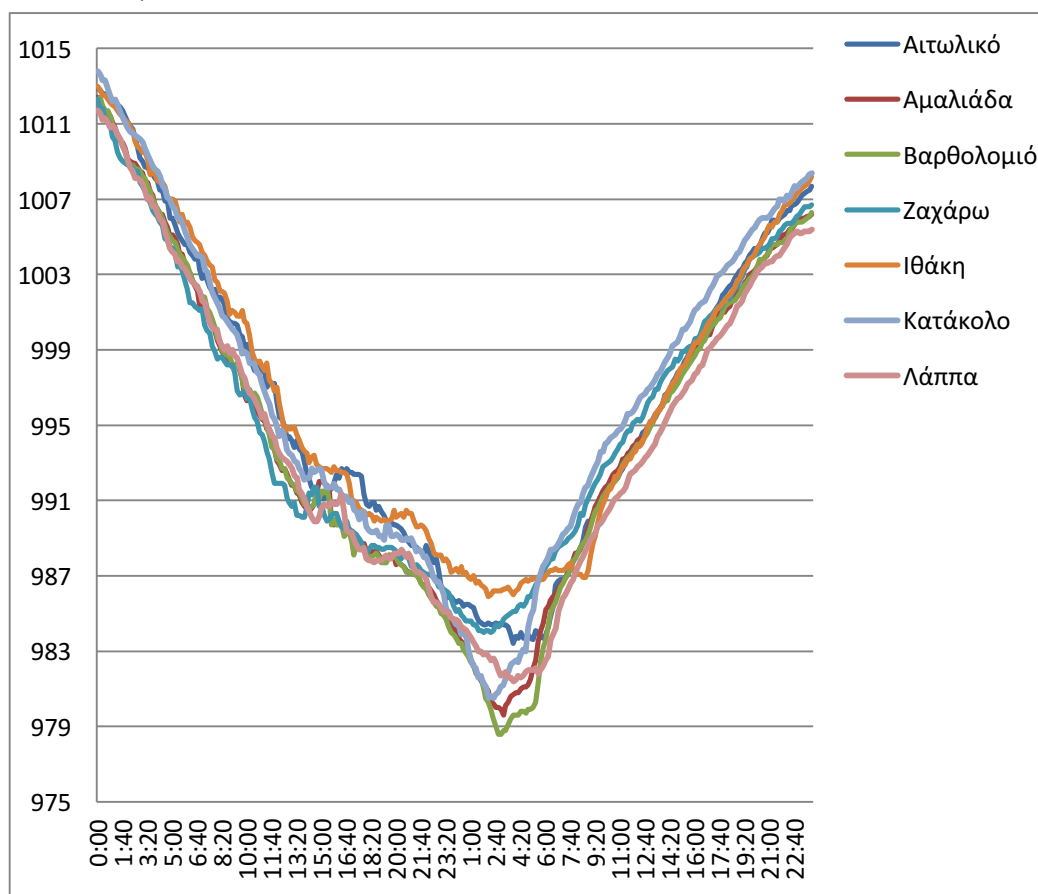


Σχήμα 3.5) Ο ρυθμός πτώσης (hPa/6h) της κεντρικής βαρομετρικής πίεσης του συστήματος ανά εξάωρο σύμφωνα με τα δεδομένα του ECMWF από τις 18 UTC (05 Φεβρουαρίου) έως τις 00 UTC (07 Φεβρουαρίου). Με πορτοκαλί συνεχή γραμμή απεικονίζεται η αντιστοιχία του ρυθμού πτώσης σε Bergeron.

3.3) Παρατηρήσεις εδάφους

3.3.1) Βαρομετρική πίεση

Επειδή το σύστημα κινήθηκε προς το Ιόνιο Πέλαγος και την ευρύτερη περιοχή της Ζακύνθου, οι χαμηλότερες τιμές βαρομετρικής πίεσης (από το δίκτυο του ΕΑΑ) καταγράφηκαν στους σταθμούς της περιοχής αυτής. Συγκεκριμένα η χαμηλότερη τιμή βαρομετρικής πίεσης καταγράφηκε στο νησί της Ζακύνθου (978.4 hPa) στις 7 Φεβρουαρίου και ώρα 02:30-02:40 UTC. Το γεγονός που κάνει αυτή την μέτρηση έγκυρη, είναι πως και η ΕΜΥ σε ένα από τα metars του αεροδρομίου της Ζακύνθου, την συγκεκριμένη χρονική περίοδο έδωσε την τιμή των 979 hPa. Το αεροδρόμιο της Ζακύνθου απέχει λίγα χιλιόμετρα από το σημείο που είναι εγκατεστημένος ο σταθμός του ΕΑΑ. Όμως μικρές τιμές βαρομετρικής πίεσης καταγράφηκαν και από άλλους σταθμούς σε άλλα νησιά του Ιονίου και στην Πελοπόννησο (σχήμα 3.6). Ενδεικτικά αναφέρονται οι ελάχιστες τιμές που κατέγραψαν οι παρακάτω σταθμοί στους νομούς Αιτωλοακαρνανίας, Ηλείας και Αχαΐας καθώς και στο νησί της Ιθάκης: Αιτωλικό (983.4 hPa), Αμαλιάδα (979.6hPa), Βαρθολομιό (978.6hPa), Ζαχάρω (984hPa), Ιθάκη (985.9 hPa), Κατάκολο (980.5 hPa), Λάππα (981.4 hPa).

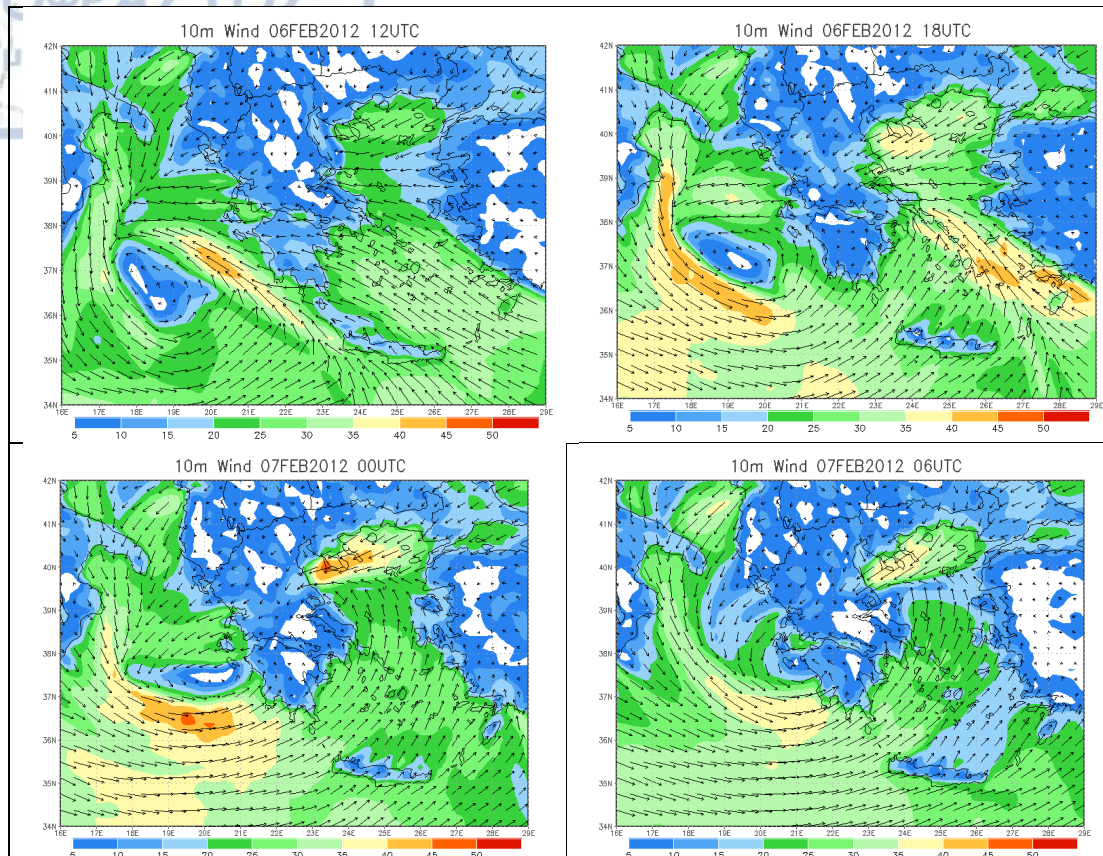


Σχήμα 3.6) Βαρομετρική πίεση στην μέση στάθμη θάλασσας σε 8 σταθμούς του ΕΑΑ.

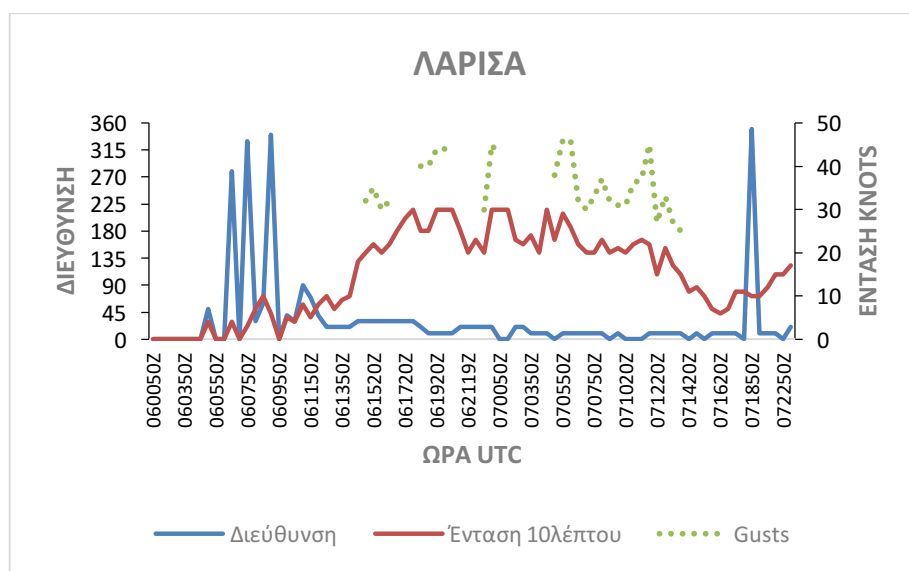
3.3.2) Άνεμος

Οι χαμηλές πιέσεις στην ανατολική Μεσόγειο, σε συνδυασμό με τις υψηλές πιέσεις στην περιοχή των Βαλκανίων και της Τουρκίας, προκάλεσαν πολύ ισχυρούς ανέμους (της τάξεως των 40-50 κόμβων) σε μεγάλο μέρος του Ιονίου και Αιγαίου πελάγους καθώς και σε πολλές ηπειρωτικές περιοχές της χώρας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF (σχήμα 3.7), στις 06 Φεβρουαρίου και ώρα 12 UTC, νοτιοανατολικοί άνεμοι εντάσεως 40-45 κόμβων, παρατηρούνται στις νότιες περιοχές του Ιονίου Πελάγους. Την ίδια ημέρα και έξι ώρες αργότερα (18UTC), το βορειοανατολικό ρεύμα στο Βόρειο Αιγαίο ενισχύεται σημαντικά (35 έως 40 κόμβους) ενώ συγχρόνως στο κεντρικό και νότιο Αιγαίο ο νοτιοανατολικός άνεμος αγγίζει τους 45 κόμβους. Στις 07 Φεβρουαρίου 00UTC, οι άνεμοι στην επιφάνεια εμφανίζουν τη μέγιστη ένταση. Συγκεκριμένα, άνεμοι εντάσεως 50 κόμβων παρατηρούνται στο βόρειο Αιγαίο και το νότιο Ιόνιο πέλαγος (Στο βόρειο Αιγαίο το ρεύμα συνεχίζει να είναι βορειοανατολικό ενώ στο νότιο Ιόνιο κυρίως δυτικό). Σε όλο το υπόλοιπο Αιγαίο οι άνεμοι αγγίζουν τους 35 κόμβους. Στις 07 Φεβρουαρίου στις 06 UTC, ενισχυμένη παραμένει η δυτική ροή στο νότιο Ιόνιο όπως και το βορειοανατολικό ρεύμα στο βόρειο Αιγαίο. Η ροή στο υπόλοιπο Αιγαίο είναι νότια-νοτιοδυτική. Τέλος, έως και τις 08 Φεβρουαρίου, ισχυρές εντάσεις ανέμου παρατηρούνται κυρίως στο βόρειο Αιγαίο λόγω του βορειοανατολικού ρεύματος.

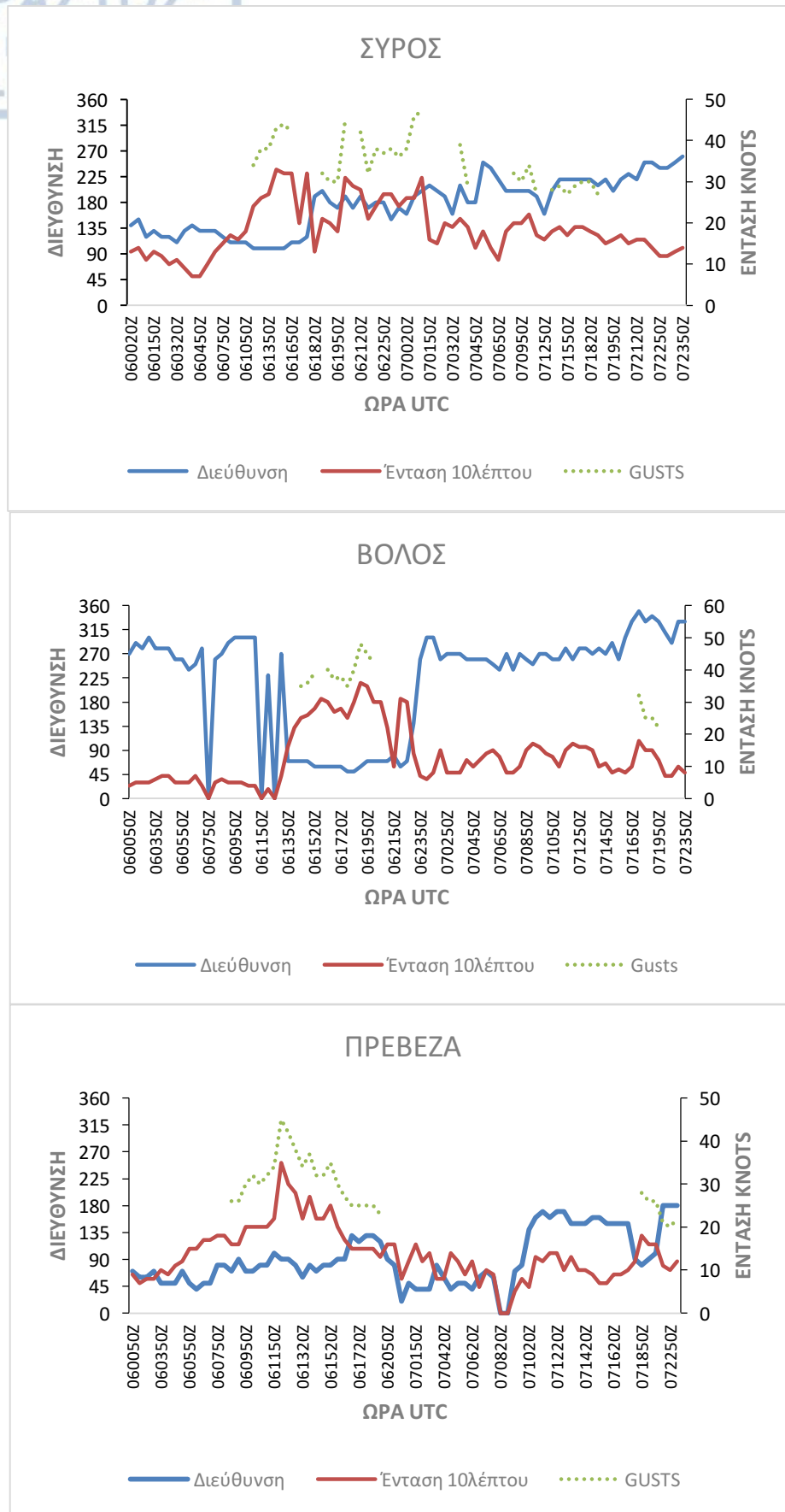
Εκτός από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF, παρατίθενται και οι σημειακές μετρήσεις του ανέμου σε 8 μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, που καλύπτουν μεγάλο μέρος της χώρας (σχήμα 3.8). Στους περισσότερους σταθμούς, ο άνεμος (ριπές ή μέση ένταση 10λέπτου) πλησιάζει ή και ξεπερνά τους 50 κόμβους ενώ και από το δίκτυο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας είναι ορατό πως το συγκεκριμένο σύστημα επηρέασε με ανέμους επιπέδου ισχυρής θύελλας το σύνολο σχεδόν του κεντρικού και βόρειου Αιγαίου προκαλώντας σημαντικές καταστροφές στις υπάρχουσες υποδομές.



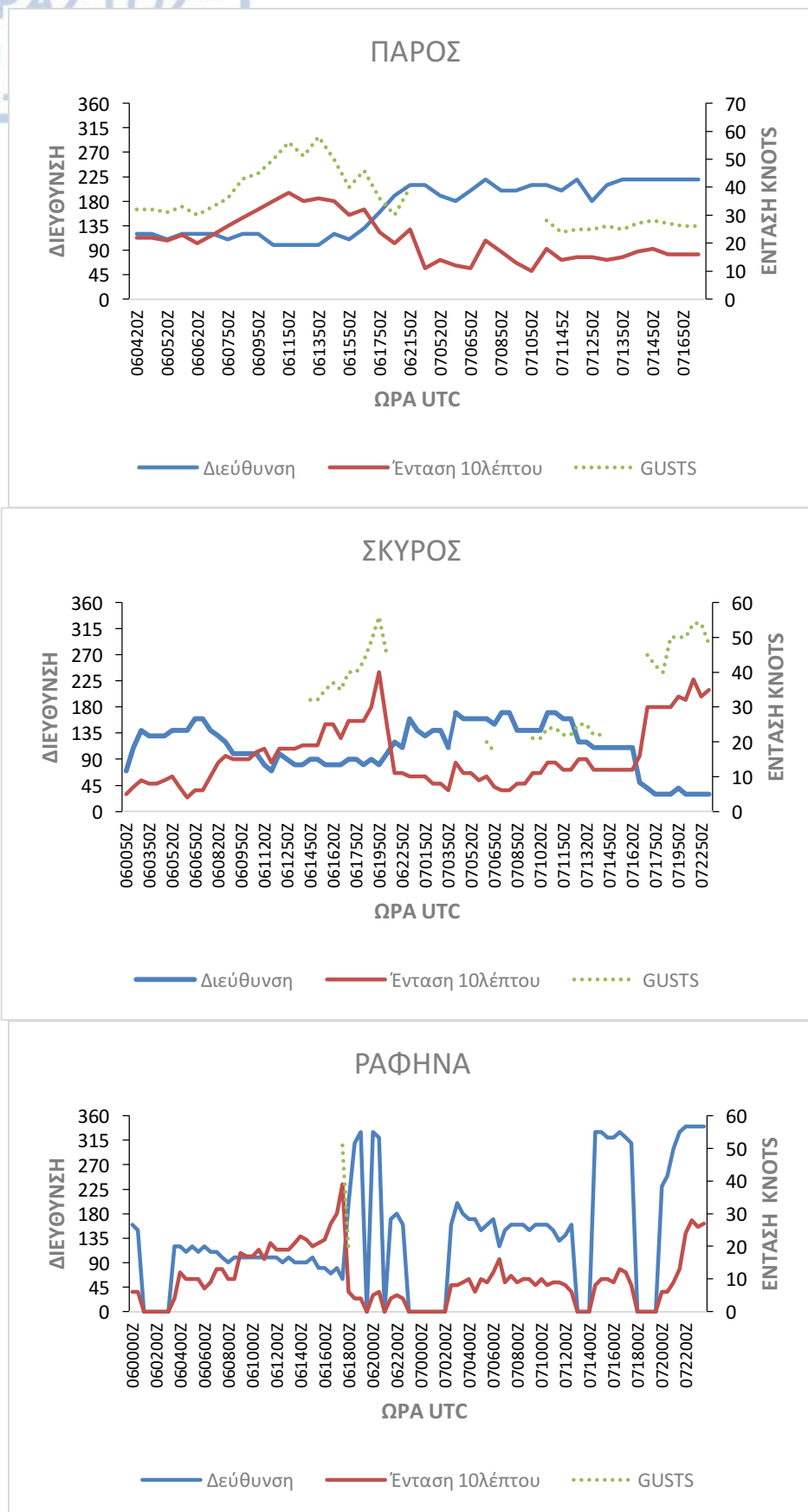
Σχήμα 3.7) Άνεμος στα 10 μέτρα (σε κόμβους) από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF σε 4 διαφορετικές χρονικές στιγμές: α) 06 Φεβρουαρίου 2012 12UTC β) 06 Φεβρουαρίου 2012 18 UTC γ) 07 Φεβρουαρίου 2012 00 UTC δ) 07 Φεβρουαρίου 2012 06 UTC.



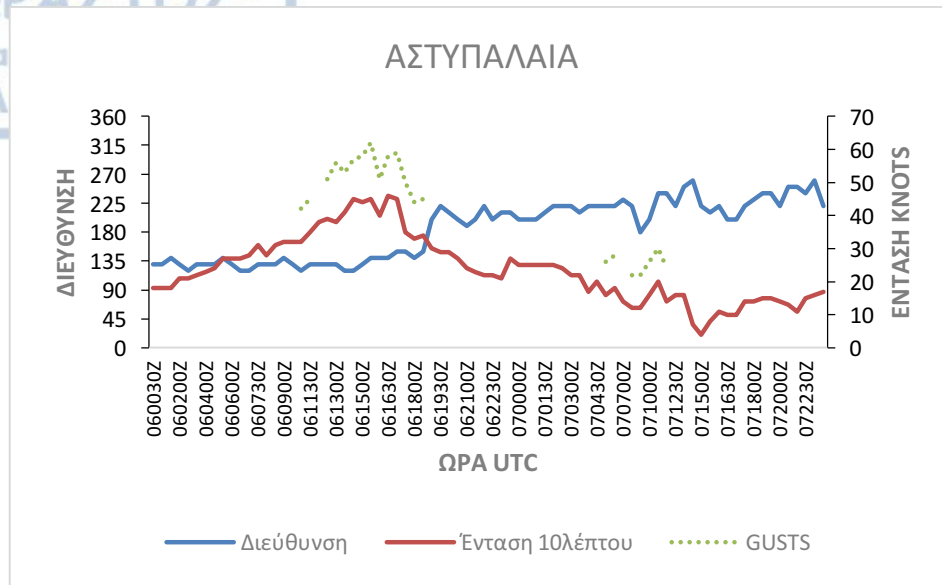
Σχήμα 3.8) Παρατηρήσεις ανέμου από μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.



Σχήμα 3.8 (Συνέχεια)



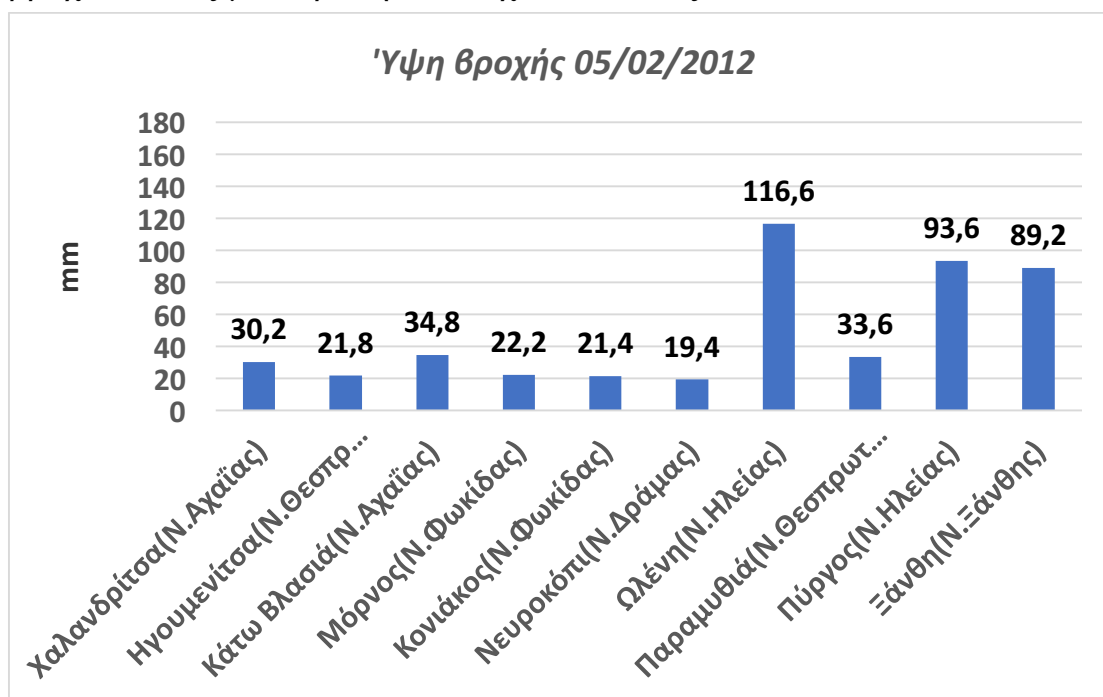
Σχήμα 3.8 (Συνέχεια)



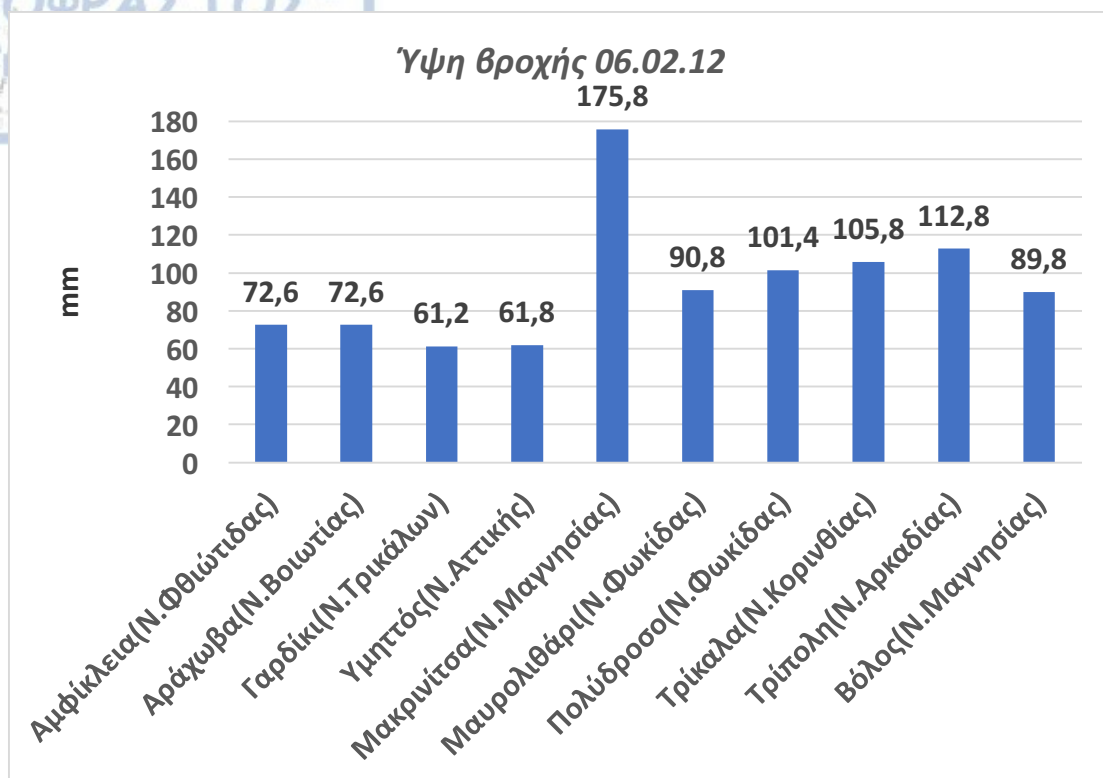
Σχήμα 3.8 (Συνέχεια)

3.4) Υετός

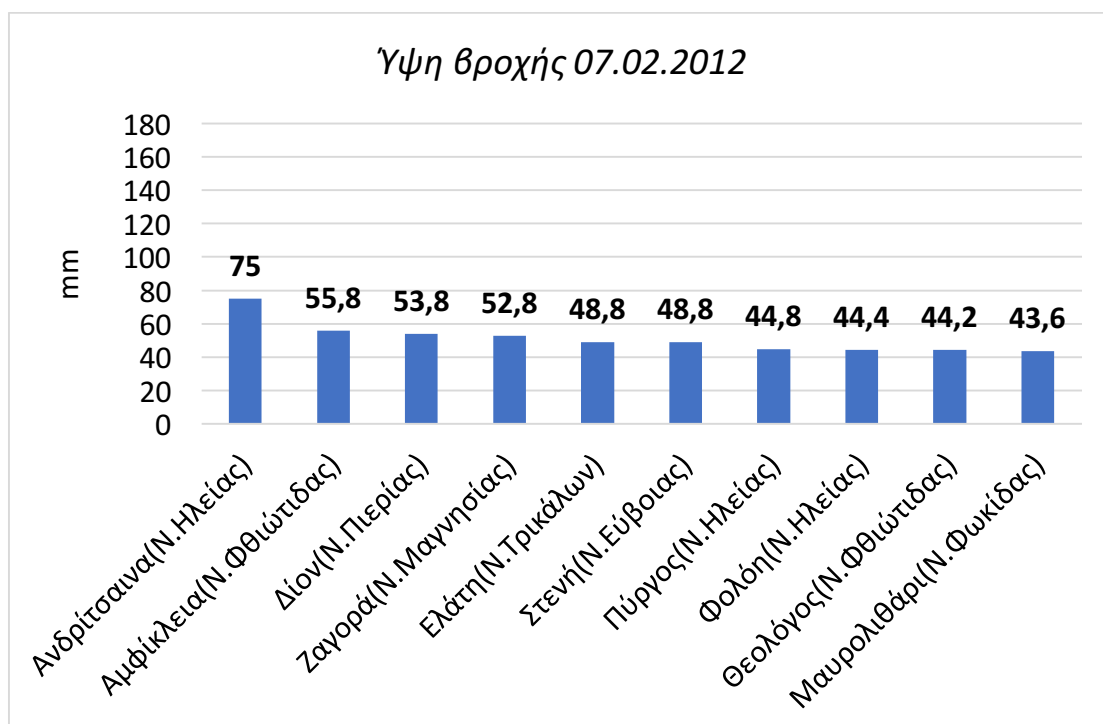
Την περίοδο 5 έως 8 Φεβρουαρίου του 2012, σημαντικά ύψη βροχής, παρατηρήθηκαν σε όλη την Ελληνική επικράτεια. Συγκεκριμένα στις 5 Φεβρουαρίου και πριν την έλευση του κυρίως βαρομετρικού χαμηλού, το νοτιοδυτικό ρεύμα στο Ιόνιο καθώς και το νότιο ρεύμα στο Αιγαίο, προκάλεσαν ανοδικές κινήσεις, με αποτέλεσμα να καταγραφούν σημαντικά ύψη βροχής στην δυτική Πελοπόννησο, την Ήπειρο καθώς και την Θράκη. Ακόμη, υετός καταγράφηκε και σε περιοχές της κεντρικής Πελοποννήσου και της Στερεάς Ελλάδας. Σύμφωνα με το δίκτυο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, τα μεγαλύτερα ύψη βροχής καταγράφηκαν στον μετεωρολογικό σταθμό Ωλένη Ηλείας με 116,6 χιλιοστά, στον Πύργο Ηλείας με 93,6 χιλιοστά και στην Ξάνθη με 89,2 χιλιοστά (σχήμα 3.9). Στις 6 Φεβρουαρίου, ημέρα που έλαβε χώρα η εκρηκτική κυκλογένεση, σημαντικές βροχοπτώσεις καταγράφηκαν σε όλη σχεδόν την ηπειρωτική Ελλάδα. Με εξαίρεση μόνο την Ήπειρο όπου ο ανατολικός-βορειοανατολικός άνεμος έδρασε ως καταβάτης. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχής σημειώθηκαν κυρίως σε περιοχές της Πελοποννήσου, της Στερεάς Ελλάδας και της Θεσσαλίας. Από τις καταγραφές του δικτύου του ΕΑΑ, την συγκεκριμένη ημέρα, ξεχωρίζει η μέτρηση στον μετεωρολογικό σταθμό της Μακρινίτσας (Νομός Μαγνησίας) με 175,8 χιλιοστά (σχήμα 3.9). Τέλος, στις 7 Φεβρουαρίου, οι βροχοπτώσεις συνεχίστηκαν στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, με εξαίρεση και πάλι την περιοχή της Ηπείρου ενώ ακόμα και σε πεδινές περιοχές της Δυτικής, Κεντρικής Μακεδονίας και Θεσσαλίας οι βροχοπτώσεις μετατράπηκαν σε χιονοπτώσεις.



Σχήμα 3.9) Δέκα περιοχές με τα μεγαλύτερα ύψη βροχής ανά ημέρα σύμφωνα με το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

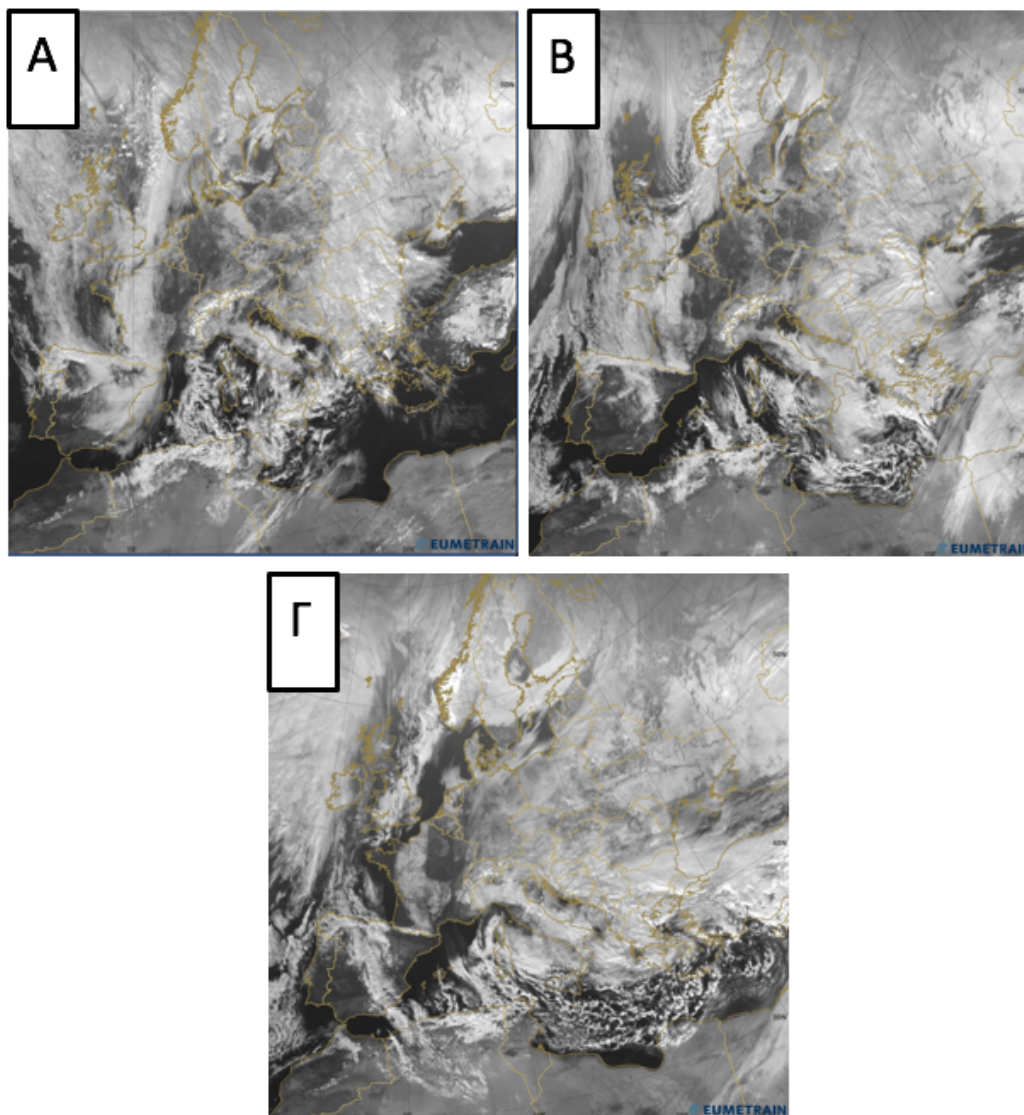


Σχήμα 3.9 (Συνέχεια)

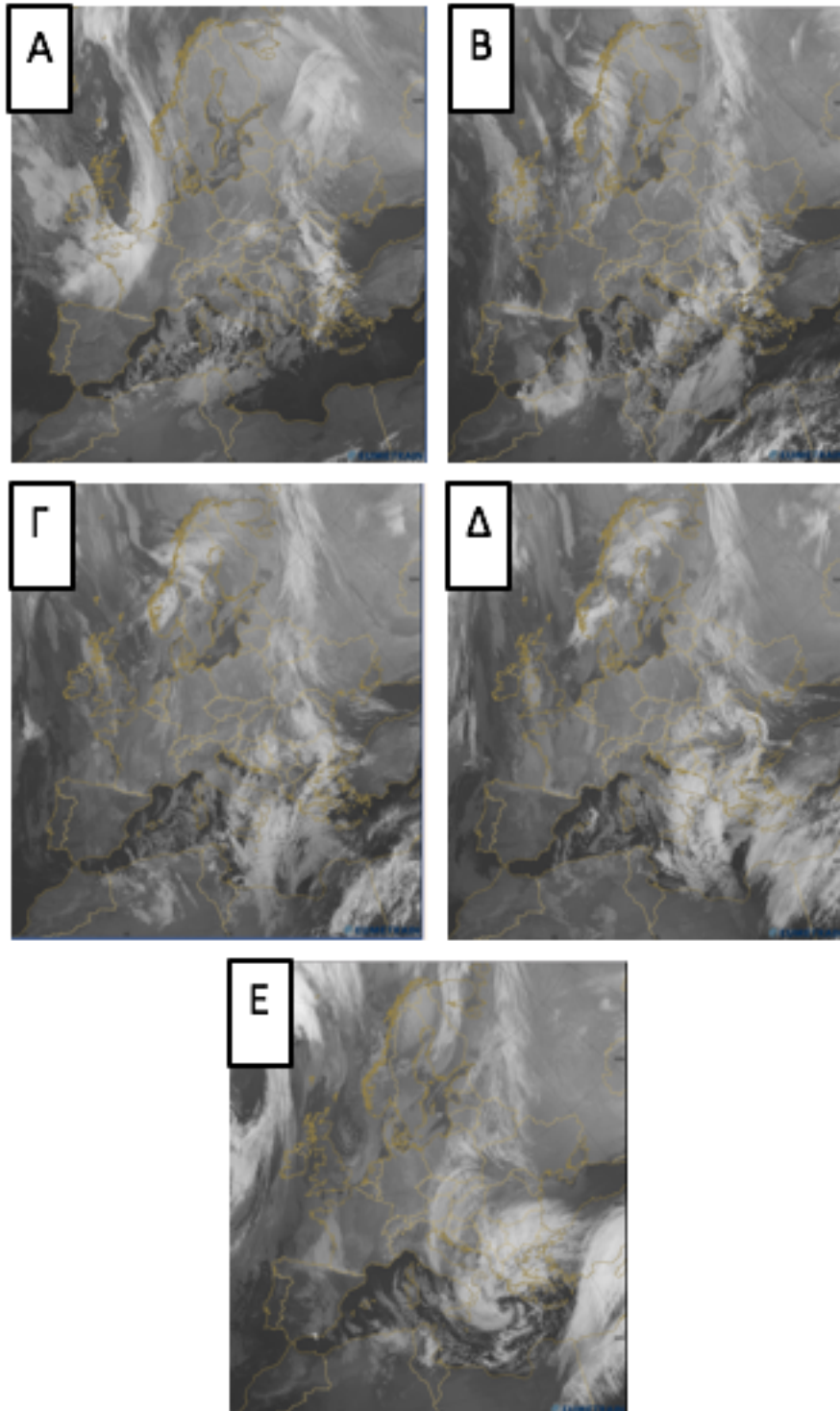


Σχήμα 3.9 (Συνέχεια)

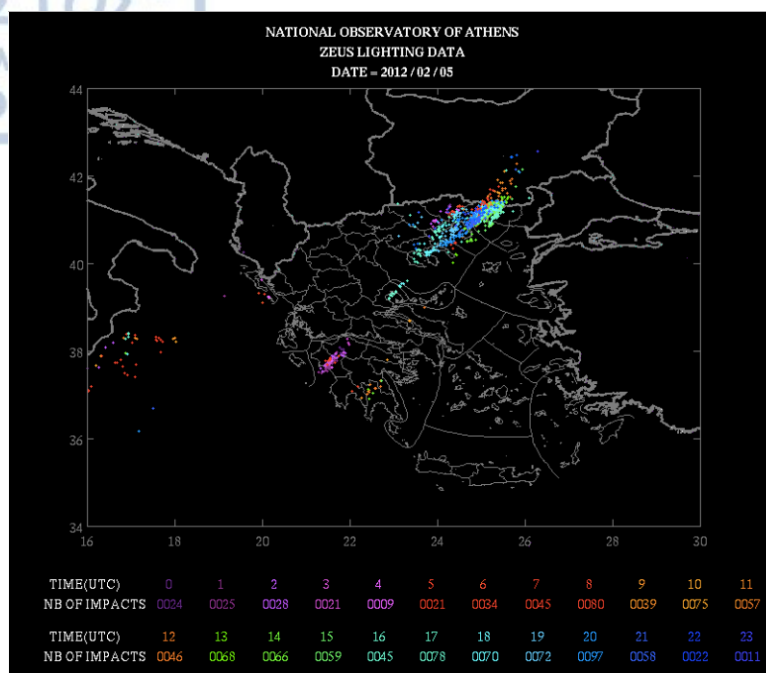
Σύμφωνα και με τις δορυφορικές εικόνες ορατού και υπερύθρου (10.8 μm) (σχήματα 3.10 και 3.11) 18 περίπου ώρες πριν την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης παρατηρείται κυκλωνική κυκλοφορία στην κεντρικά και δυτικά τμήματα της Μεσογείου, με κέντρο την ευρύτερη περιοχή της Σαρδηνίας, η οποία αποδίδει κυρίως μεσαία και υψηλά νέφη, από ό,τι συμπεραίνεται από την υφή των νεφών στη δορυφορική φωτογραφία. Στην Ελληνική επικράτεια είναι ορατή η καταιγιδοφόρος δραστηριότητα (σχ. 3.12) στα δυτικότερα κυρίως τμήματα της Πελοποννήσου αλλά και σε περιοχές της Θράκης, από ό,τι συμπεραίνεται από την «ανάγλυφη» υφή των νεφών εκεί κατά τις αντίστοιχες ώρες. Κατά την διάρκεια της 5^{ης} Φεβρουαρίου η διαταραχή στην περιοχή της δυτικής-κεντρικής Μεσογείου επεκτείνεται ανατολικότερα με αποτέλεσμα σταδιακά μεσαία και υψηλά νέφη να κάνουν την εμφάνιση τους και σε πολλές περιοχές της Ελλάδος. Η Θράκη λόγω του ενισχυμένου νοτίου ρεύματος, συνέχισε έως και τις νυχτερινές ώρες της 5^{ης} Φεβρουαρίου να δέχεται έντονες βροχές και καταιγίδες, από ό,τι προκύπτει και από αναφορές επιφανείας. Από τις 05 Φεβρουαρίου και ώρα 18UTC έως και τις 06 Φεβρουαρίου και ώρα 00Z, δηλαδή το πρώτο εξάωρο της εκρηκτικής κυκλογένεσης, τα αβαθή και μεμονωμένα συστήματα χαμηλών πιέσεων που παρατηρούνται στην περιοχή της κεντρικής- βόρειας Λιβύης δεν συνδέονται με κάποιο σαφή νεφικό σχηματισμό. Σε αυτό το διάστημα τα μεσαία και υψηλά νέφη που παρατηρούνται στην κεντρική Μεσόγειο είναι αποτέλεσμα της διαταραχής στην περιοχή της Σικελίας αλλά και του θερμού μετώπου το οποίο εκτείνεται σε ένα μεγάλο κομμάτι της κεντρικής Μεσογείου. Οι μεμονωμένοι και ρηχοί στρόβιλοι στην περιοχή της κεντρικής Λιβύης στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου, αποκτούν μία πιο ξεκάθαρη δομή 6 ώρες αργότερα αλλά και πάλι δεν συνοδεύονται από συμπυκνώσεις υδρατμών. Ο στρόβιλος αποκτά σημαντική επέκταση στην Τροπόσφαιρα από τις 06UTC 06 Φεβρουαρίου έως και το τέλος της ημέρας. Στις 06 UTC παρατηρούνται εκτεταμένες νεφώσεις σε όλο σχεδόν τον Ελληνικό χώρο, οι οποίες συνδέονται με την παρουσία του θερμού μετώπου του συστήματος στο ύψος της κεντρικής ηπειρωτικής Ελλάδας. Στις 12UTC μία ζώνη νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης εντοπίζεται από το Νότιο Ιόνιο έως και τα δυτικότερα τμήματα της Κρήτης η οποία υποδεικνύει την θέση του ψυχρού μετώπου την στιγμή που το θερμό μέτωπο εντοπίζεται στην Βόρεια Ελλάδα. Τέλος από τις 18UTC και έπειτα το σύστημα μετατρέπεται σε συνεσφιγμένη μετωπική ύφεση.



Σχήμα 3.10) Δορυφορικές εικόνες στο ορατό ($0.6 \mu\text{m}$) για τις α) 12UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 β) 12UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 γ) 12UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 (πηγή Eumetsat).



Σχήμα 3.11) Δορυφορικές εικόνες στο υπέρυθρο 10.8 μm για τις α) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 00UTC β) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 18UTC γ) 06 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 00UTC δ) 06 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 06UTC ε) 06 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 18 UTC (πηγή Eumetsat).



Σχήμα 3.12) Χάρτης αστραπών για τις 05 Φεβρουαρίου 2012(Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1) Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί το συνοπτικό περιβάλλον της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5, 6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012. Για να συμβεί αυτό μελετάται με χρονική ευκρίνεια 6 ωρών το προκυκλογενετικό περιβάλλον του φαινομένου (04 Φεβρουαρίου 2012 στις 00 UTC έως 05 Φεβρουαρίου 2012 στις 18 UTC), η κύρια περίοδος της εκρηκτικής κυκλογένεσης (05 Φεβρουαρίου 2012 στις 18 UTC έως 06 Φεβρουαρίου 2012 στις 18 UTC) καθώς και η περίοδος της κυκλόλυσης (07 Φεβρουαρίου 2012 στις 00 UTC έως 07 Φεβρουαρίου 2012 στις 12 UTC). Για την ανάλυση αυτή, παρατίθενται αρχικά οι χάρτες της πίεσης στην μέση στάθμη θάλασσας, η θερμική μεταφορά στα 850hPa, οι χάρτες ανέμου και γεωδυναμικού ύψους στην ισοβαρική επιφάνεια των 300hPa, η θερμική μεταφορά και ο σχετικός στροβιλισμός στα 500hPa, καθώς και η θερμοκρασία και το γεωδυναμικό ύψος στα 500hPa και 850hPa.

4.2) Προκυκλογενετική περίοδος (00UTC 04 Φεβρουαρίου 2012-18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012)

A) Γενικά:

Μέση στάθμη θάλασσας (Mean Sea Level, MSL): Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου, όπως φαίνεται και από τις αναλύσεις της Βρετανικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας στους χάρτες πίεσης στην μέση στάθμη θάλασσας (σχήμα 4.1) στην περιοχή της κεντρο-ανατολικής Ευρώπης εδρεύει ένας αρκετά ισχυρός αντικυκλώνας. Το συγκεκριμένο γεγονός έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο κομμάτι της βόρειας Ευρώπης, της Σκανδιναβίας και της Ρωσίας να εμφανίζει πιέσεις μεγαλύτερες από 1040hPa. Παράλληλα ένα αρκετά ισχυρό αντικυκλωνικό κέντρο εμφανίζεται και στην δυτική-βορειοδυτική Ευρώπη. Αντίθετα η περιοχή της Μεσογείου αποτελεί ζώνη χαμηλών πιέσεων με κύριο χαρακτηριστικό τις μεγάλες τιμές βαροβαθμίδας στα βόρεια σύνορα της καθώς και την ύπαρξη υφέσεων στο εσωτερικό της οι οποίες συνοδεύονται από έντονη μετωπική δραστηριότητα.

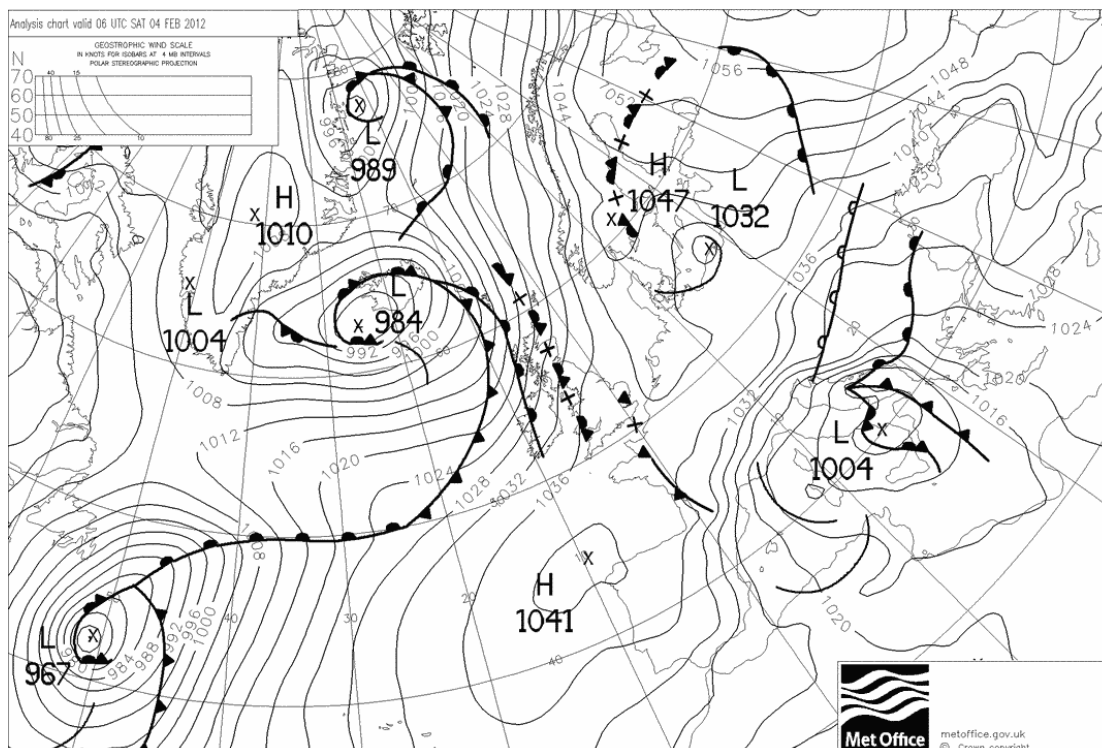
Μέση Τροπόσφαιρα: Στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa (σχήμα 4.2), την συγκεκριμένη περίοδο απεικονίζεται ένας μεγάλου μήκους κύματος αυλώνας, ο οποίος εκτείνεται από την περιοχή της Σκανδιναβίας έως τα δυτικότερα τμήματα της Μεσογείου. Ο συγκεκριμένος αυλώνας αποτελείται από δύο κέντρα, ένα στην περιοχή μεταξύ της Σκανδιναβίας και της βόρειας Ρωσίας και ένα άλλο στην ευρύτερη περιοχή της νότιας Γαλλίας και Ιταλίας. Παράλληλα με τον αυλώνα, στο σχήμα 4.2, κατά τη διάρκεια της περιόδου 06 UTC 4 – 06 UTC 5 Φεβρουαρίου, διακρίνεται και η μεγέθυνση (amplification) της ήδη υπάρχουσας ράχης (ridge) στον Ατλαντικό, η οποία από την μία μπλοκάρει την δυτική ροή ενώ συγχρόνως με την επέκτασή της, ωθεί τον αυλώνα προς μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Απόρροια της παραπάνω διαδικασίας είναι η καθαρά σχηματισμένη μεσημβρινή κυκλοφορία στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης. Κατά τη διάρκεια της προκυκλογενετικής περιόδου, ο μεγάλου μήκους κύματος αυλώνας βαθαίνει λόγω της ψυχρής μεταφοράς, που συντελείται από την ψυχρή «δεξαμενή» στην περιοχή της Σκανδιναβίας, ενώ συγχρόνως αποκτά ένα πιο «αιχμηρό» σχήμα, που, όπως θα φανεί παρακάτω, σχετίζεται με τη διασταύρωση πολικού – υποτροπικού αεροχειμάρρου, που έλαβε χώρα στο τέλος της περιόδου αυτής.

Κατώτερη Τροπόσφαιρα: Στα 850hPa (σχήμα 4.3) αέριες μάζες με θερμοκρασίες μικρότερες των -12°C επικρατούν στο σύνολο της κεντρικής, βόρειας αλλά και ανατολικής Ευρώπης. Όσον αφορά τη Μεσόγειο, στο δυτικό κομμάτι επικρατούν πολικές αέριες μάζες με θερμοκρασίες έως και -10°C ενώ στο δυτικό κυριαρχούν κατά πολύ θερμότερες ($T_{850} > 0^{\circ}\text{C}$). Η θερμή «γλώσσα» από την Αφρική που εισχωρεί στην ανατολική Μεσόγειο, τα νότια Βαλκάνια και την Τουρκία, σε συνδυασμό με τις πολικές αέριες στο δυτικό τμήμα της Μεσογείου, ενισχύουν τη βαροκλινικότητα, η οποία αποτελεί ένα από τα βασικότερα αίτια δημιουργίας της ύφεσης στις 05-06 Φεβρουαρίου 2012, η οποία εν τέλει θα εξελιχθεί με «εκρηκτικό ρυθμό». Αναφορικά με τα γεωδυναμικά ύψη, η δομή του αντικυκλώνα στον Ατλαντικό Ωκεανό αποτυπώνεται και στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa. Ενώ, τέλος, στη Μεσόγειο, ακόμα και 18 ώρες πριν την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης, στις 18UTC 5/2 (σχ. 4.3A), είναι ορατό ένα εξασθενημένο κέντρο χαμηλών υψών το οποίο «κατευθύνει» τις πολύ ψυχρές αέριες μάζες της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης στη Μεσόγειο, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη θερμοβαθμίδα μεταξύ ανατολικής και δυτικής Μεσογείου.

Συνθέτοντας τα παραπάνω, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η ροή κατά την προκυκλογενετική περίοδο χαρακτηρίζεται από έναν Ευρωπαϊκό εμποδισμό (European blocking), προσανατολισμένο, όμως, από ΒΑ προς ΝΔ, με τρόπο που να κατευθύνει τις ψυχρές μάζες της Ρωσίας/Σιβηρίας προς την Κεντρική Ευρώπη – Δυτική Μεσόγειο. Αυτό φαίνεται πιο

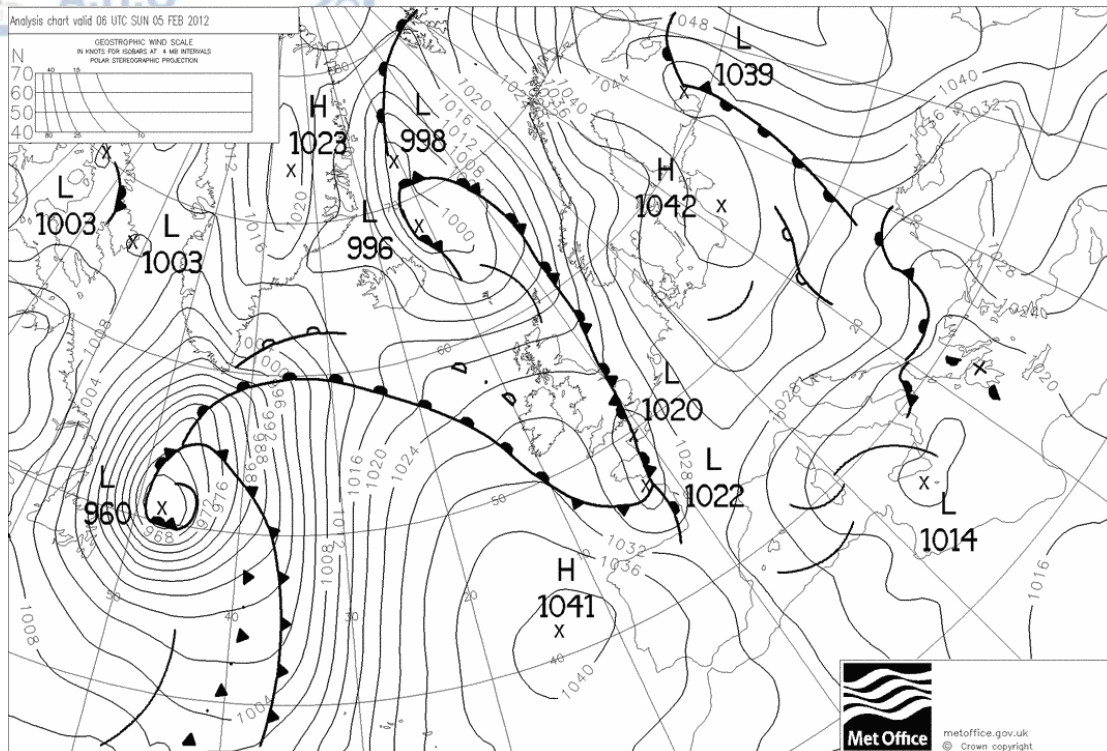
καθαρά με τη χρήση διαδοχικών χαρτών, οι οποίοι δεν παρουσιάζονται, χάριν συντομίας.

(α)

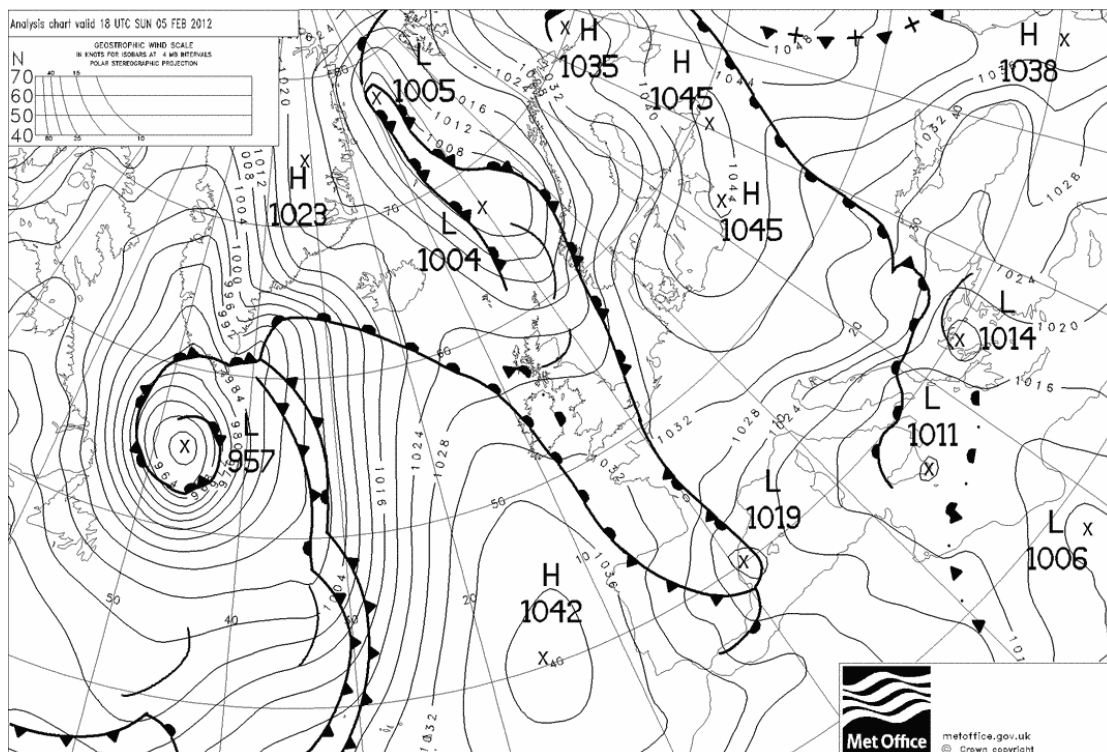


Σχήμα 4.1) Ανάλυση της πίεσης (hPa) στην μέση στάθμη θάλασσας από την Βρετανική Μετεωρολογική υπηρεσία για τις α) 06UTC 04 Φεβρουαρίου 2012 β) 06UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 και γ) 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012

(β)

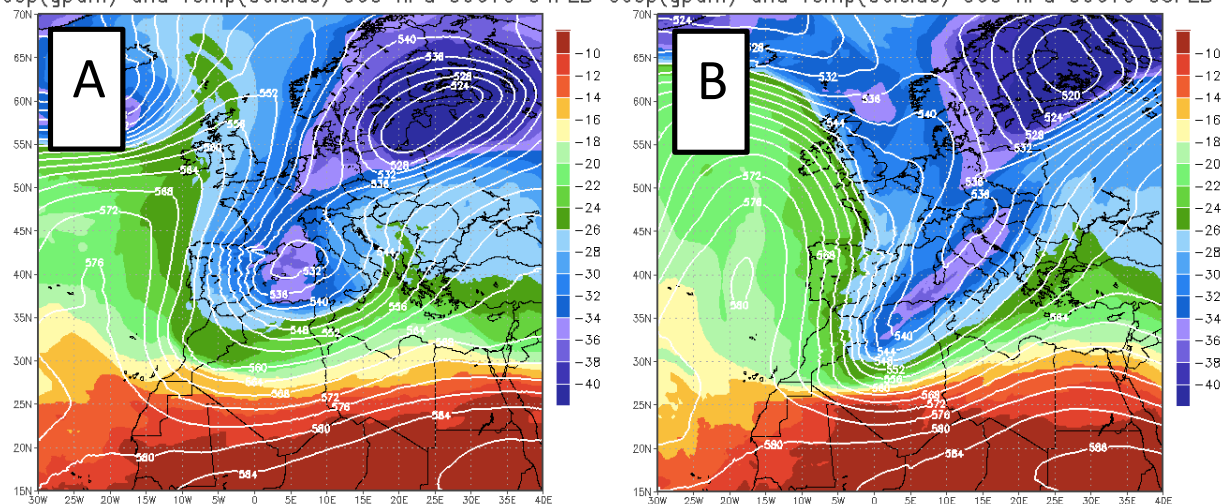


(γ)

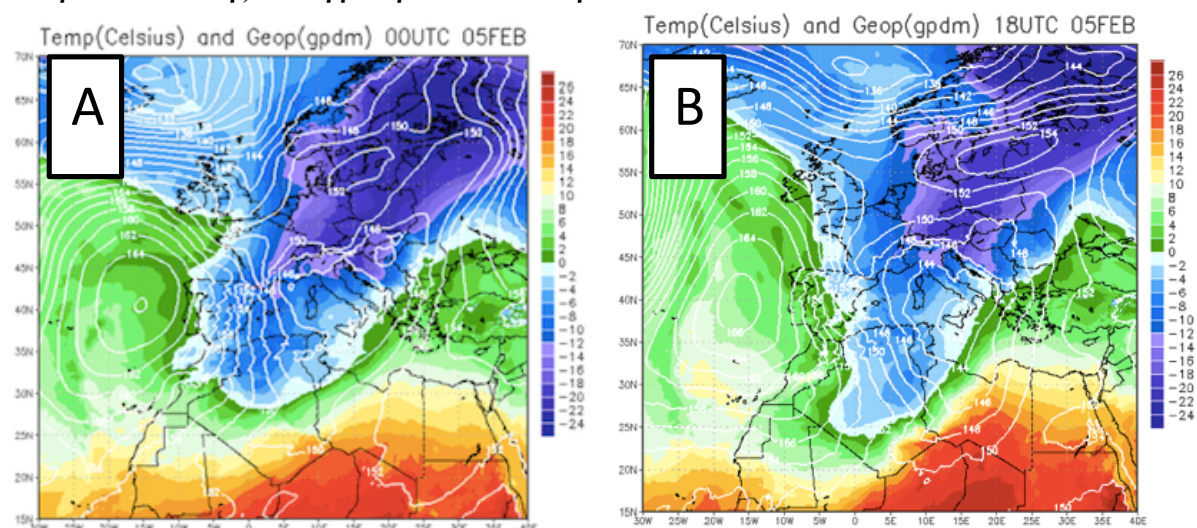


Σχήμα 4.1)(συνέχεια)

Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 06UTC 04FEB Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 06UTC 05FEB



Σχήμα 4.2) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και της θερμοκρασίας για την ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την α) 04 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 06UTC και β) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 06Z.



Σχήμα 4.3) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και της Θερμοκρασίας για την ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την α) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 00UTC και β) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 18Z.

4.2.1) Κρίσιμα σημεία της συνοπτικής μελέτης (Προκυκλογενετική περίοδος)

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφούν τα σημαντικότερα γεγονότα της προκυκλογενετικής περιόδου τα οποία σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην έναρξη αλλά και εξέλιξη της ύφεσης στις 05-06 Φεβρουαρίου 2012.

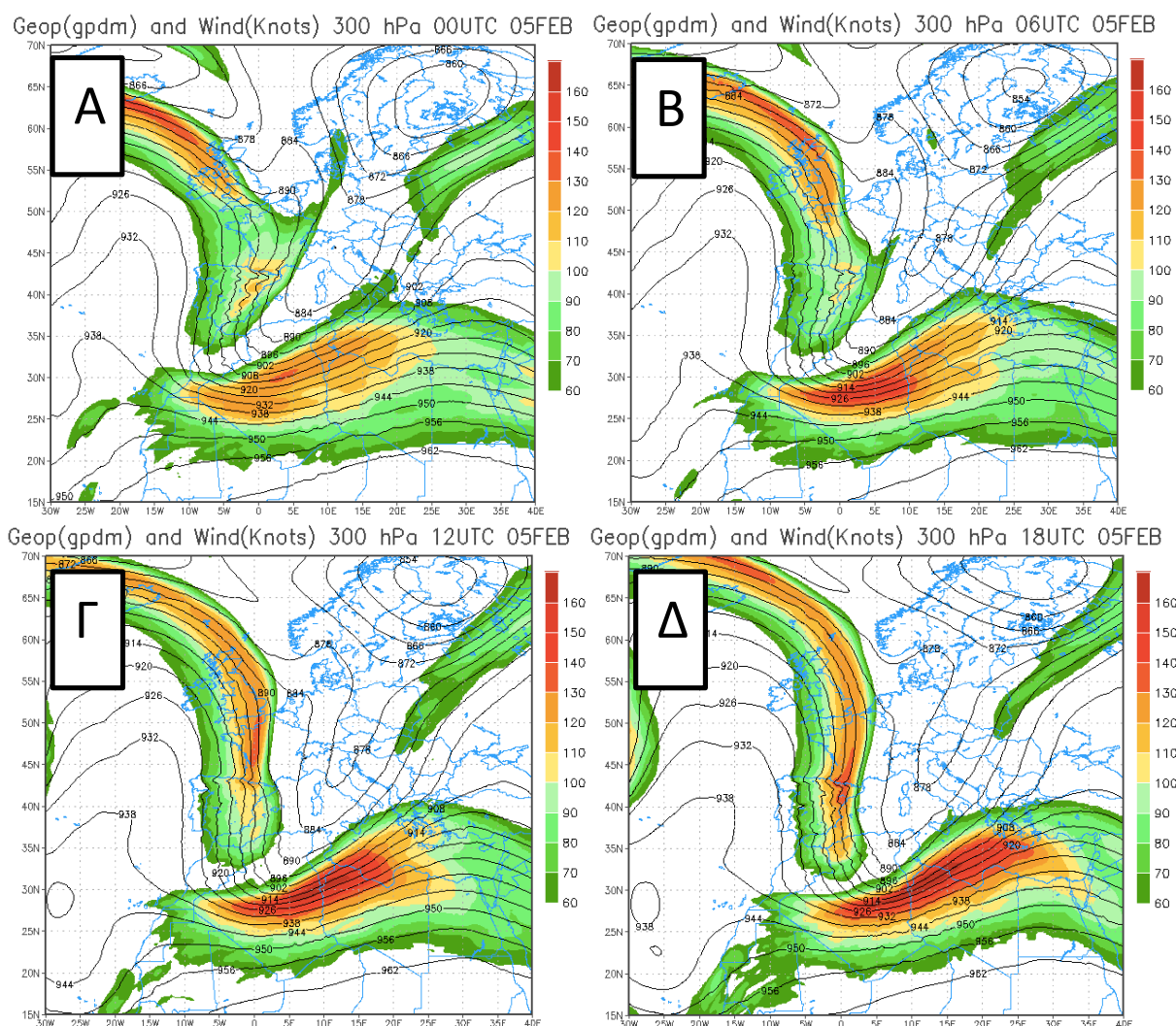
4.2.1.α) Κατώτερη Τροπόσφαιρα

Μία ημέρα πριν από την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης και συγκεκριμένα στις 05 Φεβρουαρίου 2012, ο αντικυκλώνας των Αζορών επεκτείνεται ανατολικότερα, προς τις περιοχές της βόρειας Αφρικής. Παράλληλα, την χρονική περίοδο 00-18UTC στις 05 Φεβρουαρίου 2012, το χαμηλό των υψών το οποίο εντοπίζεται πάνω από την Ιταλία και αποτυπώνεται στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa, βαθαίνει κατά 40 γεωδυναμικά δεκάμετρα μέσα σε ένα διάστημα 18 ωρών (σχήμα 4.3). Η ισχυροποίηση του συγκεκριμένου συστήματος η οποία ενισχύει την μεταφορά ψυχρού αέρα προς την Μεσόγειο και την βορειοδυτική Αφρική σε συνδυασμό με την επέκταση του Αζορικού αντικυκλώνα ανατολικότερα οδηγεί σε αύξηση των τιμών βαροβαθμίδας και θερμοβαθμίδας επάνω από την κεντρική και βόρεια Αφρική. Άμεσο αποτέλεσμα της παραπάνω κυκλοφορίας είναι η ενίσχυση του κυκλωνικού στροβιλισμού στα χαμηλότερα τμήματα της Τροπόσφαιρας γεγονός που σύμφωνα με την μελέτη των Karacostas et. al. (2014) αποτελεί σημαντική συνθήκη για την «επικοινωνία» του τμήματος αυτού της τροπόσφαιρας με τις κυκλωνικές διαταραχές της ανώτερης τροπόσφαιρας.

4.2.1.β) Μέση και ανώτερη Τροπόσφαιρα

Σύμφωνα με τις αναλύσεις του ECMWF, στην ισοβαρική επιφάνεια των 300hPa, από την αρχή της 5^{ης} Φεβρουαρίου έως και την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης παρατηρείται μία συνεχή εξάπλωση της ράχης (ridge) στον Ατλαντικό Ωκεανό προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Η κίνηση αυτή του Atlantic Ridge εξαναγκάζει τον μεγάλο μήκους κύματος αυλώνα να επεκταθεί προς τα νοτιοδυτικά, «σκάβοντας» με αυτόν τον τρόπο τα μεγάλα γεωδυναμικά ύψη που επικρατούν επάνω από την βορειοδυτική Αφρική. Αξίζει να σημειωθεί πως την συγκεκριμένη περίοδο ο αυλώνας δε βαθαίνει περισσότερο αλλά αποκτά ένα πιο «αιχμηρό» σχήμα. Αυτό, μέσω της αύξησης της καμπυλότητας, αντιστοιχεί σε αύξηση του στροβιλισμού στα ανώτερα, αλλά και στα υποκείμενα μέσα στρώματα της τροπόσφαιρας.

Η παραπάνω κυκλοφορία οδηγεί σε ενίσχυση της βαθμίδας των υψών επάνω από την βορειοδυτική Αφρική, γεγονός που ενδυναμώνει το μέγιστο αεροχειμάρρου στην ανώτερη τροπόσφαιρα, το οποίο στην συνέχεια μέσω των αγεωστροφικών κυκλοφοριών που εισαγάγει θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ύφεσης. Σύμφωνα με τους χάρτες ανέμου στα 300 hPa (σχήμα 4.4), μέσα σε ένα χρονικό διάστημα 12 ωρών (00UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 έως 12UTC 05 Φεβρουαρίου 2012) το μέγιστο αεροχειμάρρου (jet streak) ενισχύθηκε κατά 30-40 κόμβους.



Σχήμα 4.4) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και του ανέμου για την ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την α) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 00UTC β) 06UTC γ) 12UTC δ) 18Z.

Όπως απεικονίζεται και στους χάρτες του σχήματος 4.4, ο υποτροπικός αεροχείμαρρος εντοπίζεται στις $\sim 30^\circ\text{B}$, βορειότερα κατά $\sim 5^\circ$ της κλιματολογικής του θέσης ($\sim 25^\circ\text{B}$) (Lin et al. 2009), για την εποχή και διανύει όλη σχεδόν την βόρεια ακτογραμμή της Αφρικής, φθάνοντας έως και τα νότια της Ελλάδας. Επομένως, η ταυτόχρονη ύπαρξη του

υποτροπικού αεροχειμάρρου με τον πολικό αεροχείμαρρο στην περιοχή της βορειοδυτικής Αφρικής δίνει στη διαταραχή αυτή μία σημαντική διάσταση. Πράγματι, όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 7, το «αιχμηρό» σχήμα της trough και η σημαντική ενίσχυση του αεροχειμάρρου, κατά την προκυκλογενετική περίοδο, σχετίζεται άμεσα με τη 'διασταύρωση' των δύο αεροχειμάρρων upstream (δυτικά) της περιοχής όπου άρχισε η εκρηκτική κυκλογένεση.

4.3) Περίοδος της εκρηκτικής κυκλογένεσης (18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 - 00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012)

Στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 και στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa η ράχη που εμφανίζεται στον Ατλαντικό Ωκεανό συνεχίζει να επεκτείνεται προς τα βόρεια, τη στιγμή που ο μεγάλου μήκους κύματος αυλώνας, ο οποίος συνεχίζει να έχει θετική (από ΒΑ προς ΝΔ) κλίση (σχ. 4.5), κινείται προς τα ανατολικά. Σημαντικό σημείο αποτελεί η εκ νέου ενίσχυση της βαθμίδας των υψών επάνω από την βόρεια Αφρική, που έχει ως συνέπεια την περαιτέρω ενίσχυση του jet streak στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Στην επιφάνεια, τα πρώτα κέντρα χαμηλών πιέσεων (σχ. 4.6) κάνουν την εμφάνισή τους στην περιοχή της κεντρικής και νότιας Λιβύης. Τα χαμηλά αυτά είναι μεμονωμένα, αβαθή, αναπτύσσονται όλα κατά μήκος της ίδιας μετωπικής επιφάνειας και δε συνδέονται με τις νεφώσεις στην περιοχή. Όμως, από τα παρακάτω θα καταστεί φανερό, ότι τα χαμηλά αυτά είναι οι προάγγελοι της ‘μετ. βόμβας’.

Στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (σχ. 4.5β) συνεχίζεται η επέκταση του αυλώνα προς την ανατολική Μεσόγειο, έχοντας πλέον ελαφρά θετική έως μηδενική κλίση. Στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa (σχ.4.7) το μέτωπο το οποίο εκτείνεται από την Αδριατική θάλασσα έως και την νότια Λιβύη ενισχύεται ιδιαίτερα κυρίως στην νότια Μεσόγειο και την Λιβύη λόγω της περαιτέρω ενίσχυσης του χαμηλού των υψών στην περιοχή της Σικελίας (60 grdm σε 24 ώρες). Επιπλέον στην επιφάνεια εμφανίζεται ένα πιο οργανωμένο σύστημα χαμηλών πιέσεων στον κόλπο της Σύρτης (σχ. 4.6) το οποίο συνεχίζει όμως να έχει μικρή κατακόρυφη έκταση και εξακολουθεί να μην συνδέεται με τις νεφώσεις στην περιοχή.

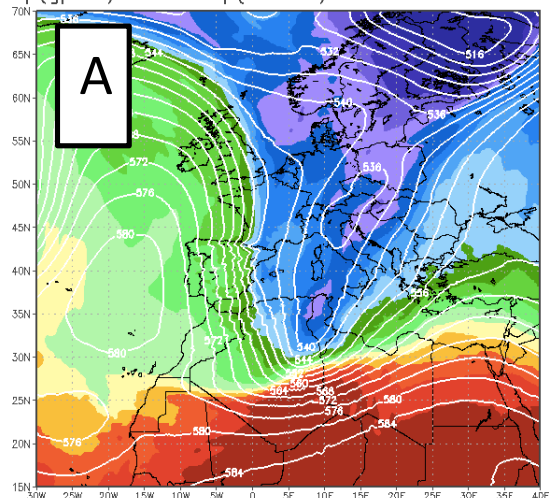
Από τις 06UTC 06 Φεβρουαρίου έως και το τέλος της ημέρας ο στρόβιλος του συστήματος αποκτά μεγάλη κατακόρυφη έκταση σε όλη σχεδόν την Τροπόσφαιρα. Στα 500 hPa, λόγω της εγγύτητας με τον υποτροπικό αεροχειμάρρο, την ισχυρή δηλ. κυκλωνική ανεμοβαθμίδα, ο αυλώνας στην Μεσόγειο έχει ήδη αρχίσει να εμφανίζει αρνητική (ΒΔ προς ΝΑ) κλίση, ειδικά από τις 12UTC και έπειτα, ενώ στην επιφάνεια οι υψηλές πιέσεις στην Ευρώπη σε συνδυασμό με τις χαμηλές πιέσεις στην περιοχή του Ιονίου πελάγους (σχ. 4.6), δημιουργούν ανέμους επιπέδου θύελλας στο μεγαλύτερο κομμάτι της ανατολικής Μεσογείου. Τέλος, αξίζει να αναφερθούν οι μεγάλες τιμές βαροβαθμίδας, που παρατηρούνται κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου οι οποίες σε συνδυασμό με το σύστημα χαμηλών πιέσεων στο Ιόνιο προκαλούν ισχυρούς ανατολικούς-βορειοανατολικούς στο μεγαλύτερο κομμάτι της δυτικής ηπειρωτικής αλλά και νησιωτικής χώρας.

Από τις 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 έως και τις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 και στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa το χαμηλό των υψών στην περιοχή της Σικελίας βαθαίνει κατά 20 ακόμη

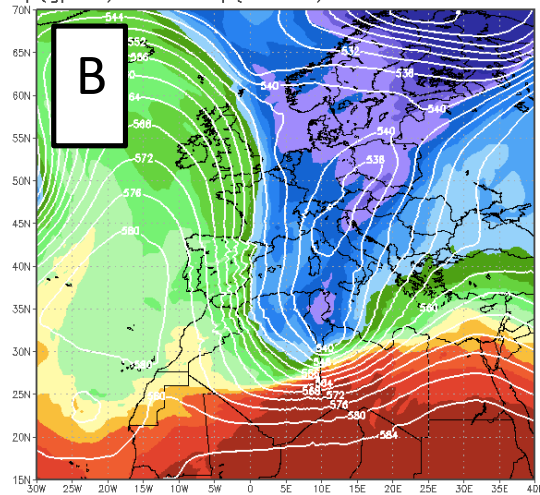
γεωδυναμικά δεκάμετρα (σχ. 4.7), ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την μετωπική επιφάνεια στην νοτιοανατολική Μεσόγειο και βόρεια Αφρική την στιγμή που στο ίδιο επίπεδο την ίδια περίοδο παρατηρείται και θερμή μεταφορά (Warm air advection) (σχ. 4.8A,B). Έως τις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 υπενθυμίζεται ότι στην περιοχή της Λιβύης κυκλωνική κυκλοφορία εμφανίζεται μόνο στα χαμηλά στρώματα της Τροπόσφαιρας. Στην ανώτερη Τροπόσφαιρα σύμφωνα με το σχήμα 4.4, το Jetstreak συνεχίζει να ενισχύεται έως και την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 (Σχ. 4.4Δ), ο πυρήνας του jet streak εμφανίζει ανέμους εντάσεως 150-160 κόμβων ενώ πλέον εκτός από την σημαντική κατακόρυφη έκταση μέσα στην Τροπόσφαιρα (λόγω και της εμπλοκής του πολικού αεροχειμάρρου), η διαταραχή αυτή αποκτά και μεγάλη οριζόντια έκταση. Είναι χαρακτηριστικό πως την συγκεκριμένη χρονική στιγμή το Jetstreak καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της νοτιοανατολικής Μεσογείου και βόρειας Αφρικής. Στη μέση τροπόσφαιρα ο αυλώνας που επηρεάζει τη Μεσόγειο, από τις 18UTC 05 Φεβρουαρίου του 2012 έως και τις 12UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (Σχ. 4.5), δεν εμφανίζει καμία μεταβολή στο βάθος του. Εμφανίζει όμως μεταβολή στην οριζόντια κλίση του άξονα του (από τις 06UTC και κυρίως στις 12UTC 06 Φεβρουαρίου) η οποία γίνεται αρνητική (ΒΔ – ΝΑ). Αποτέλεσμα της μεταβολής αυτής είναι η ψυχρή μεταφορά που πραγματοποιείται στο συγκεκριμένο επίπεδο, η οποία ταυτίζεται με το εξάωρο, κατά τη διάρκεια του οποίου παρατηρήθηκε η πιο μεγάλη πτώση πίεσης (σχ.4.8Γ) μέσα στη μετεωρολογική βόμβα. Πράγματι, η ψυχρή μεταφορά στην μέση Τροπόσφαιρα σε συνδυασμό με το θερμό και υγρό οριακό στρώμα καθώς και την μεταφορά ξηρότερου (ως προς την σχετική υγρασία – το Σχ. παραλείπεται χάριν συντομίας) αέρα επάνω από το PBL δημιούργησε συνθήκες δυνητικής αστάθειας. Αστάθεια, η οποία απελευθερώθηκε όταν ο στρόβιλος διήλθε επάνω από την περιοχή. Κυρίως, όμως, η ψυχρή μεταφορά στα μέσα – ανώτερα στρώματα σήμανε, όπως θα φανεί και στο Κεφ. 8, τη μεταφορά στρατοσφαιρικού αέρα μέσα σ' ένα ασταθές οριακό στρώμα, πράγμα που δημιούργησε στροβιλισμό.

Από τα παρακάτω φαίνεται πως ο στρόβιλος της μετ. βόμβας δημιουργήθηκε βασικά μέσω του μηχανισμού της βαροκλινικής αστάθειας (Hoskins et al., 1985), δηλ. της μεταφοράς στρατοσφαιρικού αέρα προς τα κάτω, επάνω σε μια κατώτερη βαροκλινική ζώνη. Πάντως, η ισχυρή βαροκλινικότητα στα κατώτερα στρώματα, λειτούργησε και ως ανυψωτικός μηχανισμός που απελευθέρωσε την υπάρχουσα αστάθεια στο διάστημα 06Z-12UTC 06 Φεβρουαρίου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω ενίσχυση του στροβίλου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως από τις 18UTC 06 Φεβρουαρίου η δομή του στροβίλου της εκρηκτικής κυκλογένεσης αποτυπώνεται και στην ανάλυση των γεωδυναμικών υψών στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa.

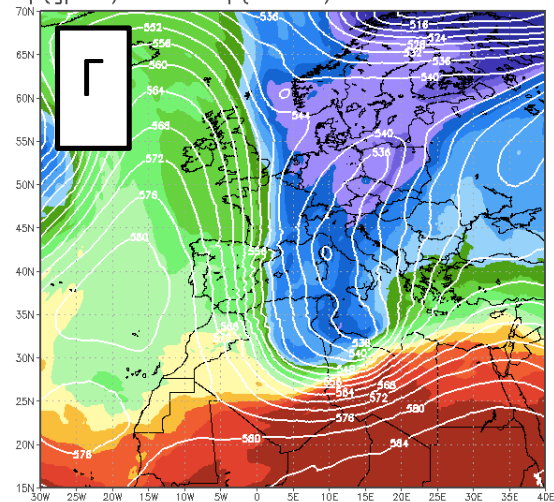
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 18UTC 05FEB



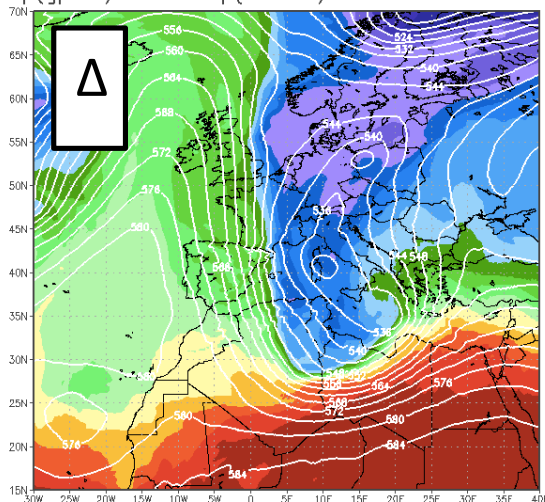
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 00UTC 06FEB



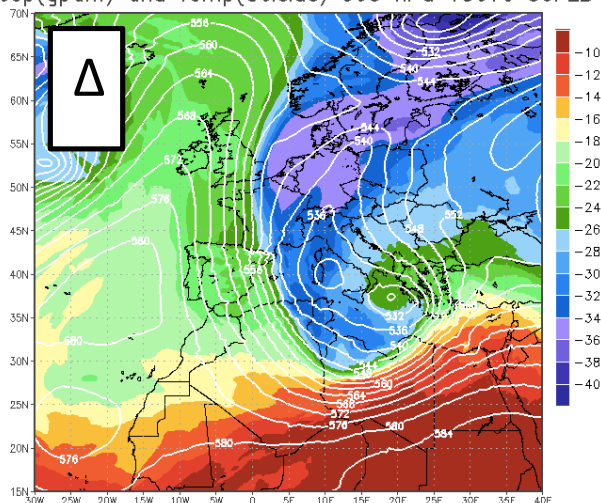
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 06UTC 06FEB



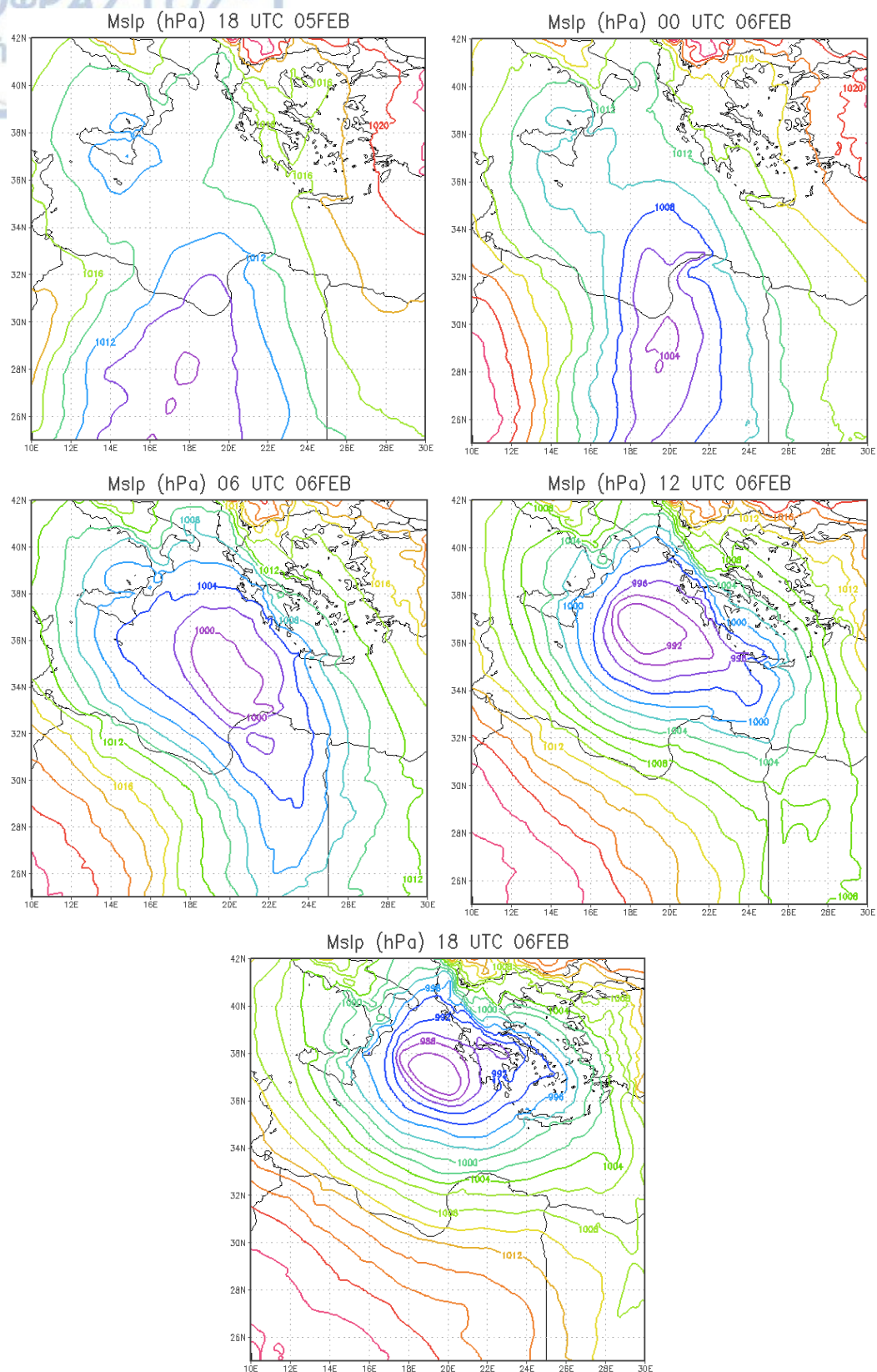
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 12UTC 06FEB



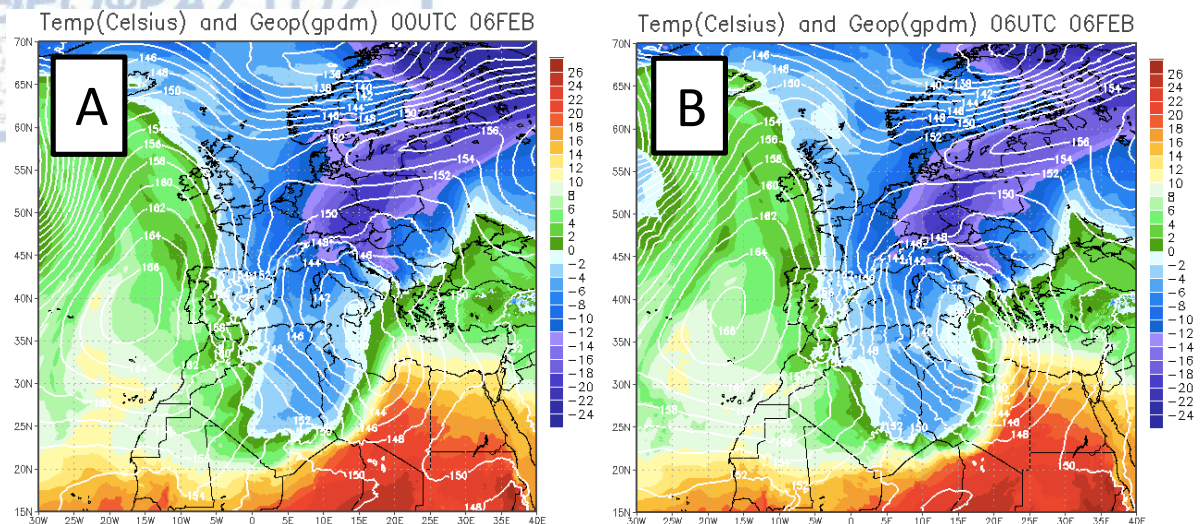
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 18UTC 06FEB



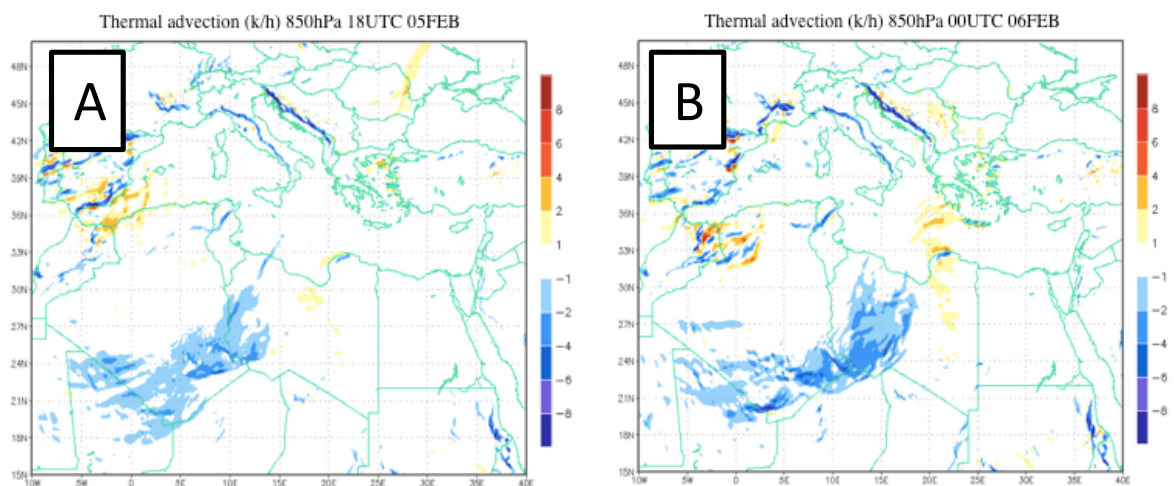
Σχήμα 4.5) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και της Θερμοκρασίας για την ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την α) 05 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 18UTC και β) 00Z γ) 06UTC δ) 12UTC ε) 18Z, της 6^{ης} Φεβρουαρίου 2012.



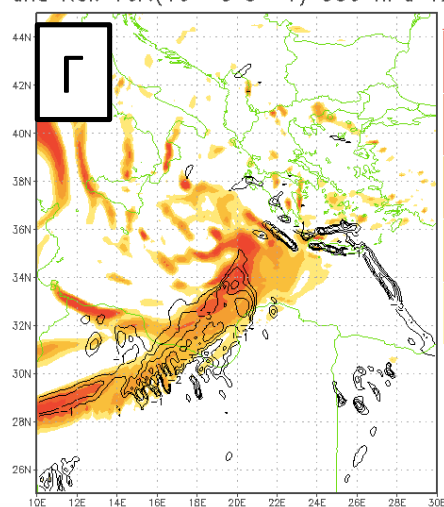
Σχήμα 4.6) Ανάλυση της πίεσης στην μέση στάθμη θάλασσας σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την περίοδο 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 έως 18UTC 06 Φεβρουαρίου με χρονικό βήμα 6 ωρών. Η πίεση δίνεται σε hPa.



Σχήμα 4.7) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και της Θερμοκρασίας για την ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την α) 06 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 00UTC και β) 06 Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 06 UTC.



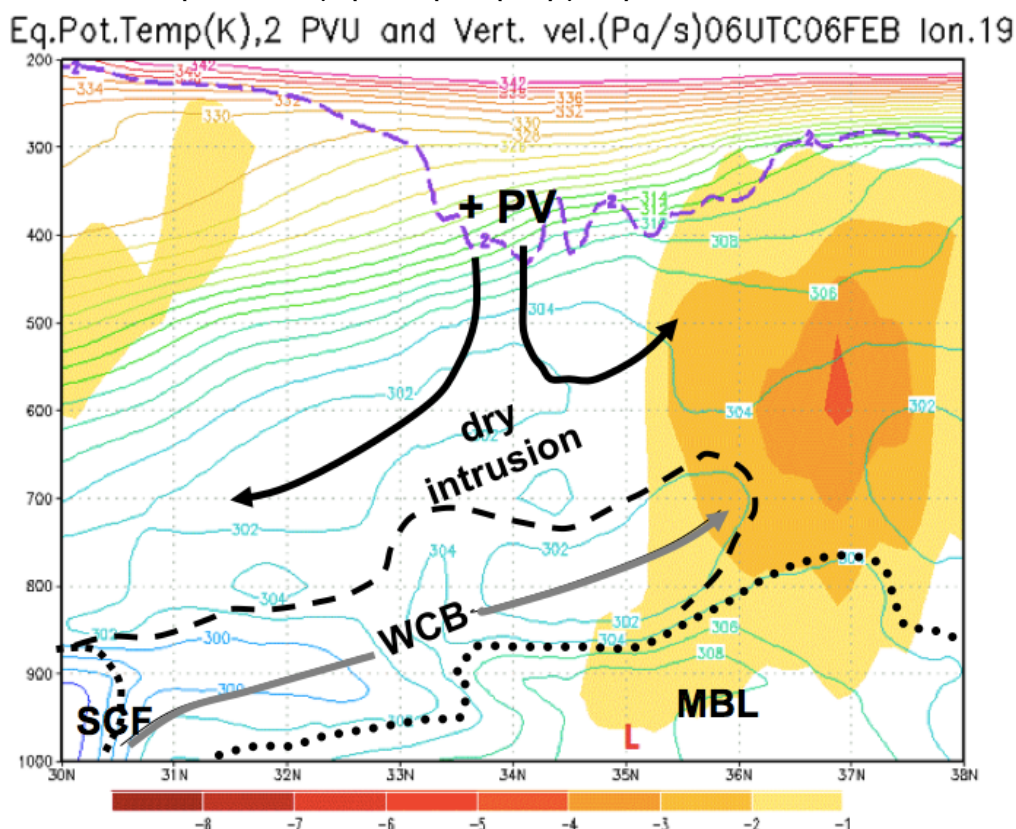
CAA(k/h) and Rel. Vor.(10^{-5}s^{-1}) 500 hPa 12UTC 06FEB



Σχήμα 4.8) Θερμική μεταφορά στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa σε K/h για τις (A) 18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 και (B) τις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012. Στο σχήμα Γ απεικονίζεται ο σχετικός στροβιλισμός στα 500hPa(χρωματική κλίμακα, 10^{-5}s^{-1}) μαζί με την ψυχρή μεταφορά στο ίδιο επίπεδο (ισοπληθείς, K/h) για τις 12UTC 06 Φεβρουαρίου 2012

4.3.1) Μέσης κλίμακας Φαινόμενα – Συνεισφορά της δυνητικής αστάθειας στην ανάπτυξη του στροβίλου

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί και ένας μέσης κλίμακας παράγοντας ο οποίος έπαιξε σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω εξέλιξη του στροβίλου της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5^{ης} και 6^{ης} Φεβρουαρίου του 2012. Για τον σκοπό αυτό στην παρακάτω κατακόρυφη τομή (σχήμα 4.9) απεικονίζεται η κατακόρυφη ταχύτητα (Pa/s), η θέση της επιφάνειας των 2 PVU αλλά και η ισοδύναμη δυνητική θερμοκρασία.



Σχήμα 4.9) Κατακόρυφη τομή γεωγραφικού πλάτους - πίεσης στις 19 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 06UTC 06 Φεβρουαρίου της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας (ισοπληθείς) σε K και της κατακόρυφης ταχύτητας (χρωματική σκίαση) σε Pa/s (εμφανίζονται μόνο οι αρνητικές τιμές). Η διακεκομμένη μωβ γραμμή δείχνει την θέση της επιφάνειας με δυνητικό στροβιλισμό = 2 PVU (δυναμική τροπόπαυση). Με "L" σημειώνεται η θέση της ύφεσης στην επιφάνεια, με "SCF" επιφανειακό ψυχρό μέτωπο, με "MBL" το θαλάσσιο οριακό στρώμα, με "WCB" ο θερμός αερομεταφορέας ενώ τέλος σημειώνεται και η περιοχή όπου συμβαίνει η στρατοσφαιρική εισβολή(Dry intrusion) Η θέση της κατακόρυφης τομής σημειώνεται στο σχήμα 5.2γ.

Όσον αφορά στα θερμοϋγρομετρικά χαρακτηριστικά της τροπόσφαιρας, στην τομή του Σχ. 4.9, διακρίνονται τα εξής.

Στην κάτω αριστερή γωνία της τομής διακρίνεται το επιφανειακό ψυχρό μέτωπο (surface cold front, SCF), με το οποίο (βλ. χάρτη 850 hPa, σχ. 4.7B), βρίσκεται ακριβώς στην ακτή της Λιβύης (31°B), που ούτως ή

άλλως, αυτή την ώρα, είναι ψυχρή. Στα χαμηλά στρώματα και, κυρίως, στο βόρειο τμήμα της τομής, διακρίνεται το θαλάσσιο οριακό στρώμα (marine boundary layer, MBL), όπου οι επιφανειακές ροές υγρασίας, αλλά και θερμότητας από τη θάλασσα είναι έντονες.

Από το χάρτη των 850 hPa (Σχ. 4.7B) συμπεραίνεται ότι αυτή την ώρα (06 UTC 6 Φεβρ.) το ψυχρό μέτωπο έχει προσανατολισμό από NNA προς BBΔ στη θαλάσσια περιοχή της Λιβύης. Πράγματι, στην τομή του Σχ. 4.9, ο θερμός αερομεταφορέας (warm conveyor belt, WCB) του αντίστοιχου χαμηλού, βρίσκεται βορειότερα από το επιφανειακό ψυχρό μέτωπο, έχοντας μια ανοδική συνιστώσα προς τη μετεωρολογική βόμβα. Καθώς ο Αφρικανικός αέρας είναι ξηρός, οι τιμές δυνητικής θερμοκρασίας (θ_e) μέσα στο WCB είναι αρκετά χαμηλές (300 – 302 K). Άρα, δυνητική αστάθεια δημιουργείται έως και το στρώμα των 700 hPa επάνω από τη βόμβα, λόγω της υπέρθεσης του ξηρού WCB στο υγρό MBL.

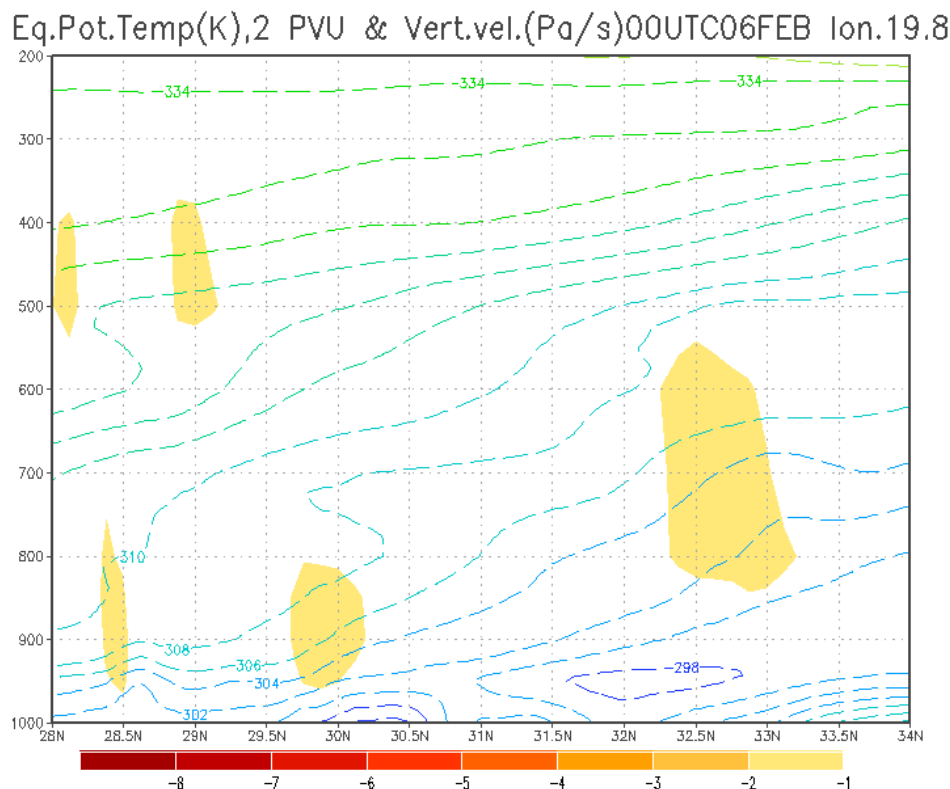
Ακριβώς επάνω από το WCB, υπάρχει μια λεπτή ζώνη (σχ. 4.9), όπου το (θ_e) τείνει να αυξηθεί ($\theta_e \sim 304$ K), αλλά επάνω από τη ζώνη αυτή και πάλι μειώνεται το θ_e , προφανώς λόγω ξηρής στρατοσφαιρικής εισβολής (dry intrusion), προερχόμενης από τη θετική ανωμαλία PV (+ PV). Άρα, λοιπόν, υπάρχει και δεύτερο στρώμα δυνητικής αστάθειας μεταξύ των 500 και 700 hPa.

Εξ' άλλου, και από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου (τα σχ. παραλείπονται) φαίνεται πως λίγες ώρες πριν την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης παρατηρείται μεταφορά ξηρού αέρα επάνω από θερμό και υγρό αέρα στην χαμηλότερη Τροπόσφαιρα. Η μεταφορά αυτή οδήγησε σε αύξηση της βαθμίδας της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας και στην επικράτηση δυνητικής αστάθειας σε ένα αρκετά μεγάλο στρώμα, όπως φάνηκε από την παραπάνω ανάλυση. Σύμφωνα με την εργασία των Pytharoulis et al. (2016) είναι απαραίτητος ένας ανυψωτικός μηχανισμός για να μπορέσει να απελευθερωθεί αυτού του είδους η αστάθεια. Τον ρόλο αυτού του μηχανισμού τον έπαιξε ο στρόβιλος της «βόμβας» ο οποίος διήλθε επάνω από την συγκεκριμένη περιοχή στις 06 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012.

4.3.2) Εξέλιξη του πεδίου της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας το διάστημα 00UTC – 18UTC 06 Φεβρουαρίου

Με την βοήθεια των κατακόρυφων τομών του σχ. 4.10 εξετάζεται το πεδίο της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 00-18 UTC στις 06 Φεβρουαρίου του 2012. Σύμφωνα με το σχήμα 4.10 παρατηρείται ότι η βαθμίδα της δυνητικής θερμοκρασίας στο στρώμα 925-800 hPa μεγιστοποιείται στις 06 UTC. Επομένως, ο στρόβιλος της «βόμβας» διέρχεται, από το συγκεκριμένο σημείο, τη χρονική στιγμή που μεγιστοποιείται η αστάθεια στα κατώτερα στρώματα. Έτσι, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, ο στρόβιλος έπαιξε το ρόλο του ανυψωτικού μηχανισμού, απελευθερώνοντας με αυτόν τον τρόπο την υπάρχουσα αστάθεια γεγονός που συνέβαλε στην περαιτέρω ενίσχυση του.

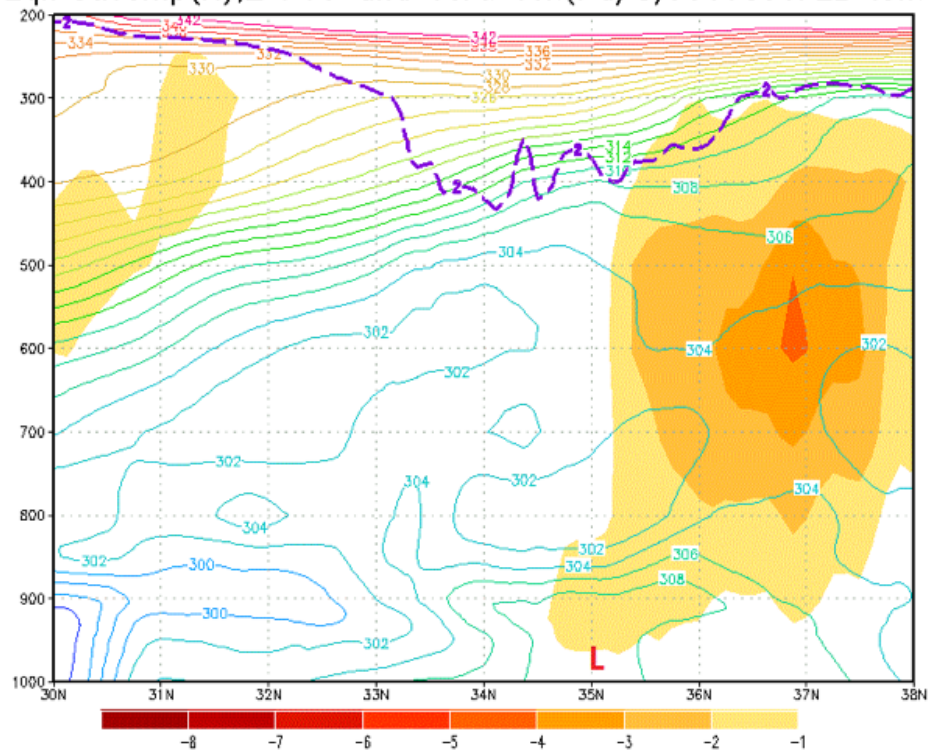
α)



Σχήμα 4.10) α) Κατακόρυφη τομή γεωγραφικού πλάτους - πίεσης στις 19.8 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου της ισοδύναμης δυνητικής θερμοκρασίας (ισοπληθείς) σε K και της κατακόρυφης ταχύτητας (χρωματική σκίαση) σε Pa/s (εμφανίζονται μόνο οι αρνητικές τιμές). Η διακεκομμένη μωβ γραμμή δείχνει την θέση της επιφάνειας με δυνητικό στροβιλισμό = 2 PVU (δυναμική τροπόπαυση, η οποία στην συγκεκριμένη κατακόρυφη τομή δεν εμφανίζεται διότι εντοπίζεται σε μεγαλύτερα ύψη) β) στις 19 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 06UTC 06 Φεβρουαρίου γ) στις 19 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 12UTC 06 Φεβρουαρίου δ) στις 19 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 18UTC 06 Φεβρουαρίου

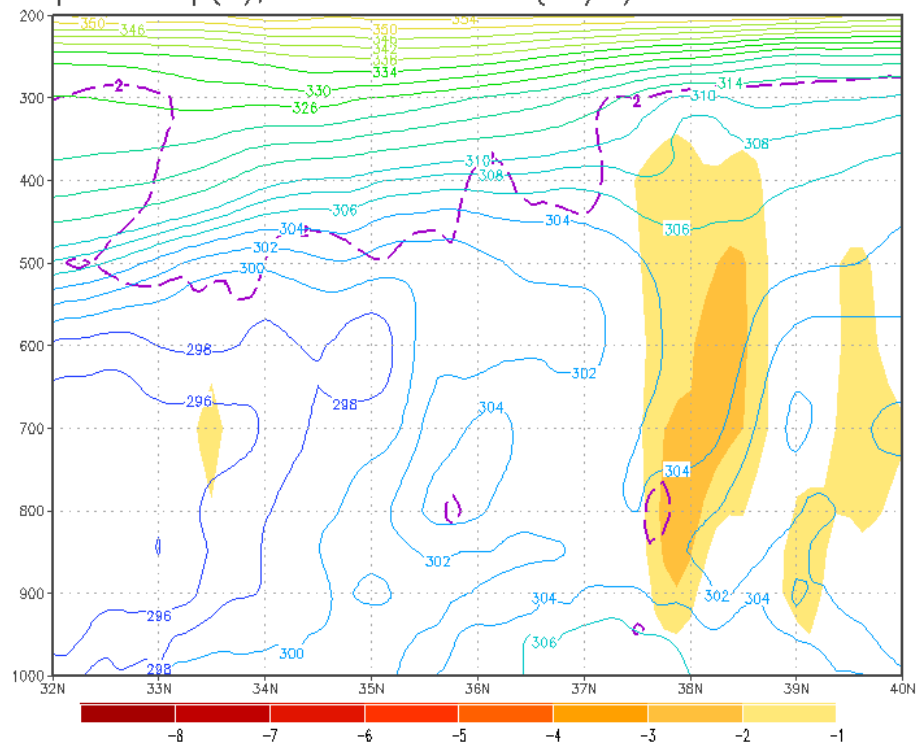
β) σχήμα 4.10 (συνέχεια)

Eq.Pot.Temp(K), 2 PVU and Vert. vel.(Pa/s) 06UTC06FEB Ion.19



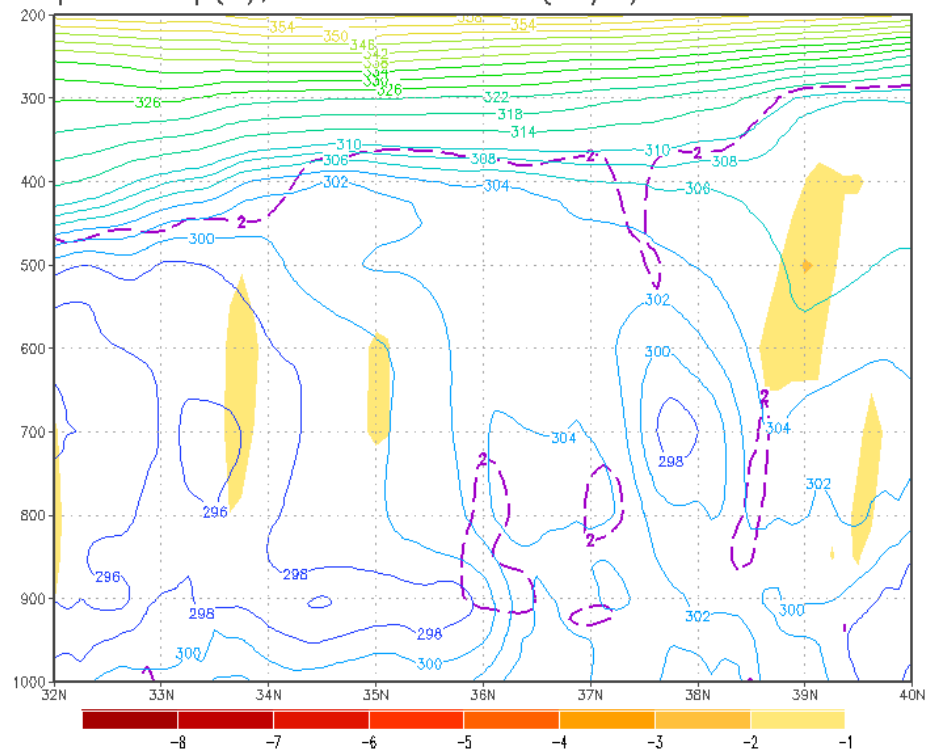
γ) σχήμα 4.10 (συνέχεια)

Eq.Pot.Temp(K), 2 PVU & Vert.vel.(Pa/s) 12UTC06FEB Ion.19



δ) σχήμα 4.10 (συνέχεια)

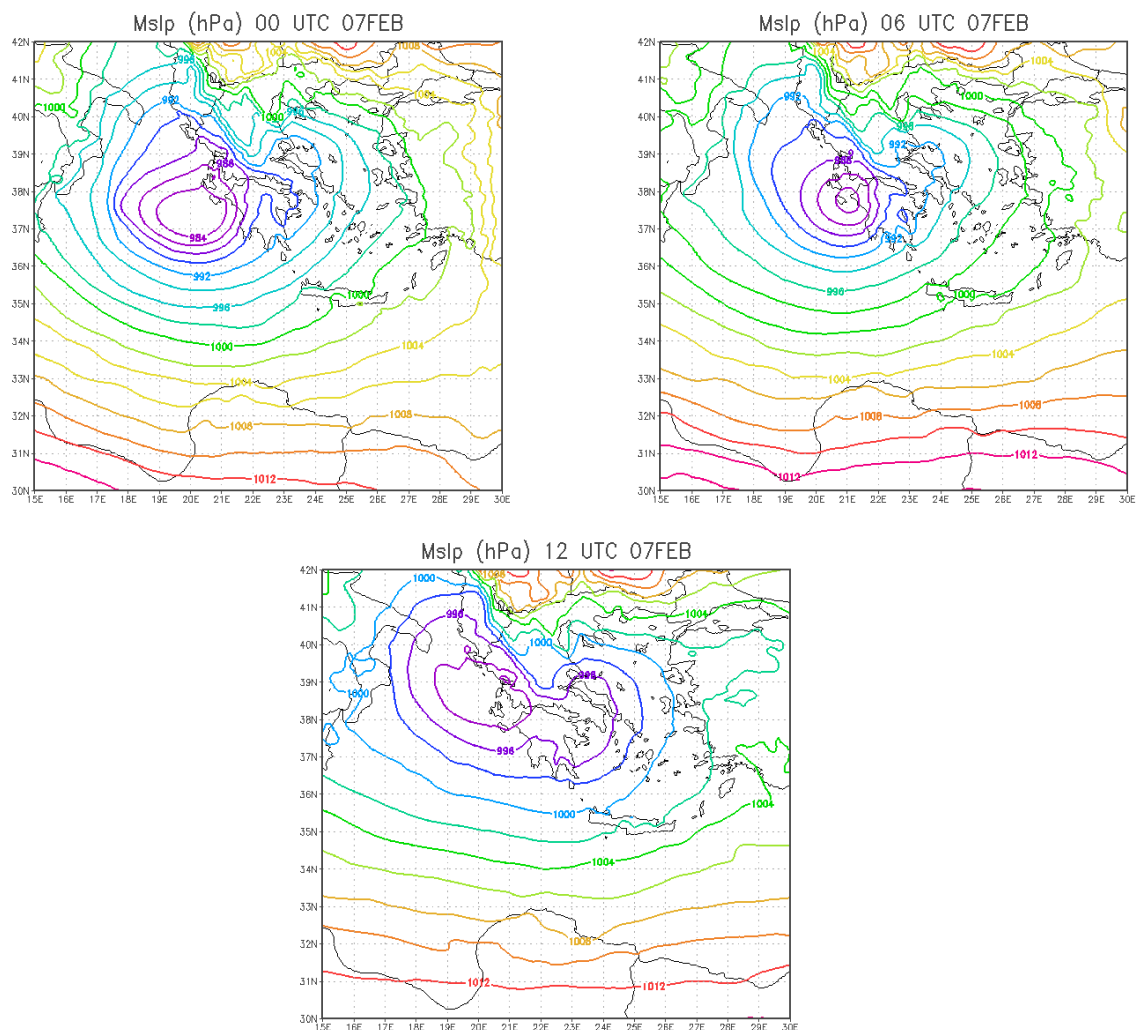
Eq.Pot.Temp(K), 2 PVU & Vert.vel.(Pa/s) 18UTC06FEB Ion.19



4.4) Περίοδος κυκλόλυσης (00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012-12UTC 07 Φεβρουαρίου 2012)

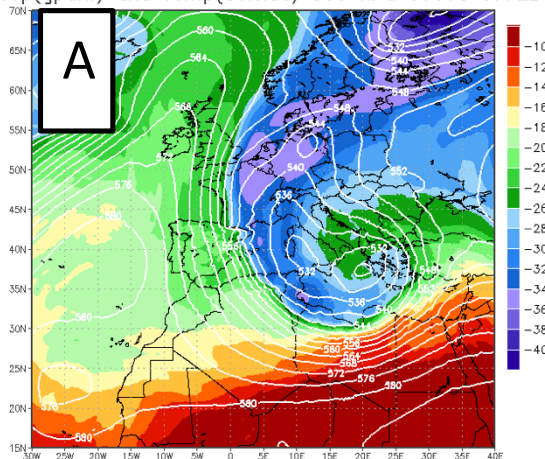
Σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις των δεδομένων του ECMWF, το σύστημα συνέχισε να βαθαίνει κατά 1.9 hPa και στο εξάωρο 18UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 έως 00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012, όμως αυτή η βάθυνση δεν πληρούσε τα κριτήρια για εκρηκτική κυκλογένεση, στο γεωγραφικό αυτό πλάτος. Αξίζει να αναφερθεί, όμως, ότι, σε αυτό το χρονικό διάστημα, η θέση και το βάθος του συστήματος, από τα δεδομένα του ECMWF, έρχεται σε αντίθεση με τη θέση και το βάθος, που αποτυπώνονται μέσω των παρατηρήσεων από τους σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Η διαφορά αυτή έγκειται πιθανότατα στο γεγονός πως ο μετεωρολογικός σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στο αεροδρόμιο της Ζακύνθου ο οποίος είναι ο μοναδικός που απέχει λίγα χιλιόμετρα από το κέντρο του χαμηλού, σταμάτησε να στέλνει δεδομένα από τις 06 Φεβρουαρίου 17:50UTC έως τις 07 Φεβρουαρίου 03:50UTC. Έτσι, σύμφωνα και με τις μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, ο στρόβιλος της «βόμβας» από τις 00Z-06UTC στις 07 Φεβρουαρίου πέρασε λίγα χιλιόμετρα νοτίως της Ζακύνθου (αρκετά πιο ενισχυμένος απ' ότι εμφανίζεται στις αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου) και κινήθηκε προς τις δυτικές ακτές της Πελοποννήσου. Από τις 06UTC έως και τις 12UTC (στις 07 Φεβρουαρίου) όπου η θέση και το βάθος του χαμηλού αποτυπώνονται σωστά (όπως προκύπτει από ταυτόχρονες παρατηρήσεις) και από τις αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου(σχ.4.11), το σύστημα, σημαντικά πιο εξασθενημένο, εμφανίζεται λίγα χιλιόμετρα πιο βόρεια-βορειοδυτικά μέσα στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Κέρκυρας και Κεφαλλονιάς.

Όσον αφορά την μέση Τροπόσφαιρα και την ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa(σχ. 4.12), την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, η ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό επεκτείνεται βορειοανατολικά προς την Σκανδιναβική χερσόνησο. Στην Μεσόγειο, η δομή του στροβίλου της «βόμβας» αποτυπώνεται στην συγκεκριμένη επιφάνεια έως και τις 06UTC στις 07 Φεβρουαρίου. Από εκεί και έπειτα η βαθμίδα στα γεωδυναμικά ύψη εξασθενεί σημαντικά ενώ συγχρόνως αρχίζει και η πλήρωση του χαμηλού.

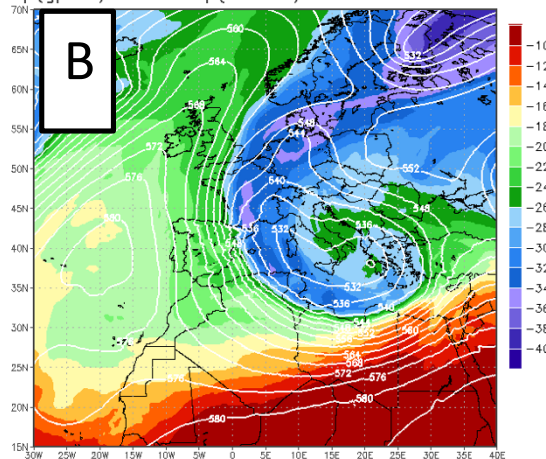


Σχήμα 4.11) Αναλύσεις της πίεσης στην μέση στάθμη θάλασσας σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για την περίοδο 00UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 έως 12UTC 07 Φεβρουαρίου με χρονικό βήμα 6 ωρών. Η πίεση δίνεται σε hPa.

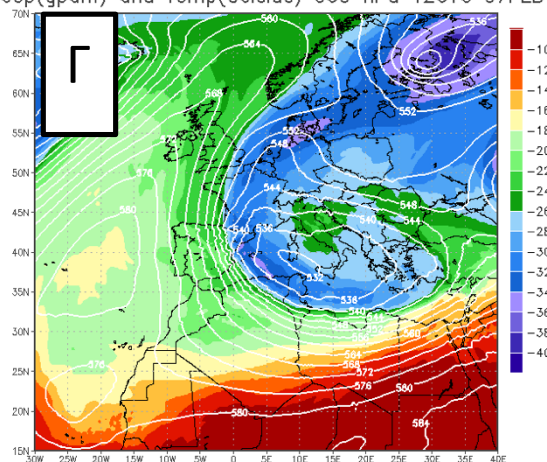
Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 00UTC 07FEB



Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 06UTC 07FEB



Geop(gpdm) and Temp(Celsius) 500 hPa 12UTC 07FEB



Σχήμα 4.12) Ανάλυση του γεωδυναμικού ύψους και της Θερμοκρασίας για την ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF για τις α) 00UTC β) 06UTC γ) 12Z, της 7^{ης} Φεβρουαρίου 2012.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗΣ:

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε το συνοπτικό περιβάλλον της εκρηκτικής κυκλογένεσης της 5,6 και 7^{ης} Φεβρουαρίου του 2012 η οποία επηρέασε το μεγαλύτερο κομμάτι της ανατολικής Μεσογείου συμπεριλαμβανομένης και της χώρας μας. Σε αυτή την ενότητα θα εξετασθούν οι φυσικές/δυναμικές διεργασίες, οι οποίες συνέβαλαν στη δημιουργία αλλά και περαιτέρω εξέλιξη της μετεωρολογικής βόμβας.

5.1) Μεταφορά Στροβιλισμού

Η αυξανόμενη καθ' ύψος μεταφορά κυκλωνικού στροβιλισμού (ΜΚΣ) είναι, σύμφωνα με τον Petterssen (1956), ένας ευνοϊκός παράγοντας για ανοδικές κινήσεις. Μάλιστα, στην επιχειρησιακή Μετεωρολογία η συγκεκριμένη ποσότητα χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν νέφη και υετός. Εκτός όμως από την σύνδεση της με τις περιοχές όπου υπάρχουν ανοδικές κινήσεις και νέφη, η μεταφορά κυκλωνικού στροβιλισμού συνδέεται και με τις περιοχές όπου παρατηρείται απόκλιση της μάζας². Για το λόγο αυτό έχουν σχεδιασθεί (σχήμα 5.1) οι χάρτες μεταφοράς του απόλυτου στροβιλισμού³ αλλά και ο κυκλωνικός σχετικός στροβιλισμός για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της περιόδου της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Η θέση της ύφεσης στην επιφάνεια αποτυπώνεται με αστερίσκο. Θετική μεταφορά απόλυτου στροβιλισμού επάνω από την περιοχή όπου δημιουργήθηκε αλλά και εξελίχθηκε η ύφεση παρατηρείται από τις 06UTC στις 06 Φεβρουαρίου και έπειτα, όταν και ο μεγάλου μήκους κύματος αυλώνας εισήλθε στην περιοχή. Συγκεκριμένα στις 06UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 η μεταφορά κυκλωνικού στροβιλισμού επάνω από την περιοχή όπου βρίσκεται το επιφανειακό χαμηλό είναι της τάξης των $600 \times 10^{-10} \frac{1}{s^2}$. Την ίδια στιγμή ο κυκλωνικός σχετικός στροβιλισμός αγγίζει την τιμή των $20 \times 10^{-5} \frac{1}{s}$. Στις 12UTC στις 06 Φεβρουαρίου του 2012 η μεταφορά κυκλωνικού στροβιλισμού επάνω από την περιοχή μελέτης αυξάνεται σημαντικά και πλέον αγγίζει την των $1000 \times 10^{-10} \frac{1}{s^2}$. Μάλιστα η ΜΚΣ υποδεικνύει και την θέση του ψυχρού μετώπου το οποίο πλησιάζει τις ακτές της

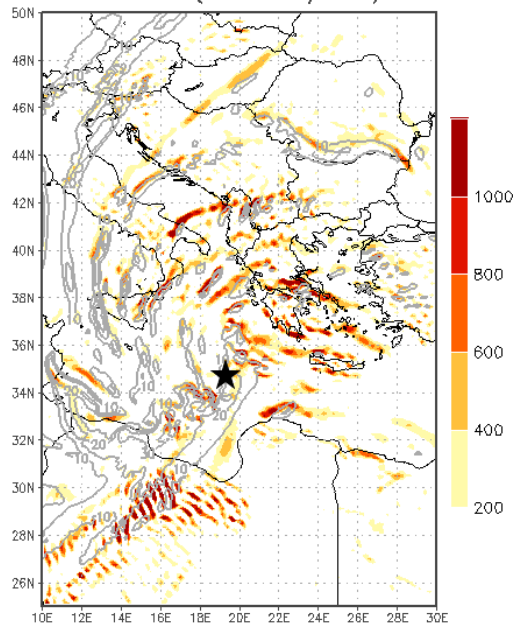
² η οποία, βέβαια, σχετίζεται μέσω της συνέχειας με τις ανοδικές κινήσεις και το σχηματισμό νεφών/υετού

³ θεωρώντας τη μεταφορά στροβιλισμού στα χαμηλά στρώματα αμελητέα, σε σχέση με αυτήν στα υψηλά

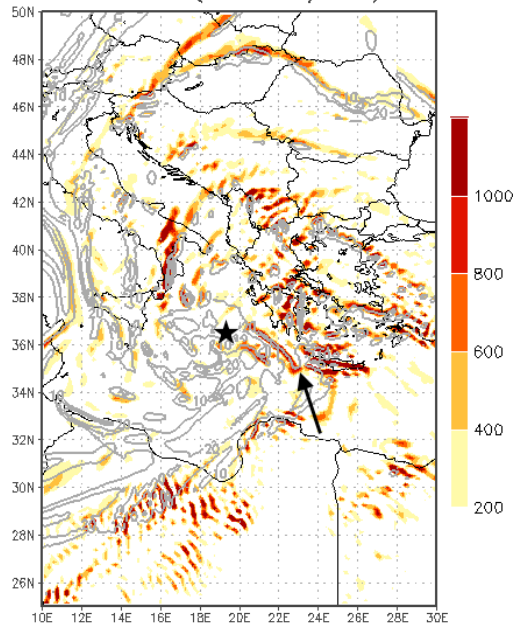
Πελοποννήσου (στο σχήμα 5.1 η ζώνη με τις υψηλές τιμές ΜΚΣ αποτυπώνεται με βέλος). Μεγάλες όμως τιμές εμφανίζει και ο κυκλωνικός σχετικός στροβιλισμός ο οποίος πλέον ξεπερνά την τιμή των $20 \times 10^{-5} \frac{1}{s}$.

Τέλος στις 18UTC με την βοήθεια της ποσότητας της ΜΚΣ υποδεικνύεται και πάλι η θέση του ψυχρού μετώπου στο κεντρικό Αιγαίο και στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι επάνω από την περιοχή του επιφανειακού χαμηλού οι τιμές της ΜΚΣ έχουν μειωθεί σημαντικά.

Vort($10^{-5}/s$) and Vort. Adv($10^{-10}/s^2$) 500 hPa 06Z060212

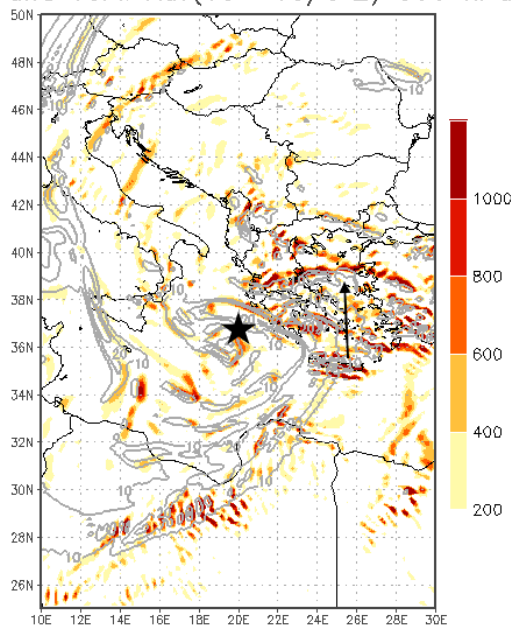


Vort($10^{-5}/s$) and Vort. Adv($10^{-10}/s^2$) 500 hPa 12Z060212



Σχήμα 5.1) Μεταφορά απόλυτου κυκλωνικού στροβιλισμού (έγχρωμη σκίαση) και σχετικός κυκλωνικός στροβιλισμός (ισοπληθείς) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa για τις 06 Φεβρουαρίου 2012, 06UTC , 12UTC και 18Z. Ο απόλυτος κυκλωνικός στροβιλισμός δίνεται σε μονάδες $10^{-10} \frac{1}{s^2}$ ενώ ο σχετικός κυκλωνικός στροβιλισμός σε $10^{-5} \frac{1}{s}$. Απεικονίζονται μόνο οι θετικές τιμές. Με αστερίσκο αποτυπώνεται η θέση του επιφανειακού χαμηλού. Με βέλος προσδιορίζεται η ζώνη υψηλών τιμών MKΣ η οποία αντιστοιχεί με την θέση του ψυχρού μετώπου.

Vort($10^{-5}/s$) and Vort. Adv($10^{-10}/s^2$) 500 hPa 18Z060212



Σχήμα 5.1)(συνέχεια)

5.2) Δυνητικός στροβιλισμός (Potential Vorticity)

Σύμφωνα με την εργασία των Hoskins et al.(1985) στα επεισόδια εκρηκτικής κυκλογένεσης σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο τα κατώτερα όσο και τα ανώτερα στρώματα της Τροπόσφαιρας. Τα κατώτερα στρώματα συνεισφέρουν μέσω των μετώπων. Πράγματι και στην συγκεκριμένη περίπτωση ο στρόβιλος της ύφεσης δημιουργήθηκε επάνω στο μέτωπο στην περιοχή της Λιβύης, όταν αυτό ενισχύθηκε λόγω της επέκτασης του Αζορικού αντικυκλώνα προς τα ανατολικά και της βάθυνσης του χαμηλού των υψών στην περιοχή της Ιταλίας. Ενώ αντίθετα τα ανώτερα στρώματα συνεισφέρουν μέσω ενός τοπικού ελάχιστου στο ύψος της Τροπόπαυσης λίγο πιο «πίσω» από την επιφανειακή ύφεση. Το ελάχιστο αυτό προσφέρει πολύ μεγάλα ποσά κινητικής ενέργειας και στροβιλισμού από την τροπόπαυση στην τροπόσφαιρα βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο στην επέκταση καθ' ύψος του στροβίλου σε όλη την τροπόσφαιρα.

Η δυνατότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για περιστροφή μπορεί να περιγραφεί σε μεγάλο βαθμό από την σχέση που παρουσίασε ο Ertel το 1942 και είναι γνωστή ως ισεντροπική μορφή του «δυναμικού στροβιλισμού του Ertel»:

$$P = -g \zeta_{\text{απολ}} \partial \theta / \partial P \quad (5.2.1)$$

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, ο ισεντροπικός δυνητικός στροβιλισμός είναι ανάλογος όχι μόνο με τον απόλυτο στροβιλισμό αλλά και με την κατακόρυφη στρωμάτωση της ατμόσφαιρας. Έτσι στην

τροπόπαυση όπου ο λόγος $\partial\theta/\partial P$ παίρνει μεγάλες τιμές, μεγάλες τιμές εμφανίζει και ο δυνητικός στροβιλισμός. Αντίθετα στην Τροπόσφαιρα όπου ο αέρας είναι σχετικά πιο ασταθής, ο δυνητικός στροβιλισμός είναι πολύ πιο μικρός. Συγχρόνως αποτελεί και συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους. Βασική αρχή του ισεντροπικού δυνητικού στροβιλισμού είναι ότι δεν μεταβάλλεται κατά την διάρκεια αδιαβατικής ροής χωρίς τριβές. Στην περιοχή της Μεσογείου, σύμφωνα με τους Hoskins et al. (1985), η επιφάνεια η οποία είναι αντιπροσωπευτική της Τροπόπαυσης είναι η 2 PVU.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες για τον ρόλο της τροπόπαυσης στις κυκλογενέσεις οι οποίες εξελίσσονται με «εκρηκτικό» ρυθμό. Ο Gyakum, (1983) υποστήριξε ότι το μέτρο του δυνητικού στροβιλισμού αποτελεί και μέτρο της έντασης της κυκλογένεσης. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Hoskins et al. (1985), η εκρηκτική κυκλογένεση ενισχύεται σε περιοχές όπου σημειώνεται θετική ανωμαλία του PV στην ανώτερη τροπόσφαιρα και η οποία εξαπλώνεται επάνω από μια βαροκλινική ζώνη των χαμηλών στρωμάτων.

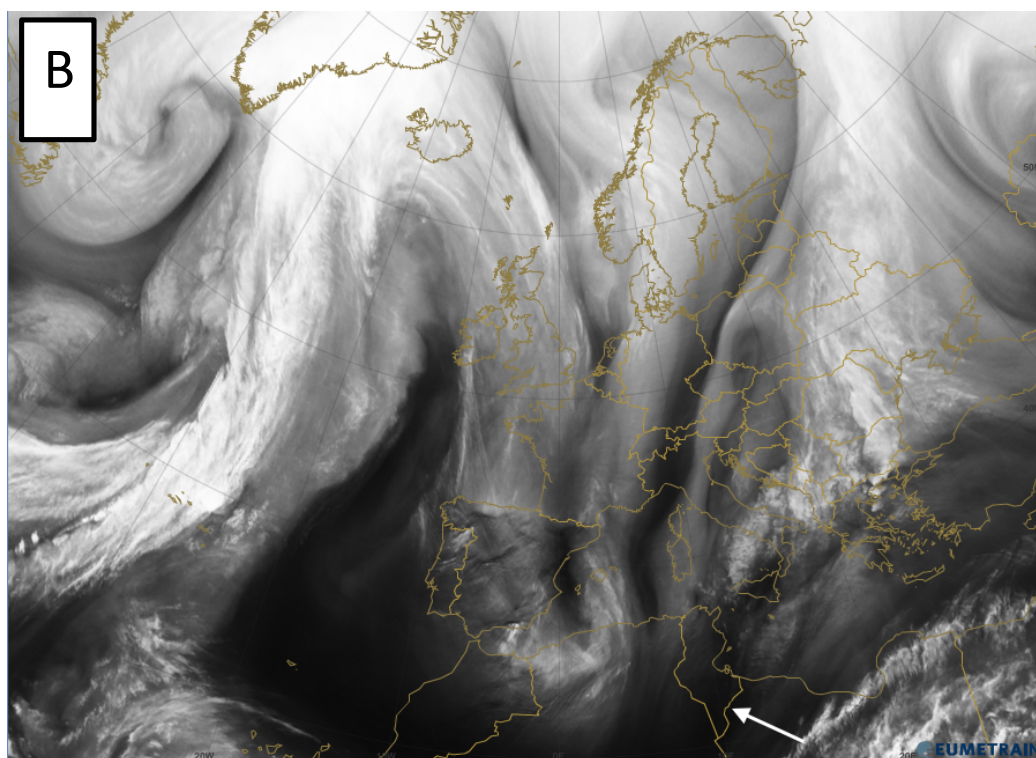
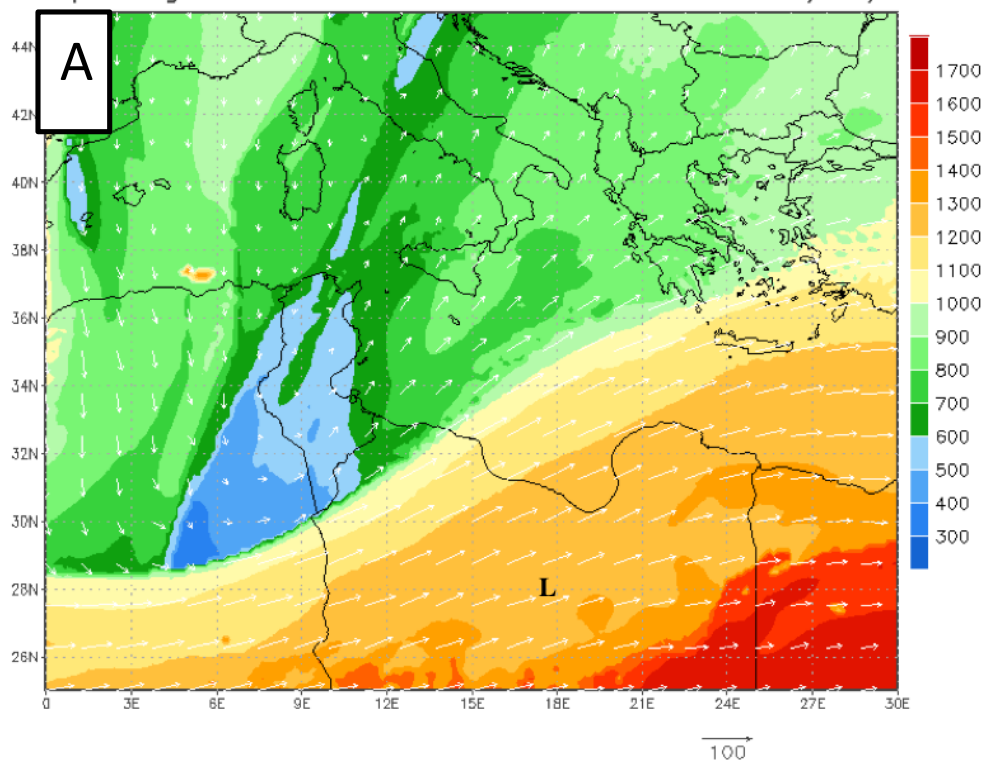
Οι Lagouvardos et al. (2007) διεξήγαγαν ένα πείραμα με την τεχνική της αναστροφής του PV για να εκτιμήσουν τον ρόλο της ανωμαλίας PV στην εκρηκτική κυκλογένεση του 2004. Με το πείραμα αυτό διαπιστώθηκε ότι οι κύριοι μηχανισμοί που οδήγησαν την συγκεκριμένη κυκλογένεση να βαθύνει με ρυθμούς «μετεωρολογικής βόμβας» βρίσκονταν στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Το πείραμα περιείχε τρία σκέλη. Στο πρώτο σκέλος το μοντέλο έτρεξε με όλες τις πραγματικές αρχικές συνθήκες, αλλά χωρίς τη θετική ανωμαλία PV, που βρισκόταν στη Β. Αφρική. Στο δεύτερο σκέλος το μοντέλο έτρεξε με όλες τις πραγματικές αρχικές συνθήκες, αλλά χωρίς τη θετική ανωμαλία PV, που κατήλθε από τη β. Ευρώπη. Σε κανένα από αυτά τα δύο πρώτα σκέλη δεν παρατηρήθηκε εκρηκτική κυκλογένεση. Αντιθέτως, όταν, στο τρίτο σκέλος του πειράματος συμπεριλήφθηκαν στις αρχικές συνθήκες και οι δύο ανωμαλίες PV, όπως δηλ. στην πραγματικότητα, τότε παρατηρήθηκε εκρηκτική κυκλογένεση.

Τέλος, οι Karacostas et al. (2010) ισχυρίστηκαν πως, αφού κάθε ανωμαλία PV σχετίζεται με μια ψυχρή μάζα στην τροπόσφαιρα, το 'κλειδί' της ανάλυσης της αμεσότητας του ρόλου του PV στην εκρηκτική κυκλογένεση, είναι να βρεθεί ποιο από τα δυο έχει τη μεγαλύτερη εγγύτητα στην εκρηκτική κυκλογένεση: η μεταφορά του PV από την ανώτερη τροπόσφαιρα ή η μεταφορά της ψυχρής μάζας στην κατώτερη. Στην πρώτη περίπτωση (kata cold front – split front) ο ρόλος του PV είναι άμεσος, μέσω της παραγωγής στροβιλισμού, ενώ στη δεύτερη (ana cold front) η κυκλογένεση οφείλεται στις ανοδικές κινήσεις λόγω μετωπογένεσης των χαμηλών στρωμάτων. Έτσι, λοιπόν, όσον αφορά την ίδια περίπτωση του 2004, η ανάλυσή τους έδειξε πως το βορειο-

Αφρικανικό σύστημα της 21^{ης} Ιανουαρίου ήταν τύπου kata-front και επέδρασε *άμεσα* στην εκρηκτική κυκλογένεση, ενώ το βορειο-Ευρωπαϊκό σύστημα ήταν τύπου ana-front, με αποτέλεσμα η συνεισφορά του PV από αυτό να είναι κυρίως *έμμεση*, μέσω της ισχυρής επιφανειακής μετωπογένεσης.

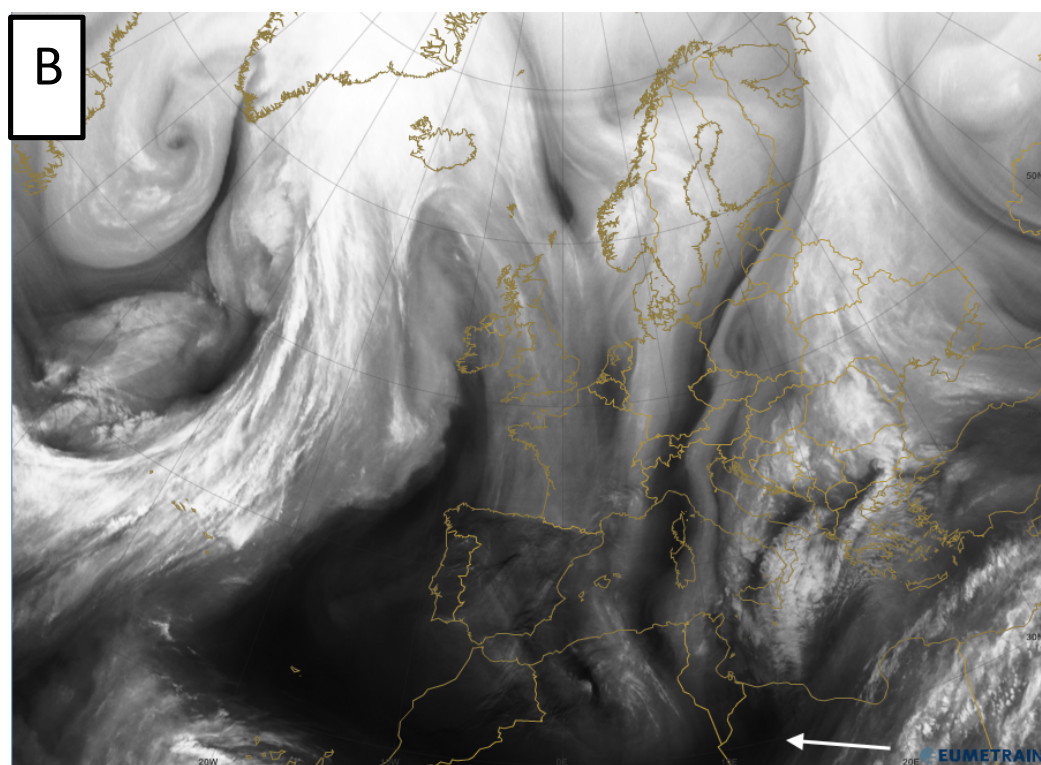
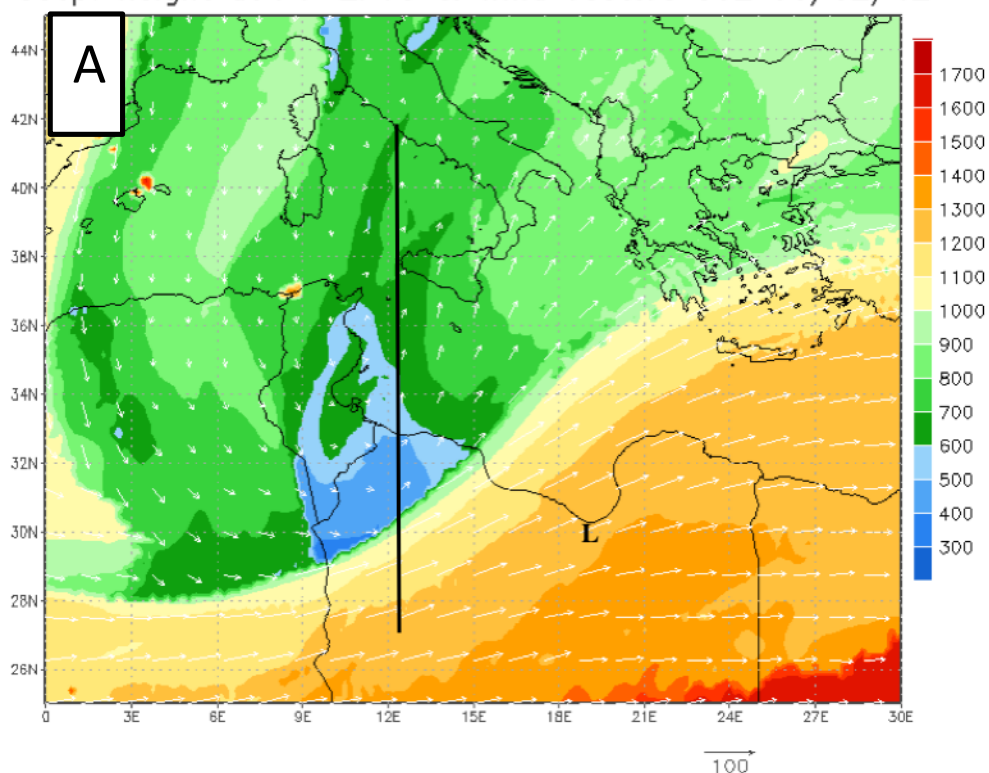
Για να μελετηθεί ο ρόλος των ανώτερων στρωμάτων στην εκρηκτική κυκλογένεση της 5^{ης}, 6^{ης} και 7^{ης} Φεβρουαρίου του 2012, σε αυτή την ενότητα παραθέτονται οι χάρτες του ύψους της τροπόπαυσης και οι κατακόρυφες τομές στροβιλισμού (από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF) όπως επίσης και οι δορυφορικές εικόνες WV από την Eumetsat.

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 18Z 05/02/12



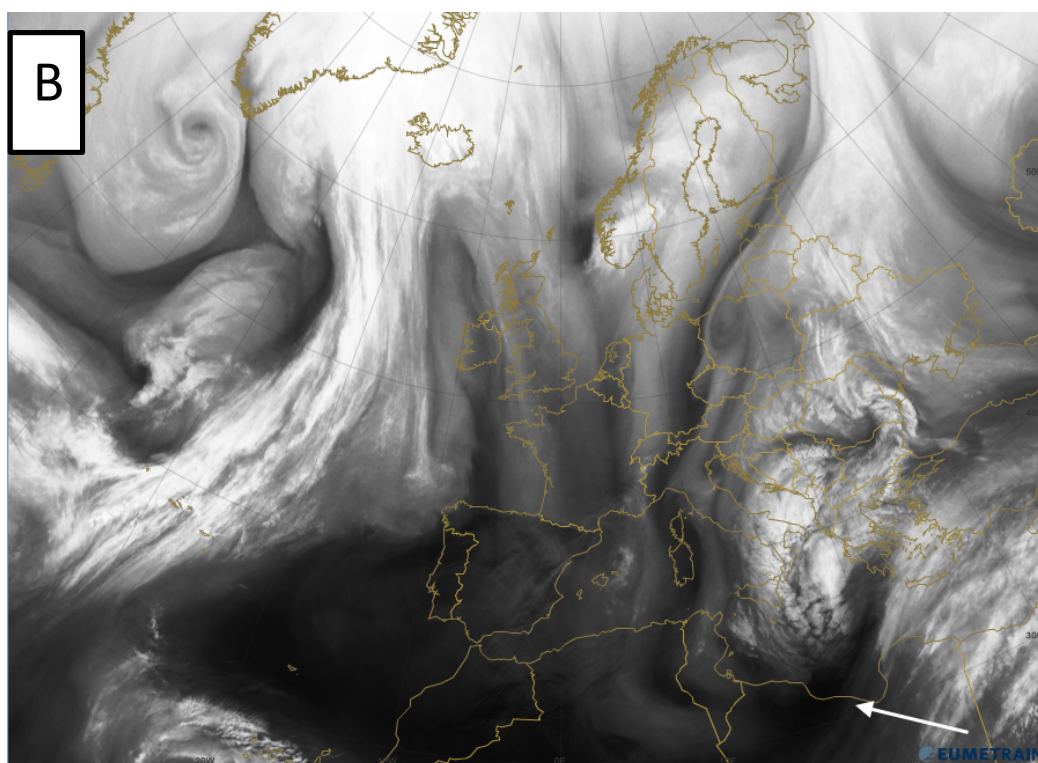
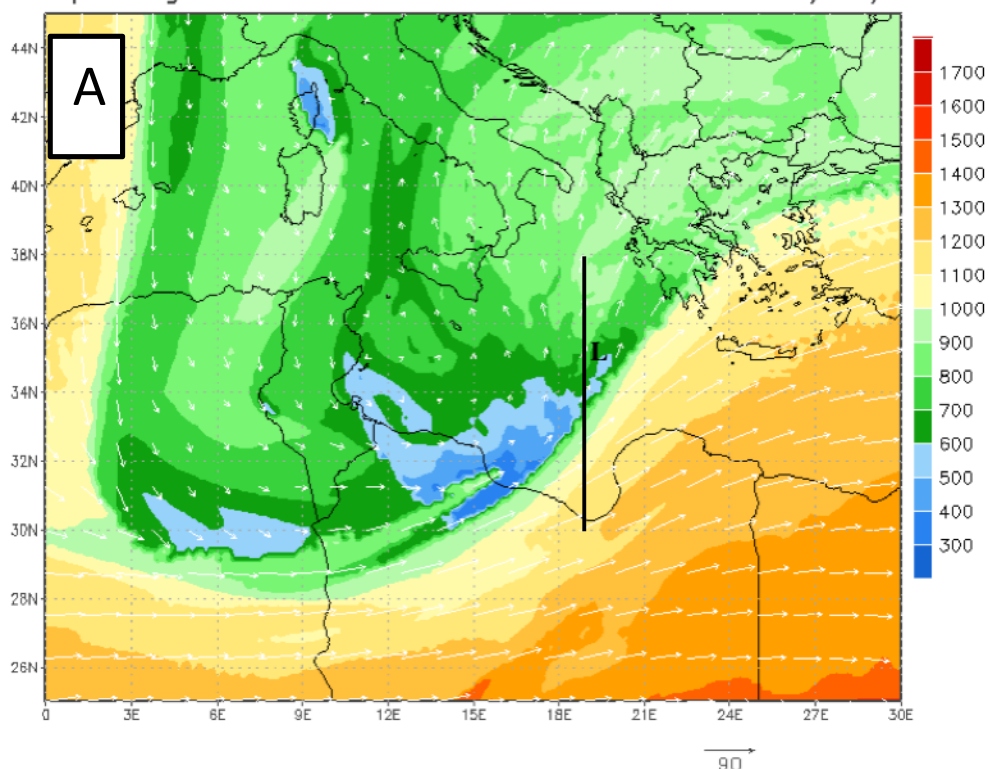
Σχήμα 5.2α) Α) Ανάλυση του ύψους της επιφάνειας 2 PVU (χρωματική σκίαση) σε gpm καθώς και του ανέμου επάνω στην ίδια επιφάνεια (wind vectors) για τις 05 Φεβρουαρίου και ώρα 18 UTC. Με «L» σημειώνεται η θέση της ύφεσης στην επιφάνεια. Β) Δορυφορική εικόνα από το κανάλι WV 6.2 μm της Eumetsat για την ίδια χρονική στιγμή. Με άσπρο βέλος επισημαίνεται η περιοχή με ξηρό αέρα η οποία ταυτίζεται με την περιοχή με μεγάλες τιμές δυνητικού στροβιλισμού (Potential Vorticity).

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 00Z 06/02/12



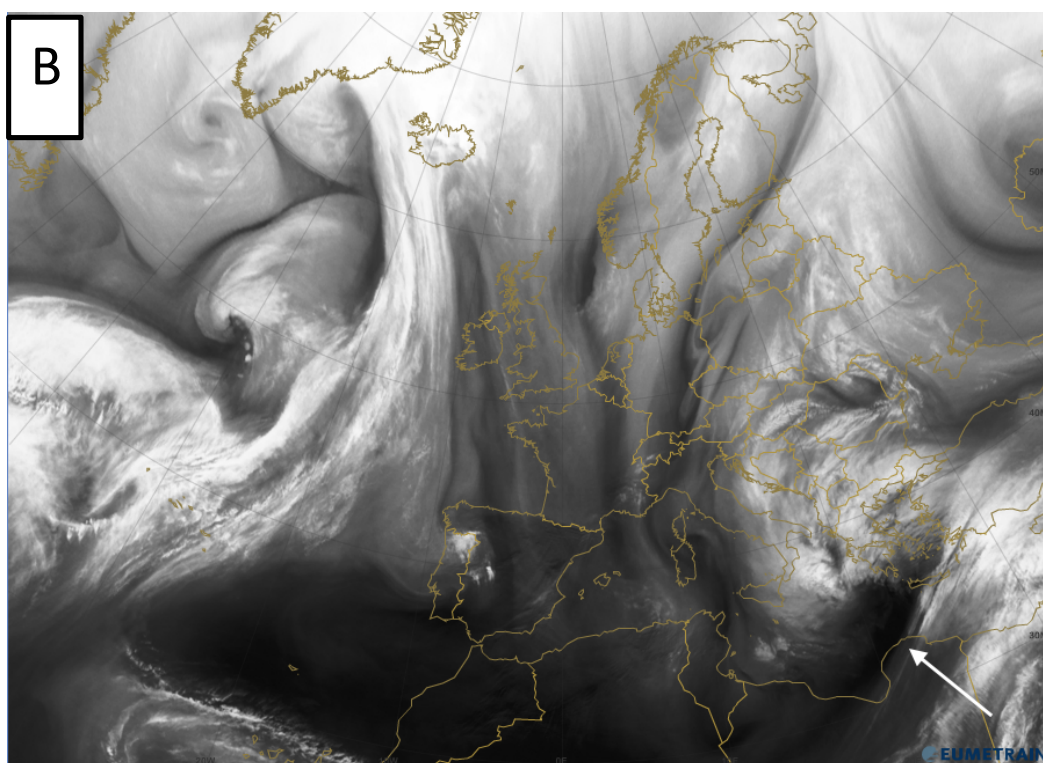
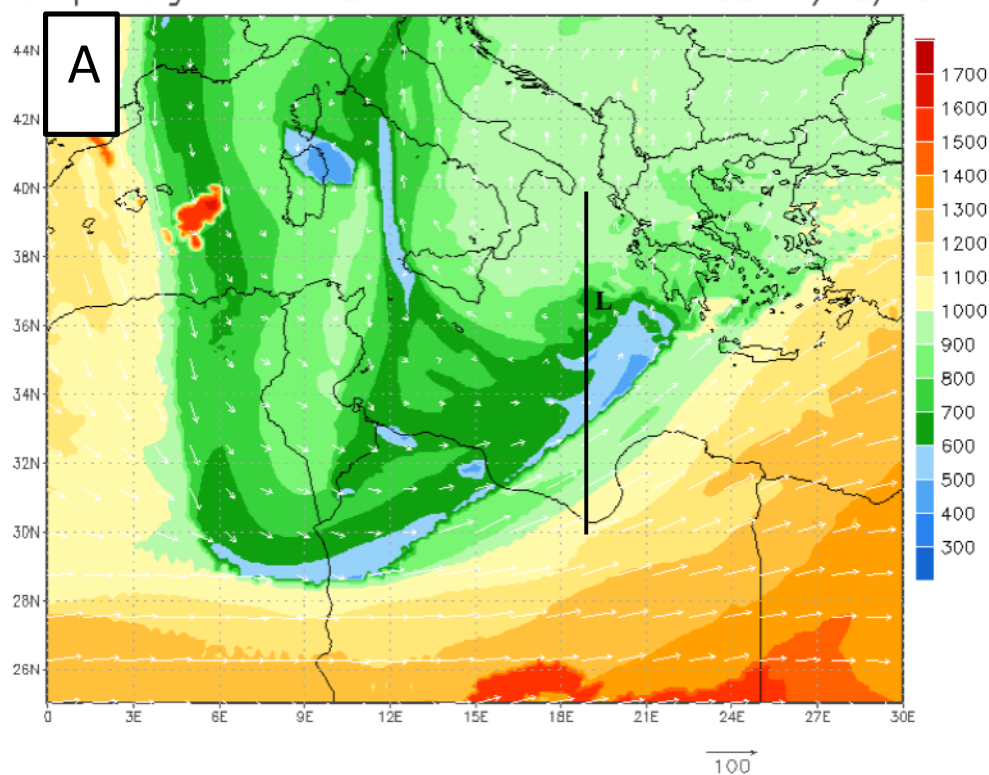
Σχήμα 5.2β) (Συνέχεια) Ανάλυση του ύψους και του ανέμου στην επιφάνεια 2PVU σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου για τις 00 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 καθώς και η δορυφορική εικόνα της Eumetsat στο κανάλι WV6.2 για το ίδιο χρονικό διάστημα. Με συνεχή μαύρη γραμμή σημειώνεται το ίχνος της τομής του σχ. 5.3α.

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 06Z 06/02/12



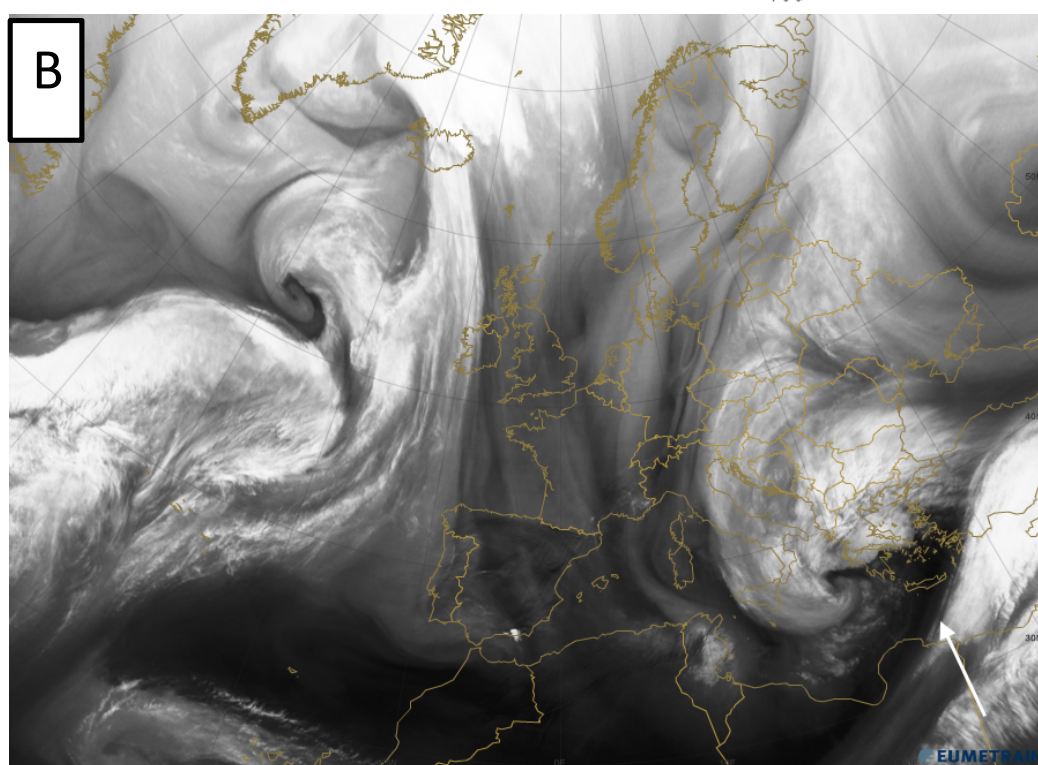
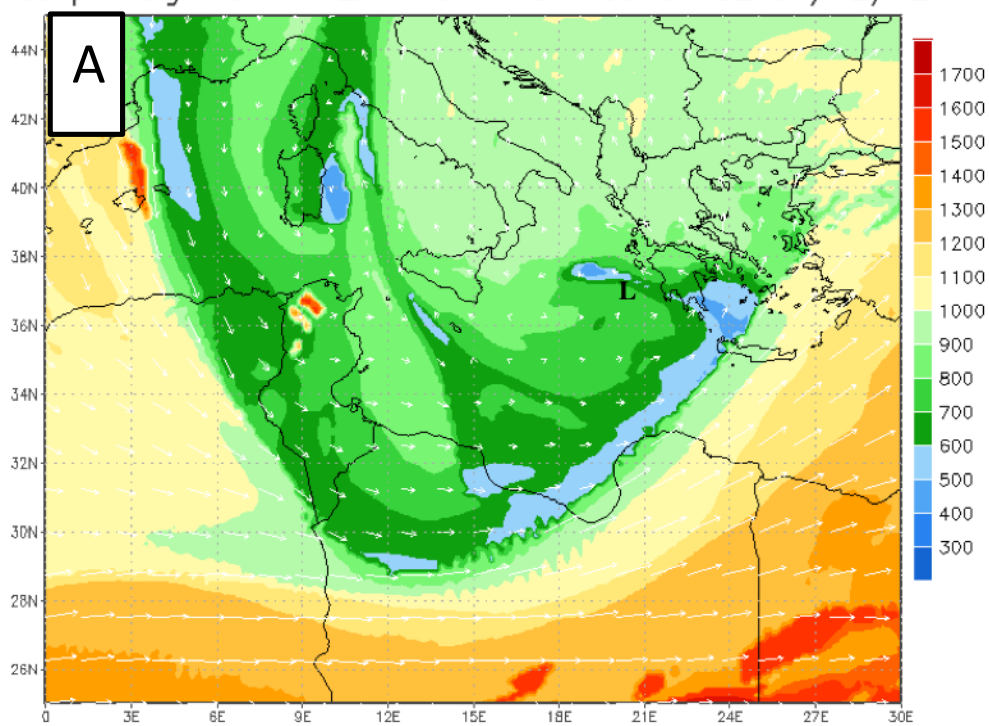
Σχήμα 5.2γ) (Συνέχεια) Ανάλυση του ύψους και του ανέμου στην επιφάνεια 2PVU σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου για τις 06 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 καθώς και η δορυφορική εικόνα της Eumetsat στο κανάλι WV6.2 για το ίδιο χρονικό διάστημα. Με συνεχή μαύρη γραμμή σημειώνεται το ίχνος της τομής του σχ. 5.3β.

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 12Z 06/02/12



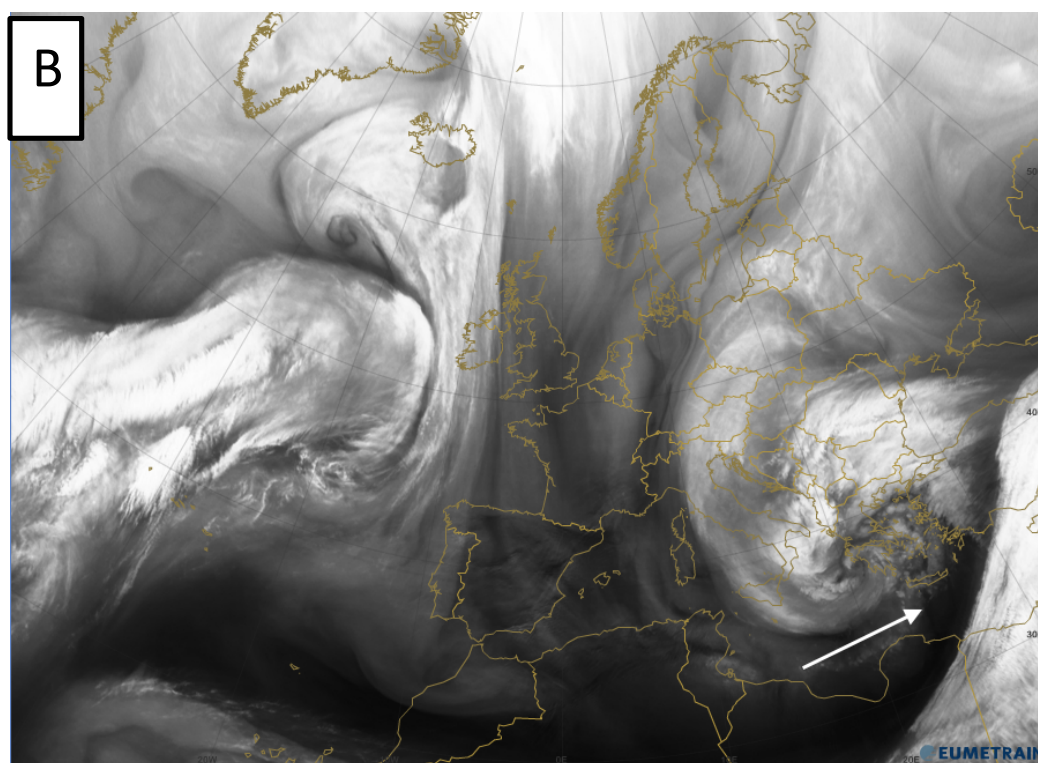
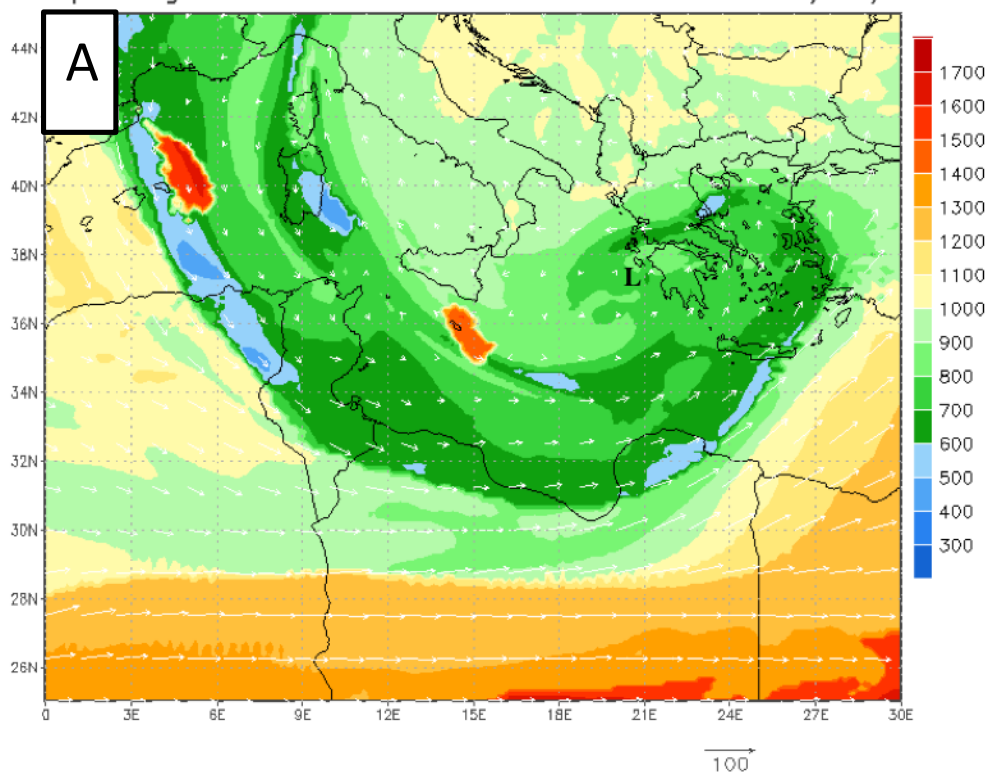
Σχήμα 5.2δ) (Συνέχεια) Ανάλυση του ύψους και του ανέμου στην επιφάνεια 2PVU σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου για τις 12 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 καθώς και η δορυφορική εικόνα της Eumetsat στο κανάλι WV6.2 για το ίδιο χρονικό διάστημα. Με συνεχή μαύρη γραμμή σημειώνεται το ίχνος της τομής του σχ. 5.3γ.

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 18Z 06/02/12



Σχήμα 5.2ε) (Συνέχεια) Ανάλυση του ύψους και του ανέμου στην επιφάνεια 2PVU σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου για τις 18 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 καθώς και η δορυφορική εικόνα της Eumetsat στο κανάλι WV6.2 για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Geop. height at PV=2PVU & Wind Vectors 00Z 07/02/12



Σχήμα 5.2ζ) (Συνέχεια) Ανάλυση του ύψους και του ανέμου στην επιφάνεια 2PVU σύμφωνα με τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου για τις 00 UTC 07 Φεβρουαρίου 2012 καθώς και η δορυφορική εικόνα της Eumetsat στο κανάλι WV6.2 για το ίδιο χρονικό διάστημα.

5.2.1) Σύγκριση της θέσης της ανωμαλίας της Τροπόπαυσης μεταξύ των δεδομένων του ECMWF και των δορυφορικών εικόνων.

Το κανάλι Water Vapor με μήκος κύματος 6.2 μm βρίσκεται στο κέντρο της ζώνης απορρόφησης των υδρατμών. Για το λόγο αυτό αποδίδει πληροφορία σχετικά με την συγκέντρωση των υδρατμών στην ανώτερη Τροπόσφαιρα. Έτσι οι περιοχές με λευκό χρώμα αντιστοιχούν σε μεγάλες συγκεντρώσεις υδρατμών. Αντίθετα οι πιο σκοτεινές υποδεικνύουν τις περιοχές με ξηρό αέρα.

Χαρακτηριστικό της ανωμαλίας της τροπόπαυσης είναι εκτός από τις μεγάλες τιμές δυνητικού στροβιλισμού και η ύπαρξη ξηρού αέρα στην μέση και ανώτερη Τροπόσφαιρα. Επομένως τρόπο ελέγχου αυτού του είδους των ανωμαλιών αποτελεί και η χρήση των συγκεκριμένων δορυφορικών εικόνων. Στο σχήματα 5. 2(α,β,γ,δ,ε,ζ) παραθέτονται οι αναλύσεις του Ευρωπαϊκού κέντρου σχετικά με το ύψος, την θέση της τροπόπαυσης και τον άνεμο επάνω σε αυτή καθώς και οι δορυφορικές εικόνες WV 6.2 μm για το χρονικό διάστημα 05 Φεβρουαρίου και ώρα 18UTC έως 07 Φεβρουαρίου και ώρα 00Z. Η σύγκριση τους οδηγεί στο συμπέρασμα πως τα δεδομένα του ECMWF υποδεικνύουν με μεγάλη ακρίβεια τη θέση της τροποσφαιρικής ανωμαλίας για όλο το χρονικό διάστημα της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Έτσι, οι χάρτες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για να διερευνηθεί ο ρόλος των ανώτερων στρωμάτων στο υπό μελέτη χαμηλό.

5.2.2) Ανάλυση των χαρτών του ύψους της Τροπόπαυσης

Στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου η θετική ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού βρίσκεται πάνω στο ανατολικό - βορειοανατολικό τμήμα της Αλγερίας και την Τυνησία ενώ η ροή επάνω στην επιφάνεια των 2 PVU είναι κυρίως προς την Μεσόγειο και την περιοχή της Σικελίας (σχήμα 5.2α). Ένα στοιχείο που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση είναι κατά πόσο η ανωμαλία της τροπόπαυσης, σε συνδυασμό με την παρατηρούμενη ροή, συνεισφέρει στην κυκλωνική κυκλοφορία στην περιοχή της Σικελίας. Όσον αφορά το βάθος της συγκεκριμένης θετικής ανωμαλίας, αυτή την χρονική στιγμή η 2 PVU αγγίζει περίπου την μέση τροπόσφαιρα. Επιπρόσθετα, στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου, όπως είχε επισημανθεί και στο κεφάλαιο της Συνοπτικής ανάλυσης, ο στρόβιλος της ύφεσης στην περιοχή της Λιβύης είναι ρηχός και δεν συνδέεται εμφανώς με τις διαταραχές στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Είναι, όμως, πολύ πιθανό, μεταξύ της ανωμαλίας PV και του επιφανειακού χαμηλού, 'L', από ό,τι φαίνεται από τη διεύθυνση και την ένταση των ανέμων επάνω στη δυν. τροπόπαυση και από το γεγονός ότι υπάρχει και ψυχρή μεταφορά⁴, ότι στρατοσφαιρικός

⁴ που γενικά ισοδυναμεί με καθοδικές κινήσεις

αέρας διαρρέει προς το επιφανειακό χαμηλό, 'L', αυξάνοντας το στροβιλισμό του και συντελώντας, έτσι, στη βάθυνσή του.

Η ίδια περίπου κατάσταση επικρατεί και στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου (σχήμα 5.2β). Η θετική ανωμαλία του Δυνητικού στροβιλισμού κινείται ανατολικότερα όπως και το χαμηλό των υψών στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου αλλά έως και αυτή την χρονική στιγμή τα ανώτερα στρώματα δε συνδέονται εμφανώς με τον στρόβιλο της επιφανειακής ύφεσης στην περιοχή της Λιβύης. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι ο στρόβιλος της μέσης και ανώτερης τροπόσφαιρας στην κεντρική Μεσόγειο, σε αυτό το διάστημα των έξι ωρών, ενισχύεται κατά 20 γεωδυναμικά δεκάμετρα (στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa). Προφανώς, λοιπόν, η μεταφορά στρατοσφαιρικού αέρα (βλ. παραπάνω) συντελεί στη βάθυνση του στροβίλου.

Έως τις 06UTC 06 Φεβρουαρίου συντελείται μια αλλαγή της κατάστασης (σχήμα 5.2γ). Είναι πολύ πιθανό και αξίζει να μελετηθεί περαιτέρω σε επόμενη μελέτη ότι αυτό το χρονικό διάστημα ο στρόβιλος της κεντρικής Μεσογείου ο οποίος πιθανότατα ενισχύθηκε από την θετική ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού να συνδέθηκε με τον επιφανειακό στρόβιλο στην περιοχή της Λιβύης. Αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης είναι η περαιτέρω βάθυνση της ύφεσης στην επιφάνεια. Επιπλέον, αυτή την χρονική στιγμή είναι ξεκάθαρη και η συνεισφορά της ανωμαλίας του PV στην περαιτέρω βάθυνση του στροβίλου μιας και βρίσκεται λίγο πιο «πίσω» από την θέση του χαμηλού στην επιφάνεια. Τέλος, όσον αφορά το βάθος της, η ανωμαλία της τροπόπαυσης έχει ενισχυθεί και η επιφάνεια των 2 PVU αγγίζει και τμήματα της κατώτερης τροπόσφαιρας.

Όπως θα σχολιαστεί στο Κεφ. 8, η 'συνένωση' ή καλύτερα 'διασταύρωση' του πολικού με τον υποτροπικό αεροχειμάρρο, ακριβώς «εμπρός» από τη μετεωρολογική βόμβα, σχετίζεται άμεσα με την ενίσχυση της ανωμαλίας PV. Πράγματι, από τις τοπογραφίες της τροπόπαυσης στα σχ. 5.2, φαίνεται ξεκάθαρα πως υπάρχει διασταύρωση αεροχειμάρρων. Εκτός από το γεγονός ότι η τροπόπαυση μεταπηδάει κατ' ευθείαν από την πολική στην τροπική upstream της βόμβας, και το πεδίο του ανέμου υφίσταται μεγάλη ασυνέχεια, τόσο σε ένταση, αλλά και σε διεύθυνση. Η ασυνέχεια της έντασης θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από τον ισχυρό στροβιλισμό, που θα σήμαινε απλά μια πολύ ισχυρή κυκλωνική ανεμοβαθμίδα. Η ασυνέχεια της διεύθυνσης του ανέμου, όπως π.χ. στις 18 UTC 5/2 ~ στις 3°Α, 29°Β, από ΒΔ στα βόρεια και σε ύψη 650 grdm σε ΔΝΔ στα νότια και σε ύψη 1100 grdm (σχ. 5.2α), δεν μπορεί παρά να σημαίνει πως ο πολικός αεροχειμάρρος (ΒΔ διεύθυνσης στο παραπάνω σημείο) διασταυρώνεται με τον υποτροπικό (ΔΝΔ διεύθυνσης), εισχωρώντας από κάτω του και, άρα, αυξάνοντας τον PV ακριβώς βόρεια αυτής της 'διασταύρωσης'.

Από τις 06-12 UTC στις 06 Φεβρουαρίου, δηλαδή στο διάστημα που το υπό μελέτη επιφανειακό χαμηλό βαθαίνει με τον ταχύτερο ρυθμό, φαίνεται ότι η ανωμαλία PV το ακολουθεί συνεχώς, ευρισκόμενη συνεχώς πίσω του (σχήματα 5.2γ, 5.2δ). Επιπλέον, αυτό το διάστημα η 2 PVU ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη αλλά η αποτελεσματικότητα της παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα μιας και κινείται προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Υπενθυμίζεται ότι, σύμφωνα με τους Hoskins et al. (1985), το βάθος της επίδρασης μίας θετικής ανωμαλίας δυνητικού στροβιλισμού, είναι ανάλογο της παραμέτρου Coriolis, f , και αντιστρόφως ανάλογο της τετρ. ρίζας της συχνότητας Brunt-Vaissala, N . Επομένως, όταν οι ανωμαλίες αυτές κινούνται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη μπορούν να συνεχίσουν να είναι πολύ αποτελεσματικές στις κυκλογενέσεις της επιφάνειας, ακόμα και αν μειώσουν το βάθος τους μέσα στην τροπόσφαιρα. Τέλος, από τις 18UTC στις 06 Φεβρουαρίου (σχήματα 5.2ε, 5.2ζ) σύμφωνα με τους χάρτες, αλλά και με την βοήθεια των δορυφορικών εικόνων, διαπιστώνεται ότι σταδιακά η ανωμαλία του PV απομακρύνεται από την «βόμβα», κινούμενη ανατολικά.

Συνεπώς από την παραπάνω μελέτη μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Από τις 18 UTC 05 έως τις 00 UTC 06 Φεβρουαρίου η θετική ανωμαλία του PV πιθανότατα συνεισφέρει στον στρόβιλο της κεντρικής Μεσογείου ο οποίος στις 06UTC φαίνεται ότι συνδέεται με τον επιφανειακό στρόβιλο στην περιοχή της Λιβύης. Από τις 06UTC έως και τις 12UTC, οπότε και η βόμβα βαθαίνει ταχύτατα, η ανωμαλία της τροπόπαυσης εντοπίζεται αρκετά κοντά στον ενοποιημένο πλέον στρόβιλο της βόμβας, ο οποίος εκτείνεται σε όλη την τροπόσφαιρα. Τέλος, από τις 18UTC και έπειτα, η συγκεκριμένη ανωμαλία απομακρύνεται ανατολικά και φαίνεται πως αποσυνδέεται από την «βόμβα».

5.2.3) Κατακόρυφες τομές

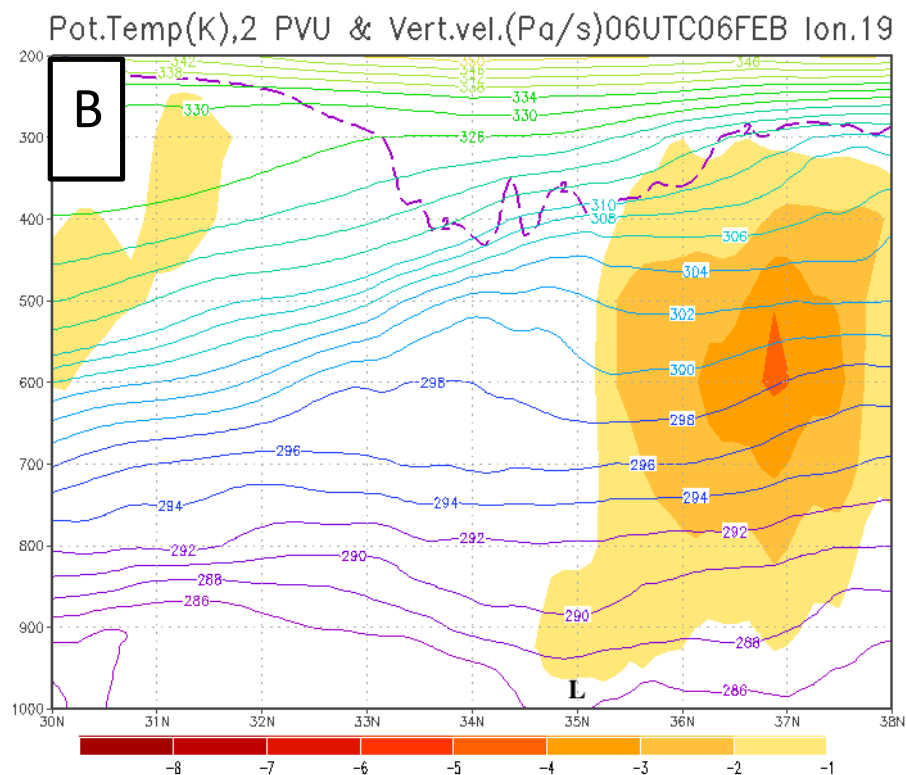
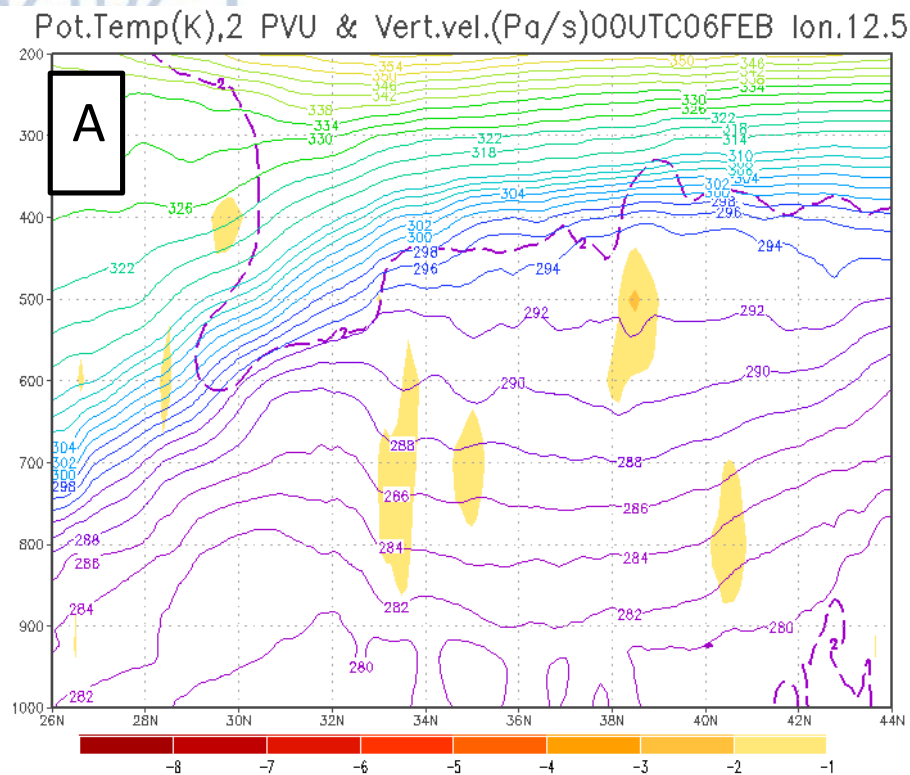
Για να μελετηθεί η συνεισφορά της θετικής ανωμαλίας του δυνητικού στροβιλισμού στο υπό μελέτη χαμηλό, παραθέτονται οι κατακόρυφες τομές στις οποίες φαίνονται η επιφάνεια των 2 PVU, οι ανοδικές κινήσεις (Pa/s), καθώς και οι ισεντροπικές επιφάνειες (K). Οι τομές αυτές αφορούν το χρονικό διάστημα 00-12UTC στις 06 Φεβρουαρίου, διάστημα στο οποίο η ανωμαλία του PV φαίνεται ότι επηρέασε σημαντικά την εξέλιξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης. Η θέση των τομών σημειώνεται στα σχήματα 5.2β, 5.2γ, 5.2δ.

Στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3α, η θετική ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού κατέρχεται έως και την μέση περίπου Τροπόσφαιρα. Συγκεκριμένα η επιφάνεια των 2 PVU αγγίζει την ισοβαρική επιφάνεια των 600 hPa. Όπως σε κάθε θετική ανωμαλία PV (+PV), έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, ακριβώς κάτω από την +PV

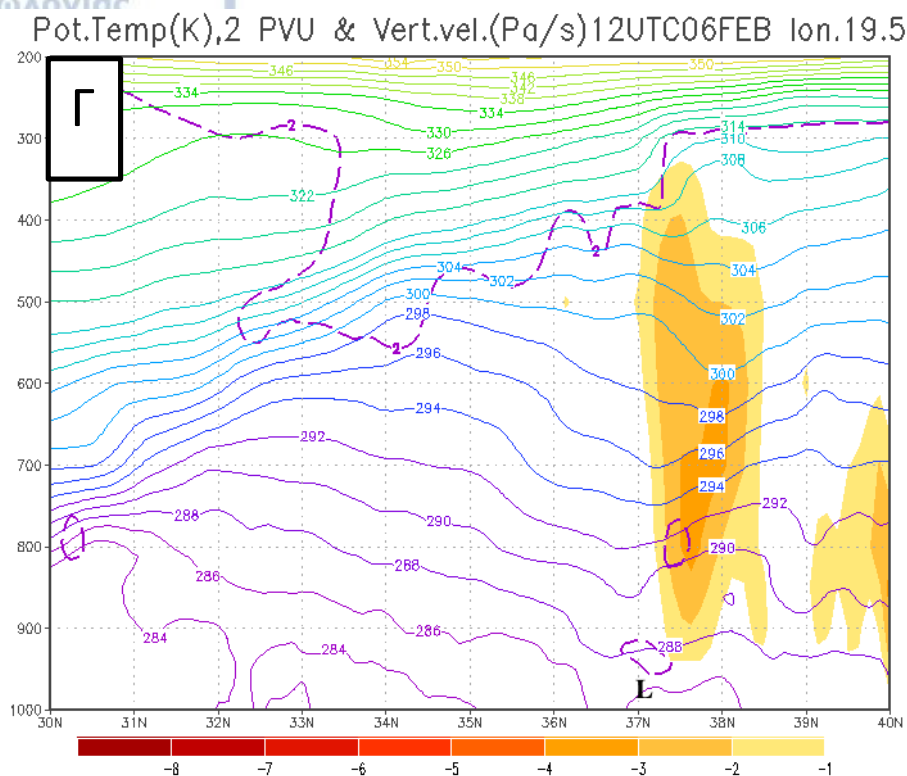
βρίσκεται μια ψυχρή καθ' ύψος μάζα, ενώ οι αέριες άζες γύρω από την +PV είναι θερμότερες στη μέση τροπόσφαιρα.

Η στρωμάτωση ($|d\theta/dp|$) είναι έντονη μέσα στη στρατόσφαιρα ($PV > 2$ PVU), καθώς και σε μία περιοχή, που φαίνεται να είναι η προέκταση προς τα νότια και προς τα κάτω της ανωμαλίας PV. Μέσα στην ψυχρή (καθ' ύψος) μάζα της βορειο-αφρικανικής trough – που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την +PV – καθώς και μέσα στη θερμότερη αέρια μάζα, που βρίσκεται βορειότερα της +PV, επάνω από τη Μεσόγειο, στην περιοχή 33 - 40 μοίρες γεωγραφικό πλάτος, η στρωμάτωση είναι ασθενής. Ειδικά στις 33-34 μοίρες γεωγραφικό πλάτος υπάρχει μία περιοχή όπου ο λόγος $d\theta/dz$ γίνεται αρκετά μικρός. Σε αυτή την περιοχή παρατηρούνται και ανοδικές κινήσεις οι οποίες πιθανότατα συνδέονται με τον στρόβιλο της κεντρικής Μεσογείου. Λόγω της διαφοράς στρωμάτωσης μεταξύ αυτής της περιοχής (33 - 34°B) και της +PV, αν αέρια δείγματα κινηθούν από την +PV προς την περιοχή 33 - 34°B, πρέπει ο στροβιλισμός τους να αυξηθεί, καθώς το γινόμενο στρωμάτωσης και στροβιλισμού - δηλ. ο PV (Hoskins et al., 1985) – πρέπει να παραμείνει σταθερό. Στο 8ο Κεφ, θα υποδειχθεί ένα πιθανό σενάριο για την κίνηση του αέρα από την ανωμαλία PV προς την περιοχή της εκρηκτικής κυκλογένεσης.

Επομένως, από την τομή του σχ. 5.3Α, διαπιστώνεται ότι η ενίσχυση του στροβίλου της υπό μελέτη μετεωρολογικής βόμβας πριν, αλλά και στα αρχικά στάδια της εκρηκτικής κυκλογένεσης, πιθανότατα να οφείλεται στην παρουσία της συγκεκριμένης ανωμαλίας της τροπόπαυσης (+PV) στην περιοχή.



Σχήμα 5.3) Κατακόρυφη τομή στις α) 12.5 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 β) 19 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 06UTC 06 Φεβρουαρίου γ) 19.5 μοίρες γεωγραφικό μήκος στις 12UTC 06 Φεβρουαρίου, της δυνητικής θερμοκρασίας (συνεχείς γραμμές) σε K και της κατακόρυφης ταχύτητας (shaded contours) σε Pa/s (εμφανίζονται μόνο οι αρνητικές τιμές). Η διακεκομμένη μωβ γραμμή δείχνει την θέση της επιφάνειας 2 PVU. Από τις 06 UTC και έπειτα με "L" σημειώνεται η θέση της ύφεσης στην επιφάνεια. Η θέση των κατακόρυφων τομών σημειώνεται στα σχήματα 5.2β, 5.2γ, 5.2δ.



Σχήμα 5.3) (συνέχεια)

Στις 06 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 η επιφάνεια των 2 PVU, σύμφωνα με την κατακόρυφη δομή του σχήματος 5.3β, βρίσκεται σε μεγαλύτερα ύψη (400-500hPa). Η επίδραση της στο πεδίο της δυνητικής θερμοκρασίας πλησιάζει έως τα 600 - 700hPa.

Σε αυτή την τομή αποτυπώνεται επίσης με σαφήνεια και ο στρόβιλος της «βόμβας» (L), ο οποίος πλέον εκτείνεται σε όλη την τροπόσφαιρα, είναι αρκετά πιο ισχυρός ενώ συγχρόνως βρίσκεται λίγο πιο «μπροστά» από την θετική ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού. Ο στρόβιλος της βόμβας είναι φανερά ένα σύστημα 'θερμού πυρήνα' (warm core), όπως φαίνεται από τη διάταξη των ισηντρικών επιφανειών γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του συστήματος.

Πάντως, όπως φαίνεται και από το ίχνος της τομής στο σχήμα 5.2γ, η τελευταία βρίσκεται λίγο «μπροστά» από τη θετική ανωμαλία PV, γι' αυτό και το υψόμετρο της τελευταίας στο σχ. 5.3B εμφανίζεται μεγαλύτερο (400 – 500 hPa) από ό,τι αυτό στην τομή του σχ. 5.3A (600 hPa). Όπως θα προταθεί και στο Κεφ. 8, οι δύο τομές των σχ. 5.3A,B απέχουν ιδανικά μεταξύ τους, τόσο σε γεωγραφικό μήκος (~ 6°), όσο και χρονικά (6h), ώστε να βοηθήσουν στο σχηματισμό ενός σεναρίου σχετικά με την παραγωγή στροβιλισμού κατά την κίνηση (Lagrange) αερίων μαζών από την +PV (τομή 00UTC 6/2) προς τη μετ. βόμβα (τομή 06UTC 6/2).

Τέλος, έως τις 12UTC 06 Φεβρουαρίου του 2012, σύμφωνα με το σχήμα 5.3γ η ανωμαλία της τροπόπαυσης συνεχίζει να συνεισφέρει στον στρόβιλο. Η ανωμαλία του PV αυτή την χρονική στιγμή διεισδύει έως και την ισοβαρική επιφάνεια των 500-600 hPa την ίδια στιγμή που ο στρόβιλος καταλαμβάνει μικρότερη έκταση αλλά εμφανίζεται αρκετά πιο ενισχυμένος κατά μήκος όλης της Τροπόσφαιρας.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΚΥΚΛΟΓΕΝΕΣΗ

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί η ροή στο ύψος των μεγίστων ανέμων. Σε αυτό το επίπεδο, όπως είναι ήδη γνωστό, μεγιστοποιείται η οριζόντια απόκλιση της μάζας η οποία σχετίζεται με ανοδικές κινήσεις και συνεπώς με πτώση της πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας.

Η μέση απόκλιση στο ανατολικό κομμάτι ενός μικρού μήκους κύματος αυλώνα σύμφωνα με τους Palmen and Newton, (1969) δίνεται από την παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$D \cong 16\pi^2 AV(V-V_L) / f L^3 \quad (6.1.1)$$

Όπου το A είναι το πλάτος του κύματος, V η ταχύτητα της ροής στο επίπεδο του κύματος, $V-V_L$ η κατακόρυφη διάτμηση του ανέμου μεταξύ της επιφάνειας μηδενικής απόκλισης και της επιφάνειας πάνω στην οποία βρίσκεται ο αυλώνας, f η παράμετρος Coriolis και τέλος L^3 το μήκος κύματος εις την τρίτη. Η επιφάνεια του κύματος, άρα και του αυλώνα του, θεωρείται η επιφάνεια των μεγίστων ανέμων/αεροχειμάρρου.

Συνεπώς η απόκλιση στην ανώτερη Τροπόσφαιρα μεγιστοποιείται όταν:

- 1) Όταν ο αυλώνας έχει μεγάλο πλάτος (είναι 'βαθύς') και μικρό μήκος κύματος.
- 2) Όταν στην ανώτερη τροπόσφαιρα υπάρχει κάποιο μέγιστο αεροχειμάρρου.
- 3) Όταν υπάρχει ισχυρός κατακόρυφος διατμητικός άνεμος (wind shear) μεταξύ του επιπέδου των αεροχειμάρρων με το επίπεδο μηδενικής απόκλισης.

Η οριζόντια απόκλιση της μάζας στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας αποτελεί βασικό παράγοντα για την δημιουργία εκρηκτικής κυκλογένεσης. Σύμφωνα με την θεωρία σχηματισμού υφέσεων (Μακρογιάννης και Σαχσαμάνογλου, 2004) σε πρώτη φάση παρατηρείται σύγκλιση των αερίων μαζών στην επιφάνεια και προς το κέντρο της ύφεσης. Σύμφωνα όμως με την αρχή της συνέχειας, οι αέριες μάζες που συγκλίνουν προς το κέντρο της επιφανειακής ύφεσης βρίσκουν διέξοδο προς τα επάνω. Εάν κατά την κίνηση τους αυτή «συνδεθούν» με περιοχή όπου υφίσταται οριζόντια απόκλιση της μάζας μεγαλύτερης σε μέτρο από την σύγκλιση τότε η ανοδική κίνηση ενισχύεται και συνεπώς στην επιφάνεια η πίεση μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Η απόκλιση στην ανώτερη τροπόσφαιρα σύμφωνα με τους (Jacobs et al. 2004) είναι στενά συνδεδεμένη με την μεταφορά κυκλωνικού στροβιλισμού ενώ συγχρόνως αποτελεί αποτέλεσμα της αλλαγής της κατεύθυνσης ή της ταχύτητας του

άνεμου (Ahrens, 2008). Όταν επομένως σε ένα χάρτη ανώτερης τροπόσφαιρας παρατηρείται απομάκρυνση των ισοϋψών καμπυλών ή ο άνεμος επιταχύνει παρατηρείται απόκλιση (Businger et al. 2004).

Η οριζόντια σύγκλιση/απόκλιση οφείλεται αποκλειστικά στον αγεωστροφικό άνεμο, αφού ο γεωστροφικός είναι, εξ' ορισμού του, μη αποκλίνων (non-divergent). Ο αγεωστροφικός άνεμος ορίζεται ως η διανυσματική διαφορά του γεωστροφικού από τον πραγματικό άνεμο.

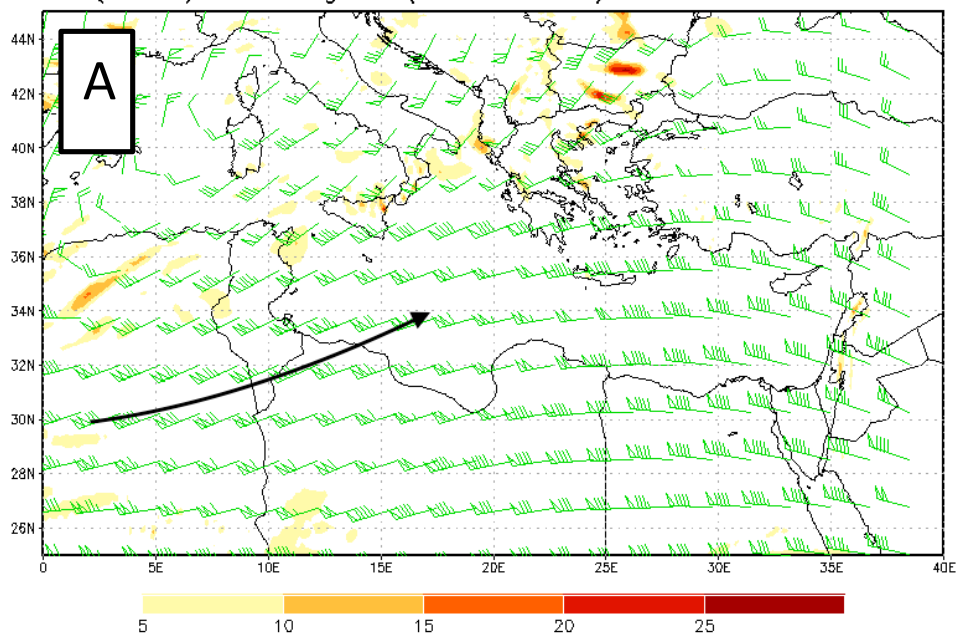
$$\overrightarrow{V_{ageo}} = \vec{V} - \overrightarrow{V_{geo}}$$

Σύμφωνα με τον Μπρίκα, (2006) ο οποίος μελέτησε την «μετεωρολογική βόμβα» του 2004, τα αγεωστροφικά (μη γεωστροφικά) ρεύματα, που συνόδευαν τα μέγιστα του υποτροπικού αλλά και πολικού αεροχειμάρρου, άντλησαν μάζα από την συγκεκριμένη περιοχή ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την οριζόντια απόκλιση της μάζας και κατά συνέπεια και τον στρόβιλο της «βόμβας». Ο μηχανισμός της «συνεργασίας» πολικού και υποτροπικού αεροχειμάρρου στην άντληση μάζας επάνω από περιοχές κυκλογένεσης και εντόνων καιρικών φαινομένων έχει από καιρό μελετηθεί από τους Uccellini et al. (1984), Uccellini et al. (1987), Uccellini and Kocin (1987) κ.ά.

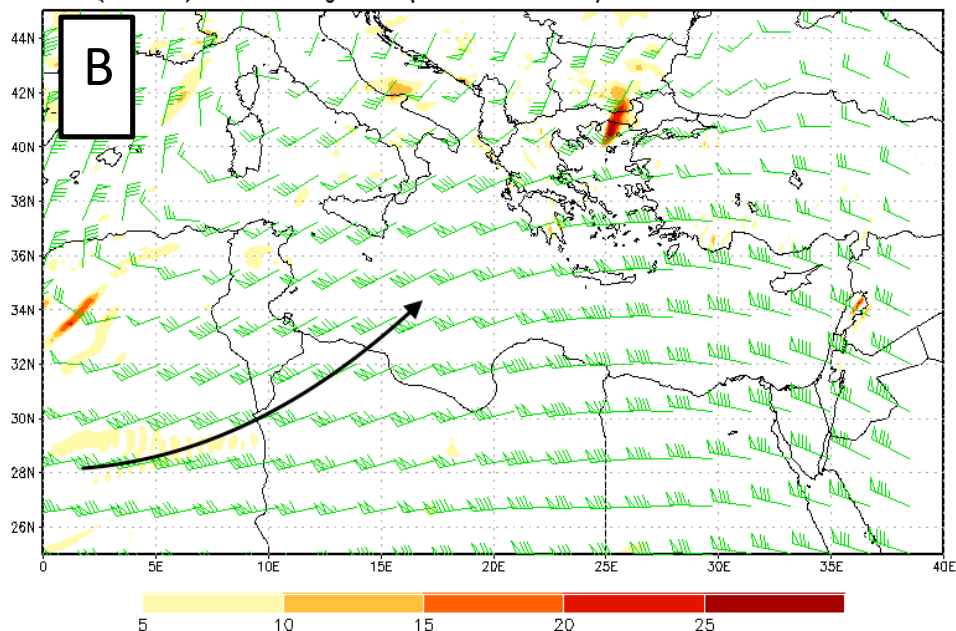
Παρουσιάζεται το πεδίο της απόκλισης (μόνο των θετικών τιμών) της μάζας αλλά και ο άνεμος στην ισοβαρική επιφάνεια των 300hPa για ένα μέρος της προκυκλογενετικής περιόδου (00 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 έως και τις 18 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012) αλλά και για την περίοδο της εκρηκτικής κυκλογένεσης (18 UTC 05 Φεβρουαρίου έως 18 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012). Με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσει να εξετασθεί η συνεισφορά των μεγίστων αεροχειμάρρων (jet streak) στο πεδίο της απόκλισης της μάζας κατά την περίοδο της ενίσχυσης του (συνενωμένου) πολικού-υποτροπικού αεροχειμάρρου (00 UTC – 18 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012) αλλά και όταν το μέγιστο εμφανίσθηκε επάνω από την περιοχή όπου εξελίχθηκε η εκρηκτική κυκλογένεση.

6.1) Χρονική περίοδος 00-18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012

Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 00UTC 05 FEB

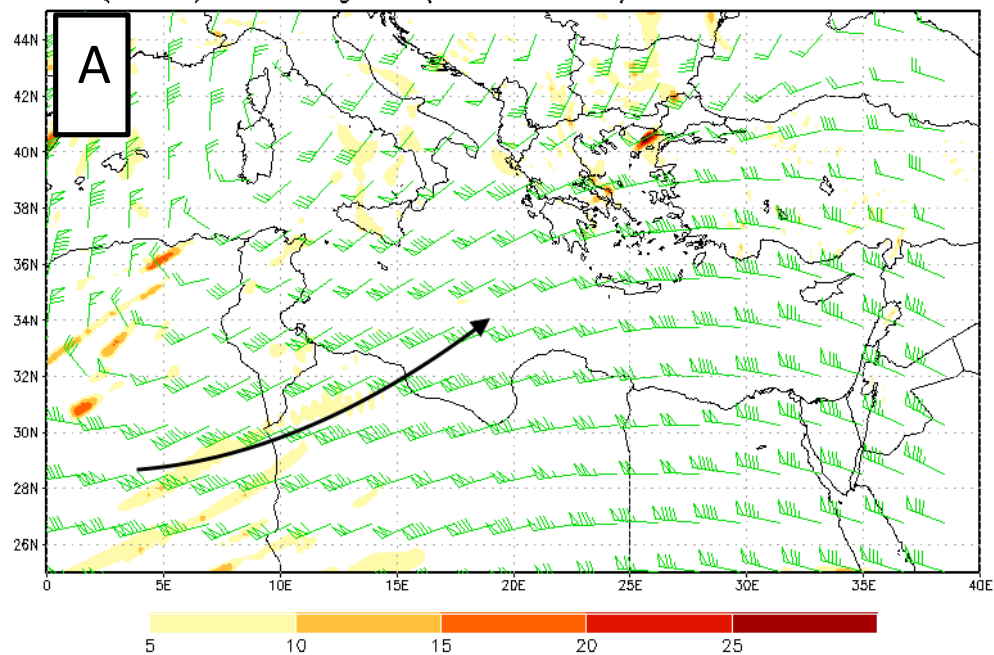


Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 06UTC 05 FEB

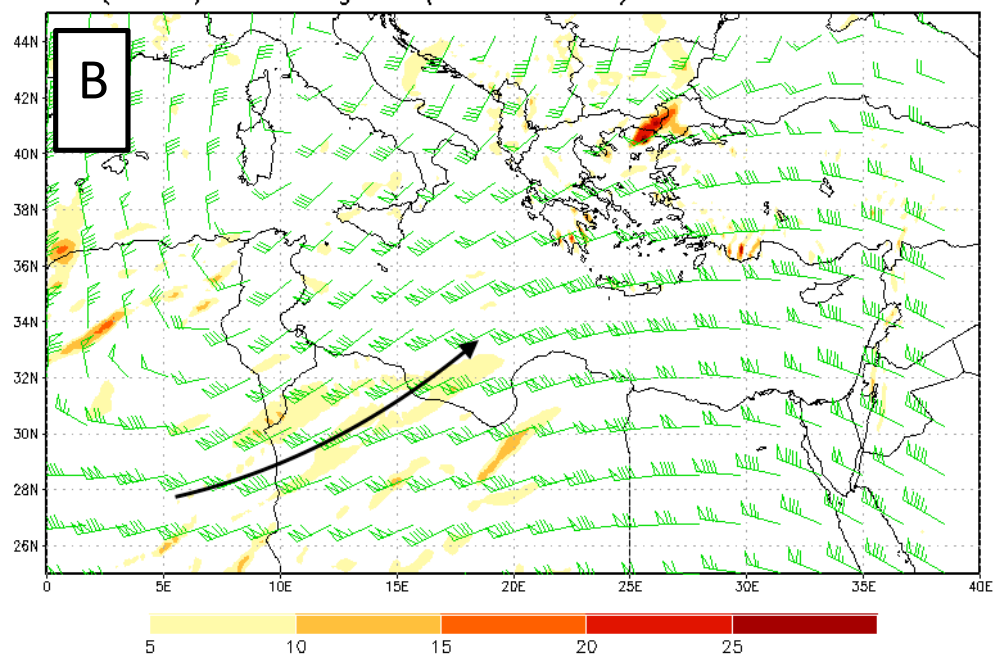


Σχήμα 6.1) Η απόκλιση (σκίαση θετικών τιμών σε μονάδες 10^{-5} x s^{-1}) και ο άνεμος (wind barbs σε κόμβους) στην ισοβαρική επιφάνεια των 300 hPa για τις α) 00 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 και β) 06 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012. Με το βέλος απεικονίζεται η θέση του μεγίστου αεροχειμάρρου (jet streak).

Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 12UTC 05 FEB



Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 18UTC 05 FEB



Σχήμα 6.2) (συνέχεια) α) 12 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 και β) 18 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012.

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω στην παρούσα μελέτη, την χρονική περίοδο 00Z-18UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 παρατηρείται μία συνεχή εξάπλωση της ράχης στον Ατλαντικό ωκεανό προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Η κίνηση αυτή του Atlantic Ridge εξαναγκάζει τον μεγάλου μήκους κύματος αυλώνα να κινηθεί προς τα νοτιοδυτικά, «μεγεθύνοντας» (amplifying) με αυτόν τον τρόπο την trough μέχρι την Αφρική. Η παραπάνω κυκλοφορία οδήγησε σε αύξηση της βαθμίδας των υψών επάνω από την Βορειοδυτική Αφρική, ενδυναμώνοντας με αυτό τον τρόπο το jet streak, που προϋπήρχε στην περιοχή το προηγούμενο διάστημα. Σύμφωνα με την σχέση των Palmen και Newton, 1969 η ενδυνάμωση του jet streak είναι ικανή να επιδράσει από μόνη της επάνω στο πεδίο της απόκλισης.

Συγκεκριμένα στο σχήμα 6.1α (εικόνα που αναφέρεται για την χρονική στιγμή 00 UTC στις 5 Φεβρουαρίου του 2012) διακρίνεται ότι το jet streak διέρχεται επάνω από την Αλγερία, την Τυνησία και την Βορειοδυτική Λιβύη και εμφανίζει ελαφριά κυκλωνική καμπυλότητα⁵. Την ίδια χρονική στιγμή δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες τιμές απόκλισης στην συγκεκριμένη περιοχή. Οι τοπικά μεγάλες τιμές απόκλισης στην Ανατ. Μακεδονία – Θράκη οφείλονται σε φαινόμενα ασταθείας, μεσο-β, κυρίως, κλίμακας, μέσα στο θερμό τομέα του εκτεταμένου συστήματος χαμηλών πιέσεων της κεντρικής Μεσογείου, τα οποία εκδηλώθηκαν λόγω της διέλευσης μιας μικρού μήκους κύματος διαταραχής στα 500 hPa (βλ. Σχ. 4.2β).

Έξι ώρες αργότερα (σχήμα 6.1β) και καθώς ο μεγάλου μήκους κύματος αυλώνας κινείται ελαφρώς προς τα ανατολικά η καμπυλότητα του Jet streak γίνεται περισσότερο κυκλωνική. Οι άνεμοι στον πυρήνα του αυξάνονται κατά 10-20 κόμβους αλλά έως και αυτή την χρονική στιγμή δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στο πεδίο της απόκλισης.

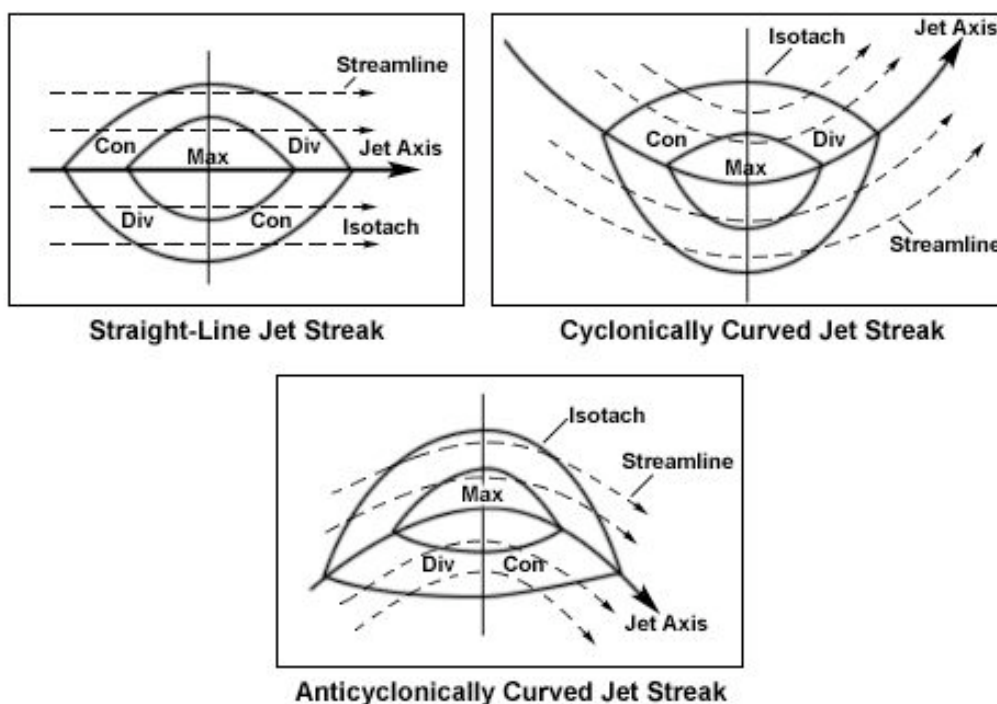
Στις 12 UTC στις 05 Φεβρουαρίου 2012 (σχήμα 6.2α) το jet streak, λόγω της κίνησης του αυλώνα προς τα ανατολικά, πλησιάζει την περιοχή στην οποία ξεκίνησε η εκρηκτική κυκλογένεση ενώ ο πυρήνας του ενισχύεται ακόμη περισσότερο. Όσον αφορά το πεδίο της απόκλισης, αρχίζουν και εμφανίζονται οι πρώτες τιμές απόκλισης στην περιοχή ($5 \times 10^{-5} \times s^{-1}$) οι οποίες κατά πάσα πιθανότητα συνδέονται με την ενίσχυση του jet streak.

Τέλος στις 18 UTC 05 Φεβρουαρίου 2012 (σχήμα 6.2β) το jet streak εμφανίζεται πάνω από την περιοχή μελέτης. Πλέον εμφανίζει κυκλωνική καμπυλότητα, έχει ενισχυθεί κατά 20- 30 κόμβους μέσα σε ένα διάστημα

⁵ Η καμπυλότητα συνάγεται από την τροχιά, που υποδεικνύουν τα μέγιστα των αεροχειμάρρων κατά την περίοδο μελέτης. Λόγω της αρχής διατήρησης του στροβιλισμού, απουσία σημαντικής σύγκλισης/απόκλισης στον άξονα του αεροχειμάρρου (Palmen and Newton, 1969,) τα αέρια δείγματα τείνουν να κινούνται παράλληλα σε αυτόν, καθώς κάποιου άλλου είδους κίνηση θα απαιτούσε σημαντική μεταβολή του στροβιλισμού.

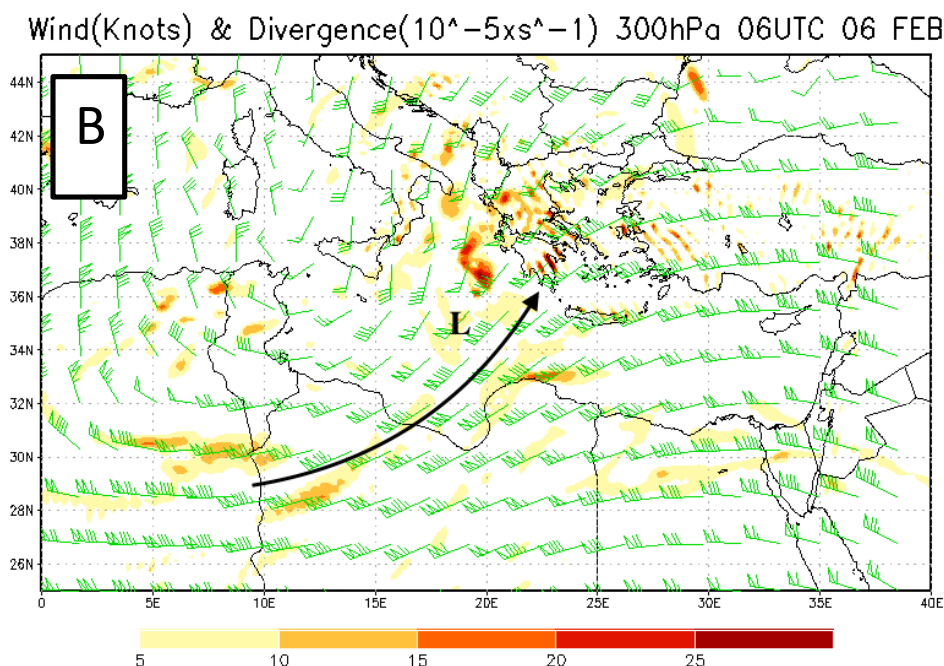
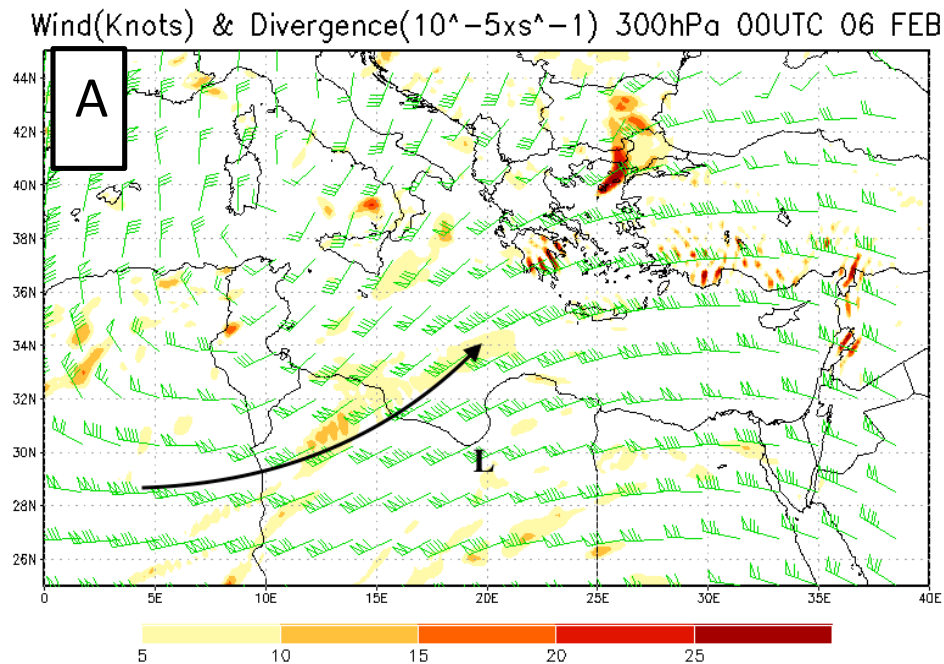
18 ωρών ενώ απόκλιση σημειώνεται κυρίως στην έξοδο του. Η παραπάνω παρατήρηση ταιριάζει απόλυτα με την μελέτη των Beebe and Bates, (1965), οι οποίοι υποστήριξαν πως σε ένα jet, στο οποίο ο άξονας του εμφανίζει κυκλωνική καμπυλότητα, δεν παρατηρούνται πλέον οι 4 γνωστοί πόλοι απόκλισης και σύγκλισης, αλλά κάνουν την εμφάνιση τους δύο πόλοι, με απόκλιση στην έξοδο και σύγκλιση στην είσοδο (σχήμα 6.3). Το αντίθετο συμβαίνει σε ένα jet streak που εμφανίζει αντικυκλωνική καμπυλότητα (σύγκλιση στην έξοδο και απόκλιση στην είσοδο). Επομένως, σαν συμπέρασμα, προκύπτει πως στις 18UTC 05 Φεβρουαρίου, ώρα έναρξης της εκρηκτικής κυκλογένεσης, το ενδυναμωμένο πλέον jet streak πιθανότατα συνδέεται με την αύξηση των τιμών της οριζόντιας απόκλισης της μάζας στο ισοβαρικό επίπεδο των 300hPa. Η απόκλιση αυτή πραγματοποιείται ακριβώς επάνω από την περιοχή όπου αναπτύσσεται ο ρηχός αυτή τη χρονική στιγμή στρόβιλος, ο οποίος στην συνέχεια θα αρχίσει να βαθαίνει με ρυθμούς «μετεωρολογικής βόμβας».

Effect of Curvature on Jet Dynamics



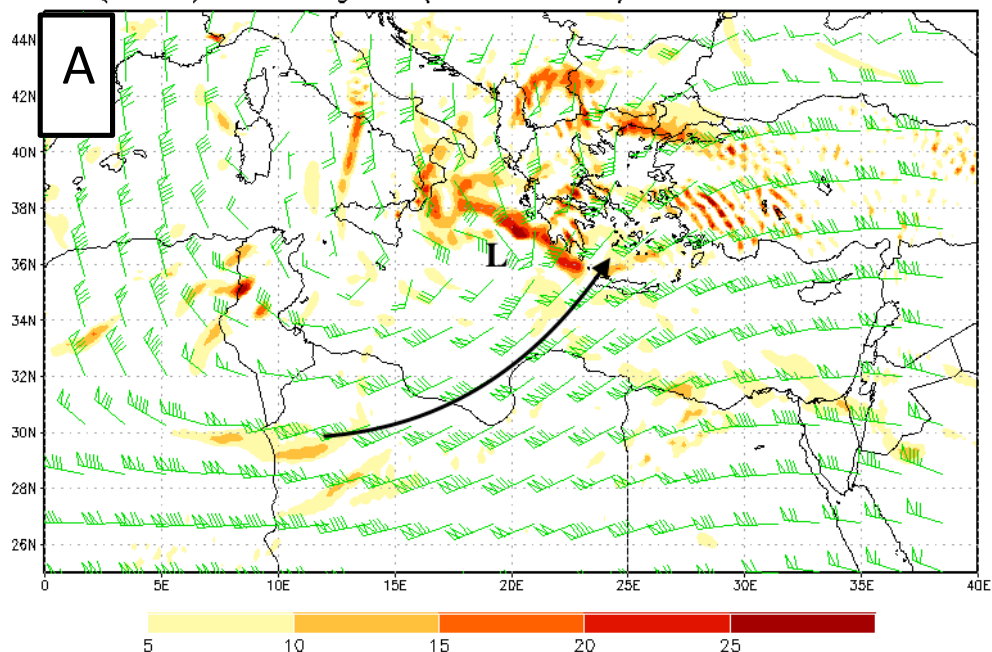
Σχήμα 6.3) Η επίδραση της καμπυλότητας στους πόλους σύγκλισης και απόκλισης ενός μεγίστου αεροχειμάρρου (jet streak) σύμφωνα με τους Beebe and Bates (1965).

6.2) Χρονική περίοδος 00-18UTC 06 Φεβρουαρίου 2012

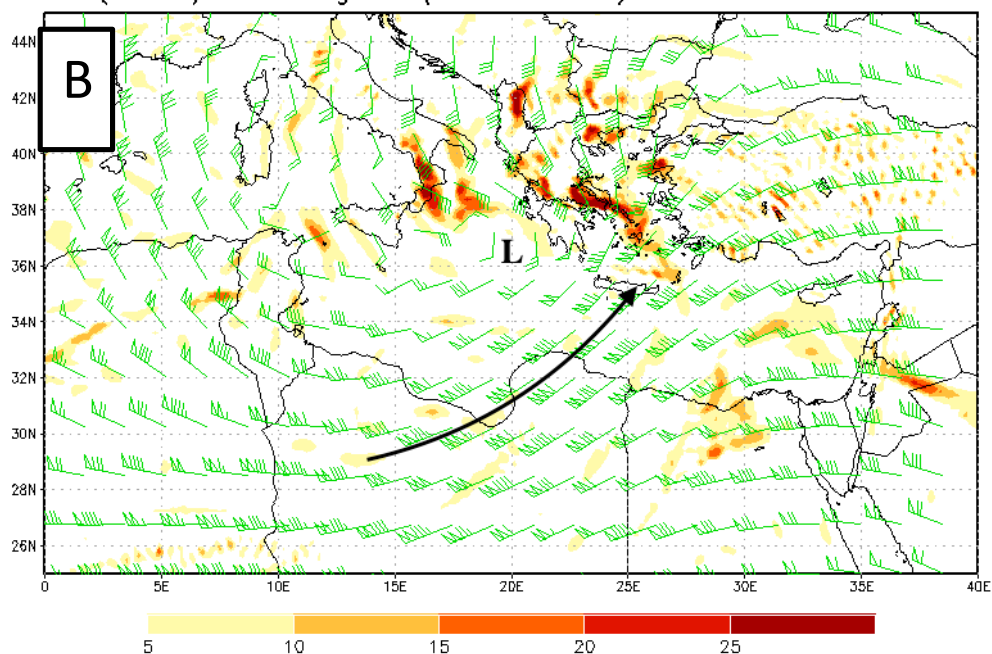


Σχήμα 6.4) Η απόκλιση (σκίαση θετικών τιμών σε μονάδες 10^{-5} s^{-1}) και ο άνεμος (wind barbs σε κόμβους) στα 300 hPa για τις α) 00 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 και β) 06 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012. Με το βέλος απεικονίζεται η θέση του μεγίστου αεροχειμάρρου (jet streak) ενώ με "L" η θέση της επιφανειακής ύφεσης.

Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 12UTC 06 FEB



Wind(Knots) & Divergence(10^{-5} s^{-1}) 300hPa 18UTC 06 FEB



Σχήμα 6.5) (συνέχεια) α) 12 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 και β) 18 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012.

Στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (σχήμα 6.4α) ένα μεγάλο τμήμα του jet streak εντοπίζεται επάνω από τον κόλπο της Σύρτης, περιοχή στην οποία θα εξελιχθεί η εκρηκτική κυκλογένεση. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αυτή τη χρονική στιγμή παρατηρούνται δύο στρόβιλοι. Ένα ρηχός στρόβιλος στο χαμηλότερο τμήμα της τροπόσφαιρας στις βόρειες ακτές της Λιβύης και ένας στρόβιλος στην μέση και ανώτερη Τροπόσφαιρα στην περιοχή της Σικελίας. Όσον αφορά το πεδίο της απόκλισης, τιμές έως και $10^{-4} \times s^{-1}$ παρατηρούνται κυρίως στην έξοδο του Jet streak το οποίο συνεχίζει να εμφανίζει κυκλωνική καμπυλότητα.

Στις 06 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012 (σχήμα 6.4β), η επιφανειακή ύφεση βρίσκεται ελαφρώς αριστερά και κάτω από τον άξονα του jet streak. Αξίζει να σημειωθεί πως από την συγκεκριμένη χρονική στιγμή έως και τις 12 UTC, ο μεγάλου πλάτους αυλώνας αρχίζει να αποκτά αρνητική κλίση. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην μείωση της απόστασης του από την μπροστινή ράχη στην περιοχή της Τουρκίας (μία απόσταση που ισούται με μισό μήκος κύματος) με αποτέλεσμα, εκτός από την ψυχρή μεταφορά, να αυξάνονται και οι τιμές της απόκλισης στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Παρ' όλα αυτά, συνεισφορά στο πεδίο της απόκλισης φαίνεται να έχει και το jet streak, το οποίο τώρα βρίσκεται λίγα χιλιόμετρα νοτιοανατολικά του στρόβιλου, που πλέον εκτείνεται σε όλη την τροπόσφαιρα.

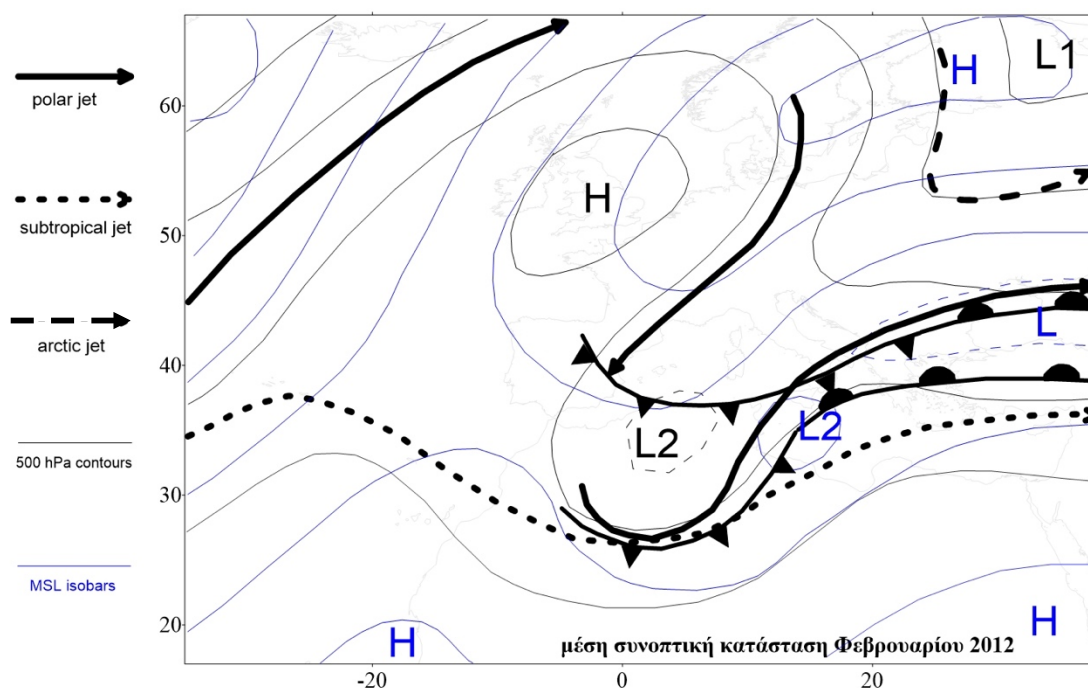
Σύμφωνα με τα σχήματα 6.5 (εικόνα α και εικόνα β) συνεισφορά των μεγίστων ανέμων στο πεδίο της οριζόντιας απόκλισης της μάζας υφίσταται έως τις 12 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012. Από εκεί και έπειτα το jet streak απομακρύνεται από την περιοχή που εξελίσσεται και κινείται ο στρόβιλος της «βόμβας». Επομένως σύμφωνα με την ανάλυση των επιχειρησιακών δεδομένων του Ευρωπαϊκού κέντρου αλλά και με τους παραπάνω χάρτες το jet streak μέσω των αγεωστροφικών κυκλοφοριών του επηρέασε την εξέλιξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης για ένα διάστημα 6 ωρών (από τις 06 - 12 UTC 06 Φεβρουαρίου 2012), διάστημα στο οποίο παρατηρούνται και οι μεγαλύτεροι ρυθμοί βάθυνσης στην επιφάνεια.

7.1) Ανασκόπηση των συνοπτικών συνθηκών της περιόδου Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου 2012

Ο χειμώνας 2011 – 2012 χαρακτηρίστηκε από χαμηλές γενικά θερμοκρασίες, κυρίως στη Βορειοδυτική Ελλάδα (Δυτ. Μακεδονία), οι περισσότερες από τις οποίες σημειώθηκαν κατά την περίοδο Ιανουαρίου μέσω Φεβρουαρίου, οπότε και η ανώτερη ροή στην Ευρωπαϊκή περιοχή χαρακτηρίστηκε από αυξημένη μεσημβρινή συνιστώσα, με βόρειο γενικά ρεύμα. Συγχρόνως, η ροή στον Ατλαντικό ήταν NNΔ, αντί της συνήθους δυτικής.⁶ Η συνοπτική αυτή κατάσταση είναι γνωστή ως ατμοσφαιρικός εμποδισμός (atmospheric blocking; Rex, 1950a;b) και μια σχηματική απεικόνισή της δίνεται στο Σχ. 7.1, για την περίπτωση μιας από ΒΑ προς ΝΔ πλαγιασμένης ράχης εμποδισμού. Ακριβώς ανατολικά (downstream) του block, η BBA ροή μεταφέρει ψυχρές αέριες μάζες, λόγω των οποίων βαθύς αυλώνας (trough) σχηματίζεται στην ανώτερη τροπόσφαιρα, αλλά όχι εξίσου βαθύ βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια (L με μπλε χρώμα στο σχ. 7.1). Εκτός από την ψυχρή μεταφορά και τη μετωπογένεση στη βάση της trough, επιπρόσθετος μηχανισμός βάθυνσης της trough αυτής είναι και η δυναμική αστάθεια (baroclinic instability) που συχνά χαρακτηρίζει τα ισχυρά βόρεια ρεύματα μιας ράχης της ανώτερης τροπόσφαιρας (δυναμικά ασταθής ράχη).

⁶ <http://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?map=1&model=noaa&var=1> είναι η πηγή των σχετικών χαρτών.

Αρχικά, τον Ιανουάριο, η ανώτερη ράχη εμποδισμού σχηματίστηκε επάνω από τη Δυτική Ευρώπη, προσανατολισμένη μεσημβρινά, με αποτέλεσμα, ψυχρές και σχετικά ξηρές αέριες μάζες να επικρατήσουν στην Ανατολική Ευρώπη. Σταδιακά το Φεβρουάριο, η ράχη εμποδισμού απέκτησε 'κλίση' από ΝΔ προς ΒΑ, με τρόπο ανάλογο αυτού που περιγράφεται στους Thorncroft et al. (1993), (βλ. περίπτωση, που οι παραπάνω συγγραφείς αποκαλούν 'περίπτωση αντικυκλωνικής ανεμοβαθμίδας' (anticyclonic shear case), σχ. 13b των παραπάνω συγγραφέων), φάση η οποία και απεικονίζεται στο Σχ. 7.1, και που είναι αρκετά αντιπροσωπευτική της μέσης συνοπτικής κατάστασης του



Σχ. 7.1) Μέση συνοπτική κατάσταση Φεβρουαρίου 2012.

Φεβρουαρίου 2012. Οι ισοϋψείς (ισοβαρείς) είναι σχεδιασμένες με μαύρο (μπλε) χρώμα, ενώ οι άξονες των αεροχειμάρρων με έντονη μαύρη γραμμή, εστιγμένη για τον υποτροπικό αεροχείμαρρο (subtropical jet SJ), συνεχή για τον πολικό αεροχείμαρρο (polar jet, PJ) και διακεκομμένη για τον αρκτικό αεροχείμαρρο (Arctic Jet, AJ). Τα ελάχιστα γεωδυναμικού ύψους στην ανώτερη τροπόσφαιρα (χαμηλής βαρομετρικής πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας, Mean Sea Level, MSL) σημειώνονται με μαύρο (μπλε) 'L', ενώ αντίστοιχα τα μέγιστα με 'H'.

Ο εμποδισμός, που απεικονίζεται στο Σχ. 7.1, έχει στοιχεία τόσο Ω block, λόγω σχήματος της ροής, όσο και διπόλου εμποδισμού (blocking dipole), διότι, λόγω του «πλαγιάσματος» της ράχης εμποδισμού, στον ίδιο μεσημβρινό βρίσκονται μια ράχη ισοϋψών στο βορρά και ένας αυλώνας στο νότο.

Η κλίση που έλαβε ο εν λόγω εμποδισμός, του Φεβρουαρίου 2012, είχε σαν αποτέλεσμα την ευκολότερη 'διχοτόμηση' της δυτικής ροής, που εξακολουθούσε να υφίσταται αρκετά δυτικά του εμποδισμού, στο δυτικό Ατλαντικό. Έτσι, λοιπόν, διαταραχές, μπορούν τώρα να διέρχονται νοτίως του εμποδισμού, κατά μήκος του SJ (εστιγμένη γραμμή στο Σχ. 7.1) και να φθάνουν στην ανατολική πλευρά του εμποδισμού, όπου και να ενισχύονται λόγω της μετωπογένεσης, που λαμβάνει χώρα εκεί.

Επίσης, ούτως ή άλλως, διαταραχές δύνανται να διέλθουν και από την επάνω πλευρά του εμποδισμού, να κάνουν δηλαδή το γύρο του αντικυκλώνα εμποδισμού κατά μήκος του PJ (συνεχής γραμμή στο σχ. 7.1) και να 'κατέβουν' από BBA προς την περιοχή ακριβώς κατάντι (downstream) του εμποδισμού, όπου λαμβάνει χώρα η μετωπογένεση. Η διχοτόμηση της δυτικής ροής ανάντι (upstream) του εμποδισμού δεν είναι πλήρως ορατή στους χάρτες των 300 (500) hPa του Σχ. 4.4 (4.2), καθώς αυτοί δεν εκτείνονται τόσο μακριά προς δυσμάς, όσο ο σχηματικός χάρτης του Σχ. 7.1. Φαίνεται, όμως, καθαρά η επανένωση της ροής κατάντι του εμποδισμού, στις 30°B και $\pm 10^\circ$ από το μεσημβρινό του Greenwich, καθώς και (από την αλληλουχία των χαρτών των 850 hPa της περιόδου 1 με 8 Φεβρ. 2012) η μετωπογένεση, που λαμβάνει χώρα κατάντι του εμποδισμού.

Από ό,τι φαίνεται από τους χάρτες των 300 hPa του Σχ. 4.4, μία τέτοια διαταραχή, προερχόμενη από τον Ατλαντικό, έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της υπό μελέτη μετ. βόμβας. Χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν υπήρχε διαταραχή του SJ, που να συντέλεσε στην εκρηκτική κυκλογένεση. Ούτως ή άλλως, όπως θα φανεί από τα παρακάτω, η αλληλεπίδραση μεταξύ PJ και SJ έπαιξε σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της βόμβας του Φεβρουαρίου 2012.

Η περιγραφή του Σχ. 7.1 αποσαφηνίζει το ρόλο της συνοπτικής κατάστασης στην εκρηκτική κυκλογένεση της 5 – 7 Φεβρουαρίου 2012. Η συνοπτική κατάσταση ακριβώς πριν την εκρηκτική κυκλογένεση ήταν σχεδόν όμοια με αυτή που περιγράφει το Σχ. 7.1: Στα νοτιοανατολικά του αντικυκλώνα εμποδισμού, βαθύς αυλώνας σχηματίζεται στα 500 hPa, σε συνδυασμό με τις ψυχρές εισβολές, που λαμβάνουν χώρα από τη Σιβηρία – Ρωσία προς την Ευρωπαϊκή ήπειρο. Στη βάση του αυλώνα αυτού (L1), υφέσεις σχετικά ρηχές (L), αλλά με έντονα μετωπικό χαρακτήρα, καθίστανται στάσιμες. Συγχρόνως, νοτιότερα, καταφθάνουν και επίσης ακινητοποιούνται υφέσεις (L2), που κινούνται από τα ΝΔ, κατά μήκος της ανατολικής πλευράς του αυλώνα L2, που βρίσκεται στη Β. Αφρική. Αξίζει να σταθούμε λίγο στον τρόπο δημιουργίας του αυλώνα L2: Κάποιες από τις ψυχρές εισβολές από τα ΒΑ είναι τόσο έντονες – και επειδή όλος ο εμποδισμός είναι στην αντικυκλωνική πλευρά του PJ (Thorncroft et al., 1993) – οι ανώτεροι αυλώνες, που συνοδεύουν τις ψυχρές αυτές εισβολές,

αποκόπτονται και οπισθοχωρούν (retrograde) προς τα ΑΝΑ. Εκεί είτε εισχωρούν κάποιες διαταραχές της ισχυρής δυτικής ροής, που διατηρείται upstream του block, είτε δημιουργούνται κάποιες ορογραφικές υφέσεις, στα υπήνεμα της οροσειράς του Άτλαντα. Όπως θα περιγραφεί και στην επόμενη ενότητα, αυτή ήταν και η περίπτωση, όσον αφορά το 'μητρικό' χαμηλό της υπό μελέτη βόμβας.

Όσον αφορά στην κατακόρυφη δομή των αερίων μαζών, παρ' όλο που οι ψυχρές αέριες μάζες των αυλώνων του τύπου L2 (Σχ. 7.1) συνήθως προέρχονται από την κεντρο-ανατολική Ευρώπη - Σιβηρία, η παραμονή τους επάνω από τη Μεσόγειο τις θερμαίνει και τις εμπλουτίζει σε υγρασία, καθιστώντας τις ασταθείς. Ειδικά στην περίπτωση που προέρχονται από το Β. Ατλαντικό, χαρακτηρίζονται από ακόμη μεγαλύτερη αστάθεια, λόγω της πολύ ψυχρής ανώτερης τροπόσφαιρας, που συνοδεύει τις ψυχρές μάζες των συστημάτων του Ατλαντικού (Atlantic storm track). Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη ψυχρών μαζών καθ' ύψος, συνεπάγεται υψηλές τιμές PV⁷. Μάλιστα, οι υψηλές αυτές τιμές PV βρίσκονται σε ένα περιβάλλον (Β. Αφρική – Μεσόγειος) με γενικά χαμηλές τιμές PV. Έτσι δημιουργείται μια έντονη θετική ανωμαλία PV (+PV) μέσα στην trough L2. Παρακάτω θα περιγραφεί πώς η αλληλεπίδραση των δύο αεροχειμάρρων, υποτροπικού και πολικού, δύναται να αυξήσει τις τιμές του PV. Σε ορολογία (δυναμικής) τροπόπαυσης, η trough L2 χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις της τροπόπαυσης. Ο συνδυασμός υψηλών τιμών PV, ή, ισοδύναμα, χαμηλής τροπόπαυσης και κατακόρυφης αστάθειας δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για επιφανειακή κυκλογένεση.

Για να λάβει χώρα κυκλογένεση στα χαμηλά στρώματα, πρέπει:

A) Να κινηθεί ο στρατοσφαιρικός αέρας (χαμηλού PV) καθοδικά και να διοχετευθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή στα χαμηλά στρώματα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να υπάρχει στα ανώτερα στρώματα μια βαροκλινική ζώνη (ανώτερο μέτωπο, upper level front), την οποία ο οριζόντιος άνεμος να τέμνει με μια υπολογίσιμη γωνία, ώστε ν' αναγκαστεί να λάβει καθοδική συνιστώσα⁸.

B) Να προϋπάρχει στην κατώτερη τροπόσφαιρα ένας, έστω ασθενής, στρόβιλος, ή μια περιοχή που να ευνοεί τη δημιουργία του. Τα μετωπογενετικά ενεργά επιφανειακά μέτωπα είναι περιοχές ευνοϊκές για κυκλογένεση, με τις ανοδικές κινήσεις που τα συνοδεύουν, ειδικά όταν τα υπεράνω αέρια στρώματα είναι ασταθή, όπως ισχύει στην περίπτωση του αυλώνα L2 (Σχ. 7.1). Επίσης, η θερμή θάλασσα, κατά τη χειμερινή περίοδο ευνοεί τα φαινόμενα υγρής ανωμεταφοράς (moist convection), τα οποία,

⁷ Λόγω του αυξημένου $|d\theta/dp|$ στην ανώτερη τροπόσφαιρα

⁸ Με άλλα λόγια, πρέπει η διεύθυνση του ανέμου να σχηματίζει γωνία με τις ισόθερμες, ή, ισοδύναμα, να λαμβάνει χώρα ψυχρή μεταφορά (Cold Air Advection, CAA).

με τη σειρά τους, συνοδεύονται από συμπυκνώσεις, που αυξάνουν τον PV στη μέση τροπόσφαιρα.

7.2) Ατμοσφαιρικές διεργασίες κατά τη διάρκεια της προκυκλογενετικής και κυκλογενετικής περιόδου

A) Συνένωση trough (trough merger)

Κατά τις αρχές του Φεβρουαρίου του 2012 η συνοπτική κατάσταση ήταν ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα: οι περισσότερες από τις ψυχρές εισβολές, που λάμβαναν χώρα ανατολικά του ευρωπαϊκού block, σχεδόν αποκόπτονταν στην περιοχή της κεντρο-δυτικής Μεσογείου – Β. Αφρικής (βλ. χάρτες 500 κ' 850 hPa, Σχ. 4.2 κ' 4.3, αντίστ.). Αυτή η προς νότο κίνησή τους είχε σαν αποτέλεσμα την τροποποίησή τους, από τα θερμά νερά της Μεσογείου, σε θαλάσσιες πολικές. Η τροποποίηση μετριαζόταν προς τα επάνω, με αποτέλεσμα να καταστούν αυτές ασταθείς, με τυπικές θερμοκρασίες -35°C στα 500, -4°C στα 850 hPa και αρκετά επάνω από το μηδέν στην επιφάνεια.

Στις 4 Φεβρουαρίου 2012 ο εμποδισμός του Ανατ. Ατλαντικού υπέστη μια προσωρινή συρρίκνωση προς τα ΝΝΔ, αφού μια διαταραχή του Δυτ. Ατλαντικού διήλθε από τη βόρεια πλευρά της ράχης εμποδισμού. Στις 5 Φεβ η διαταραχή αυτή έκανε όλο το γύρο, σχεδόν έως τη βάση του εμποδισμού στη Δυτική Μεσόγειο, όπου και, αν και εξασθενημένη, ενώθηκε με την υπάρχουσα trough. Η διαταραχή αυτή μπορεί να ανιχνευθεί τόσο στο πεδίο του ανέμου στα 300 hPa, όσο και στους χάρτες των 850 hPa, αλλά κυρίως στους χάρτες επιφανείας του U.K. Met Office (UKMO). Λόγω της προς νότο κίνησης της διαταραχής, το προϊόν της συνένωσης, με την προϋπάρχουσα trough στη Μεσόγειο, συνέχισε να κινείται και αυτό νότια, στο εσωτερικό της Β. Αφρικής. Σαν αποτέλεσμα της συνεισφοράς της διαταραχής του Ατλαντικού, η trough που προέκυψε ενισχύθηκε. Η θερμοκρασία έπεσε στους -30°C σε γεωγραφικό πλάτος 30°B και το εμβαδό της περιοχής, στα 500 hPa, όπου $\zeta_{\text{rel}} > 30 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ περίπου δεκαπλασιάστηκε μέσα σε 30 ώρες, κατά τη διάρκεια της συνένωσης των trough, από τις 00 UTC 5 έως τις 06 UTC 6 Φεβρουαρίου.

B) Συνένωση/διασταύρωση αεροχειμάρρων (jet superposition /crossing)

Η πιο θεαματική αλλαγή όμως παρατηρήθηκε στο πεδίο του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου στη βάση της trough της Δυτ. Μεσογείου, από ~ 115 kts, πριν τη συνένωση (12 UTC 4 Φεβ.), αυξήθηκε σε ~ 165 kts, μετά τη συνένωση (18 UTC 5 Φεβ., Σχ. 4.4), αύξηση η οποία αντιστοιχείται σε σύγχρονη αύξηση της κάθετης στον αεροχείμαρρο θερμοβαθμίδας από $\sim 12.5^{\circ}\text{C}/500$ km πριν τη συνένωση των διαταραχών, σε $\sim 20^{\circ}\text{C}/500$ km, μετά τη συνένωση. Άλλωστε, από τις 00UTC 6 Φεβ., οι δύο

αεροχειμάρροι, πολικός και υποτροπικός έχουν συνενωθεί και αυτοί επάνω από τη Λιβύη (Σχ. 4.4).

Η ενίσχυση του αεροχειμάρρου στη βάση της βορειοαφρικανικής trough, η αύξηση του στροβιλισμού/PV και η τοπική ενίσχυση της θερμοβαθμίδας είναι αλληλένδετα και έχουν άμεση σχέση με την υπέρθεση των δύο αεροχειμάρρων (jet superposition), του PJ και του SJ. Το φαινόμενο αυτό σημαίνει πως ο υποτροπικός υπερκαλύπτει τον πολικό αεροχειμάρρο και μάλιστα το ίδιο συμβαίνει και με τις αντίστοιχες τροποπαύσεις (βλ. Σχ. 5.3Α). Καθώς, σύμφωνα με την αρχή του θερμικού ανέμου ο κάθε αεροχειμάρρος συνοδεύεται από μια βαροκλιτική ζώνη στο υποκάτω αέριο στρώμα, με τη συνένωση, ενώνονται οι δύο βαροκλιτικές ζώνες, του πολικού και του υποτροπικού αεροχειμάρρου. Όπως είδαμε στο μέρος (Α) της ενότητας αυτής, το θερμοκρασιακό εύρος της βαρ. ζώνης του πολικού αεροχειμάρρου ήταν $12.5^{\circ}\text{C}/500\text{ km}$ πριν την συνένωση των trough/αεροχειμάρρων. Από τους χάρτες των 500 hPa προκύπτει πως το εύρος της βαρ. ζώνης του υποτροπικού αεροχειμάρρου ήταν $8 - 10^{\circ}\text{C}/500\text{ km}$. Όπως φάνηκε (βλ. παραπάνω), το θερμοκρασιακό εύρος της βαροκλιτικής ζώνης κάτω από το συνενωμένο αεροχειμάρρο ήταν $20^{\circ}\text{C}/500\text{ km}$, δηλαδή σχεδόν το άθροισμα των δύο βαροκλιτικών ζωνών πριν τη συνένωση. Το ίδιο δεν ισχύει και με τις ταχύτητες των αεροχειμάρρων, διότι στην περίπτωση της συνένωσης, λόγω της διαφοράς καμπυλότητας των δύο αεροχειμάρρων (έντονα κυκλωνική για τον PJ και ελάχιστα κυκλωνική για τον SJ, βλ. σχ. 5.2), τροποποιείται η σχέση του θερμικού ανέμου (βλ. εξίσωση 1 των Newton, 1965) έτσι, ώστε να μετριάζεται η εξάρτηση της έντασης του αεροχειμάρρου από τη θερμοβαθμίδα που επικρατεί κάτω από αυτόν.

Λόγω της συσσώρευσης πολλών ισεντροπικών επιφανειών σε ένα ατμοσφαιρικό πάχος μικρότερο μετά τη συνένωση, παρά πριν από αυτήν, ο PV πρέπει να αυξηθεί στο συνενωμένο αεροχειμάρρο, λόγω της αύξησης της απόλυτης τιμής του $d\theta/dr$. Τέτοια σημαντική αύξηση PV, γενικά, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με καθοδικές κινήσεις (κατακόρυφη μεταφορά PV). Υπό στενή, όμως, έννοια, για να ισχύσει η αρχή διατήρησης του PV, πρέπει η θεωρούμενη ποσότητα να είναι ο *ισεντροπικός* (isentropic) PV, οπότε και ο όρος της κατακόρυφης μεταφοράς εκλείπει. Τότε, κατά τους Sanders et al. (1991), τυρβώδεις ροές (turbulent fluxes) συντελούν στην τοπική αύξηση του PV και στη μείωση του υψομέτρου τόσο των αεροχειμάρρων, όσο και των αντίστοιχων βαροκλιτικών ζωνών.

Οι υψηλές τιμές PV, αλλά και η ως άνω περιγραφείσα μείωση του υψομέτρου της θετικής ανωμαλίας PV, σημαίνουν πως υπάρχει και έντονη μεταφορά PV και μάλιστα και σε κάπως χαμηλότερα στρώματα, άρα και αυξημένη πιθανότητα επιφανειακής κυκλογένεσης. Ειδικά στην περίπτωση που δεν πρόκειται απλά περί συνένωσης (superposition), αλλά

περί διασταύρωσης αεροχειμάρρων (jet crossing, βλ. Σχ 6 του Newton, 1965), αυξάνει περαιτέρω η μεταφορά PV. Πράγματι, στην περίπτωση που ένας δυτικής διεύθυνσης SJ, διασταυρωθεί με ένα ΝΔ διεύθυνσης PJ (πράγμα που ισχύει σε έναν ισχυρό αυλώνα, όπως φαίνεται στο σχ.6 του Newton, 1965), είναι δυνατόν δυτική ορμή (westerly momentum) να μεταφέρεται από τα ανώτερα στρώματα (στάθμη SJ), σε ένα περιβάλλον, όπου οι iso-PV contours είναι διατεταγμένες από ΝΔ προς ΒΑ (στάθμη PJ). Αυτό σημαίνει διατάραξη της ισορροπίας μεταξύ του PV και του πεδίου του ανέμου (imbalance) και μεγιστοποίηση της μεταφοράς PV στη στάθμη του PJ.

Οι Winters and Martin (2017) έχουν παρατηρήσει ότι στα περισσότερα σημαντικά/έντονα συνοπτικά καιρικά συστήματα λαμβάνει χώρα συνένωση/διασταύρωση αεροχειμάρρων. Έτσι και στην υπό μελέτη βόμβα, το φαινόμενο αυτό συνοδεύθηκε από τοπική αύξηση των τιμών του PV, άρα από αυξημένη μεταφορά PV και, οπότε, αυξημένη πιθανότητα κυκλογένεσης. Στα παρακάτω θα φανεί ότι η αυξημένη αυτή μεταφορά του PV βρήκε ευνοϊκό περιβάλλον για κυκλογένεση στα χαμηλά στρώματα.

Γ) Αρχικά στάδια εκρηκτικής κυκλογένεσης (18 UTC 05 – 06 UTC 06 Φεβ)

Παράλληλα με τη συνένωση, ο αυλώνας από τις 5 έως τις 6 Φεβρουαρίου προχωράει ανατολικά, κατά μήκος του αεροχειμάρρου, και φθάνει στη ΒΔ Λιβύη. Σε συμφωνία με τη θεωρία (Palmen and Newton, 1969), ότι οι μεγαλύτερες τιμές στροβιλισμού και, από αυτήν την άποψη, PV, παρατηρούνται στο ανατολικό (downstream ως προς τη ροή) τμήμα μιας προς νότο κινούμενης ψυχρής αέριας μάζας/αυλώνα⁹, έτσι και στην υπό μελέτη περίπτωση, στο έμπροσθεν τμήμα του αυλώνα, παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές στροβιλισμού, $>> 30 \cdot 10^{-5} \text{s}^{-1}$.

Σε αυτή τη φάση, οι προϋποθέσεις A, B, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, για επιφανειακή κυκλογένεση, πληρούνται, στο υπό μελέτη σύστημα.

Η προϋπόθεση (A), που αφορά τα ανώτερα στρώματα, πληρείται. Πράγματι, στις 00UTC 06 Φεβρουαρίου, μέσα στον βορειοαφρικανικό αυλώνα υπάρχει μια θετική ανωμαλία PV (+PV) στη ΒΔ Λιβύη, όπου η δυναμική τροπόπαυση (επιφ. 'PV = 2 PVU') κατεβαίνει τοπικά στο ύψος των 3000 m (Σχ. 5.2β). Αυτή η +PV βρίσκεται στο ΝΔ τμήμα του αυλώνα. Στα ΔΝΔ κράσπεδα της +PV υπάρχει μια ανώτερη βαροκλινική ζώνη (Upper Level Front, ULF), όπου η οριζόντια θερμοβαθμίδα, όπως σημειώθηκε παραπάνω, φθάνει τους 20°C/500 km (Σχ. 4.5B).

⁹ Λόγω του ότι καθοδικές (ανοδικές) κινήσεις στην ανώτερη τροπόσφαιρα τείνουν να μειώσουν (αυξήσουν) το στροβιλισμό στο δυτικό (ανατολικό) τμήμα του αυλώνα

Το ανώτερο μέτωπο, όπως φαίνεται στην κατακόρυφη τομή του Σχ. 5.3Α, έχει καθοδική κλίση από βορρά προς νότο, έχοντας τις ψυχρές μάζες στα βόρεια και τις θερμές στα νότια. Από ό,τι προκύπτει από τα 500 hPa, από στις 00 UTC, έως και τις 12 UTC 6 Φεβρουαρίου (Σχ. 4.10) υπάρχουν σημεία του ULF, που η οριζόντια ροή (ισοϋψείς) αποκτά σημαντική γωνία με τις ισόθερμες (32°B , 18°A στις 06 UTC 6 Φεβρ. και 34°B , 20°A στις 12 UTC 6 Φεβρ.). Αυτό αντικατοπτρίζεται και στην ψυχρή μεταφορά (Cold Air Advection, CAA) στη στάθμη των 500 hPa, που, π.χ. στις 12 UTC 6 Φεβρ., λαμβάνει τιμές από -1 έως και -3 $^{\circ}\text{C/h}$ κατά μήκος του ULF. Η καθοδική κίνηση, που συνεπάγεται η ψυχρή αυτή μεταφορά¹⁰, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά υψηλών τιμών PV ή, ισοδύναμα, στρατοσφαιρικού αέρα στην τροπόσφαιρα, όπου μπορεί να ευνοήσει την κυκλογένεση.

Η μεταφορά του PV, από την +PV προς την τροπόσφαιρα μπορεί να προκύψει και συνδυάζοντας την CAA με τη θετική μεταφορά στροβιλισμού (cyclonic vorticity advection) των ανωτέρων στρωμάτων. Πράγματι, θεωρώντας τις οριζόντιες μεταφορές στροβιλισμού και θερμοκρασίας αμελητέες στα χαμηλά στρώματα, τον απόλυτο στροβιλισμό και τη στρωμάτωση θετικές ποσότητες [$\zeta_{abs} \geq 0$ (1) και $\partial\theta/\partial p \leq 0$ (2)], πολλαπλασιάζοντας τις ανισότητες $-\vec{u}\nabla T < 0$ (CAA) και $-\vec{u}\nabla\zeta_{abs} > 0$ (cyclonic vorticity advection) με τις (1) κ' (2), αντίστοιχα και προσθέτοντας κατά μέλη, προκύπτει η θετική μεταφορά PV ($-\vec{u}\nabla PV > 0$), όπου $\vec{u}$ είναι το διάνυσμα του οριζόντιου ανέμου.

Η προϋπόθεση (B), που αφορά τα κατώτερα στρώματα επίσης πληρείται. Πράγματι, κατά τη διέλευση μιας ψυχρής εισβολής επάνω από την οροσειρά του Άτλαντα στο Μαρόκο τις βραδινές ώρες της 2^{ας} Φεβρουαρίου 2012, ένας ασθενές ορογραφικό χαμηλό δημιουργείται στα υπήνεμα. Το χαμηλό αυτό είναι ορατό τόσο στις αναλύσεις του ECMWF, όσο και σε αυτές του UKMO. Ο κυκλώνας αυτός ακολουθεί ημικυκλική πορεία κατά τη διάρκεια της προκυκλογενετικής περιόδου (3 – 5 Φεβρουαρίου 2012). Στην αρχή (3 Φεβρ.) ο κυκλώνας είναι καθαρά ορογραφικός και κινείται NNΔ. Από τις 4 Φεβρουαρίου, εφάπτεται στην υποτροπική Σαχαριανή βαροκλινική ζώνη ($\sim 25^{\circ}\text{B}$) και μετατρέπεται σε μετωπική ύφεση. Ο ρόλος του υποτροπικού μετώπου στη Σαχαριανή κυκλογένεση έχει αναγνωρισθεί και από τους Thorncroft and Flocas (1997). Έως και τις 12 UTC 5 Φεβρ. η Σαχαριανή ύφεση κινείται κατά προσέγγιση δυτικά, κατά μήκος του υποτροπικού μετώπου, στις 25°B . Από τις 12 UTC 5 Φεβρ., με την έλευση του ανώτερου αυλώνα, το υποτροπικό μέτωπο περιστρέφεται κυκλωνικά, με αποτέλεσμα η ύφεση να

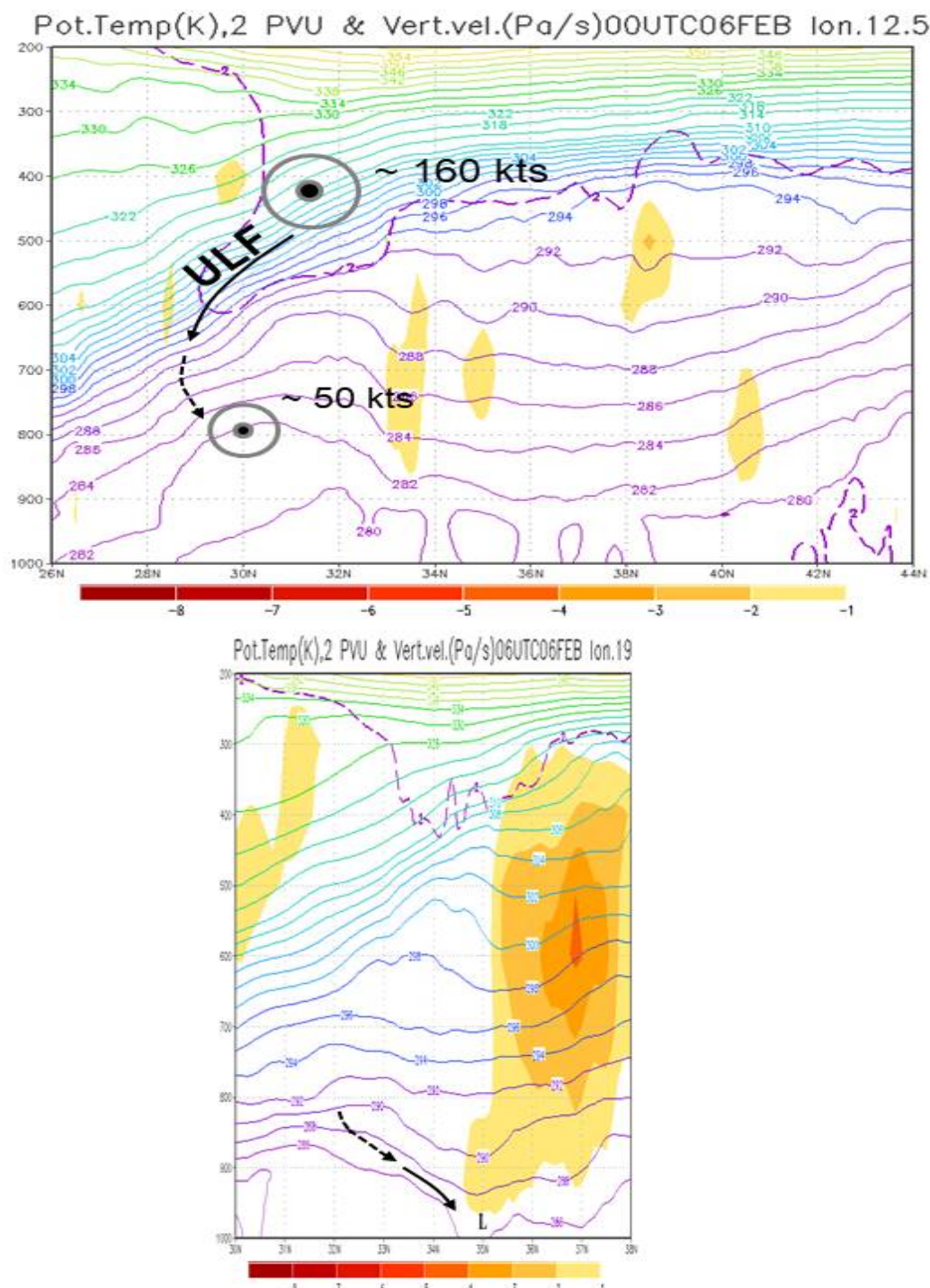
¹⁰ υποθέτοντας ισεντροπική ροή ($d\theta/dt=0$) και σταθερό θερμοκρασιακό pattern, σε σχέση με το θεωρούμενο σύστημα (βλ. εξίσωση 1 των Market et al., 2000)

πηδαλιουχηθεί και αυτή προς τα ΒΑ και έως το τέλος της ημέρας προς τα βόρεια.

Στις 18 UTC 5 Φεβρ. η θέση του βορειοαφρικανικού – Μεσογειακού αυλώνα είναι τέτοια, που, ευρισκόμενη ακριβώς ανάντι της Σαχαριανής ύφεσης – κατά μήκος του αεροχειμάρρου – ευνοεί τη μεταφορά στρατοσφαιρικού αέρα από την + PV, διαμέσου του ULF προς τη Σαχαριανή ύφεση. Πράγματι η τελευταία αρχίζει, από τη στιγμή αυτή, να βαθαίνει εκρηκτικά (Σχ. 3.5).

Αρκετά διαφωτιστική στον τρόπο έναρξης της εκρηκτικής κυκλογένεσης είναι και η τοπογραφία της δυναμικής τροπόπαυσης (επιφάνεια $PV = 2 PVU$) για τις 18 UTC 5 Φεβρ. του Σχ. 5.2α(A). Τόσο στο πεδίο των ανέμων, όσο και της τροπόπαυσης, παρατηρείται μια ασυνέχεια κατά μήκος του άξονα του αεροχειμάρρου (πρβλ. Σχ. 4.4Δ). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην υπερκάλυψη του πολικού αεροχείμαρρου από τον υποτροπικό ή αλλιώς διασταύρωση των δύο αεροχειμάρρων (jet crossing). Ομοίως, μέσα στον αυλώνα υπάρχει και επικάλυψη της πολικής τροπόπαυσης ($Z_{PV=2PVU} < 7000m$) από την τροπική ($Z_{PV=2PVU} > 10000m$). Στη γραμμή της ασυνέχειας, καθώς και λίγο νοτιοδυτικότερα από αυτή, η τροπόπαυση δεν είναι αμφιμονοσήμαντη συνάρτηση του ύψους, το οποίο φαίνεται και στις κατακόρυφες τομές. Άρα, η κύρια + PV βρίσκεται νοτιοδυτικότερα από ό,τι φαίνεται στο Σχ. 5.2α(A), γι' αυτό και η ύφεση που βαθαίνει εκρηκτικά είναι η Σαχαριανή, που σημειώνεται με L στο Σχ. 5.2α(A) και όχι αυτή που βρίσκεται στη Σικελία (βλ. 850 hPa και επιφάνεια στα Σχ. 4.3B και 4.6, αντίστοιχα). Απεναντίας, η ύφεση της Σικελίας συρρικνώνεται και τη θέση της τις επόμενες 6 – 12 ώρες (00 UTC – 06 UTC 6 Φεβρ.) καταλαμβάνει η προς βορρά κινούμενη ύφεση 'L'.

Η διαδικασία της μεταφοράς του PV από την +PV προς τα χαμηλά στρώματα της τροπόσφαιρας και στην περιοχή του επιφανειακού χαμηλού (L), περιγράφεται στο χώρο (λ, ϕ, p, t) στο σχήμα 7.2, το οποίο περιέχει τις δύο κατακόρυφες μεσημβρινές τομές των σχημάτων 5.3A και B. Η επάνω τομή (00 UTC 6 Φεβρ.) διέρχεται διαμέσου του έμπροσθεν τμήματος της ψυχρής μάζας (πρβλ. Σχ. 4.5B κ' 4.7A) της βορειοαφρικανικής trough, επάνω από την οποία βρίσκεται η +PV (πρβλ. Σχ. 5.2βA). Η επάνω τομή εκτείνεται από τη δυτική Λιβύη έως την κεντρική Ιταλία. Η +PV είναι ορατή σαν ένα τοπικό ελάχιστο του ύψους της δυναμικής τροπόπαυσης στις $\sim 31^\circ B$. Η ψυχρή αέρια μάζα, που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την +PV, είναι ορατή σαν ένα τοπικό μέγιστο του ύψους των ισημερινικών επιφανειών στις $\sim 31^\circ B$, επίσης. Τα βέλη παριστάνουν την τροχιά στρατοσφαιρικών αερίων δειγμάτων, ενώ οι ταχύτητες και τα αντίστοιχα σύμβολα αναφέρονται στη ζωνική συνιστώσα του ανέμου.



Σχ. 7.2) Κατακόρυφες τομές για τις 00 και 06 UTC 6 Φεβρουαρίου κατά μήκος των μεσημβρινών 12,5°E και 19°E, αντίστοιχα. Τα βέλη παριστάνουν την «εν δυνάμει» τροχιά αερίων δειγμάτων στρατοσφαιρικής προέλευσης. Τα διακεκομμένα βέλη δηλώνουν τη χρονική/χωρική μετάβαση από τη μία τομή στην άλλη. Οι ταχύτητες (kts) δηλώνουν συνιστώσα κάθετου στην τομή (ζωνικού) ανέμου και τα αντίστοιχα σύμβολα το πρόσημό του.

Η κάτω τομή (06 UTC 6 Φεβρ.) διέρχεται διαμέσου της βόμβας και εκτείνεται κατά μήκος του επιφανειακού μετώπου. Οι δύο τομές απέχουν χρονικά 6 ώρες, που είναι και η τάξη μεγέθους του χρόνου, που απαιτείται

για να διανύσει ένα αέριο δείγμα την απόσταση από την +PV έως τη βόμβα¹¹, δεδομένων των αναγραφόμενων ταχυτήτων του ανέμου στα ενδιάμεσα στρώματα. Ανοδικές κινήσεις επικρατούν ακριβώς επάνω και βορείως της βόμβας, λόγω αιτίων τόσο συνοπτικών (απόκλιση στην ανώτερη τροπόσφαιρα), όσο και λόγω της υγρής ανωμεταφοράς (moist convection) που λαμβάνει χώρα μέσα στις ζώνες μεταφοράς των χαμηλών (θερμούς αερομεταφορείς, warm conveyor belts, WCB), τόσο της βόμβας, όσο και του χαμηλού της Σικελίας. Σε συνδυασμό με τις συμπυκνώσεις, που λαμβάνουν χώρα εκεί, μια θερμή ανωμαλία είναι ορατή ακριβώς επάνω από τη βόμβα στο Σχ. 7.2β. Αντιθέτως, από τα 600 hPa και άνω, ψυχρές αέριες μάζες επικρατούν στο υπεράνω στρώμα της βόμβας. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η βόμβα αναπτύχθηκε σε μια περιοχή ασθενούς στρωμάτωσης ($|d\theta/dp|$).

Έστω ένα δείγμα στρατοσφαιρικού αέρα μέσα στον αεροχείμαρρο στις 00 UTC 6 Φεβρουαρίου. Κατά την προς δυσμάς κίνησή του, ο στρατοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στο ανώτερο μέτωπο (ULF), από όπου, λόγω της κλίσης των ισημερινικών επιφανειών (βλ. Σχ. 4.5B), κινείται προς τα κάτω και προς νότο. Αυτή η τροχιά κίνησης του στρατοσφαιρικού αέρα είναι εμφανής και από την προέκταση των στρατοσφαιρικών τιμών PV προς τη διεύθυνση αυτή (αναδίπλωση τροπόπαυσης – tropopause fold). Λόγω της στροφής των ανέμων (backing) ανατολικότερα και χαμηλότερα, ο στρατοσφαιρικός αέρας κατευθύνεται στη βόμβα, η οποία στις 06 UTC 6 Φεβρ. βρίσκεται 4 μοίρες βορειότερα από την + PV, στην κεντρική Μεσόγειο. Λόγω της μεγάλης μείωσης της στρωμάτωσης, κατά την κίνηση των αερίων δειγμάτων από τη στρατόσφαιρα προς τη βόμβα και λόγω της αρχής διατήρησης του PV (υποθέτοντας $d\theta/dt=0$ ¹²), ο στροβιλισμός της βόμβας πρέπει να αυξηθεί (επιμήκυνση στροβίλου – vortex stretching). Η φυσική αυτή διεργασία συνεχίζεται, για όσο η σχετική θέση +PV και βόμβας είναι τέτοια, που να ευνοεί την τροφοδοσία της δεύτερης με στρατοσφαιρικό αέρα από την πρώτη. Ο μηχανισμός αυτός είναι τόσο σημαντικός, που η βάθυνση της βόμβας επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ρυθμό της στις 06 UTC 06 Φεβρ., σχεδόν 8 hPa/6h (Σχ. 3.5).

¹¹ οι δύο τομές απέχουν 6,5 μοίρες ~ 700 km

¹² που είναι μια λογική υπόθεση, αφού η υγρασία των «εν δυνάμει» στρατοσφαιρικής προέλευσης αερίων δειγμάτων είναι πολύ χαμηλή

Δ) Ωριμα στάδια εκρηκτικής κυκλογένεσης (06 UTC 06 – 18 UTC 06 Φεβ)

Ανακεφαλαιώνοντας, ο ‘προάγγελος’ της βόμβας ήταν μια Σαχαριανή ύφεση που δημιουργήθηκε από ορογραφικά αίτια επάνω στο επιφανειακό υποτροπικό μέτωπο. Με το που συναντήθηκε η Σαχαριανή ύφεση με τη βορειοαφρικανική trough και την αντίστοιχη +PV, δημιουργήθηκε η βόμβα. Το επιφανειακό υποτροπικό μέτωπο ενώθηκε (frontal merger) με το ψυχρό μέτωπο της βορειοαφρικανικής trough. Το συνενωμένο μέτωπο κινήθηκε γρήγορα προς τα ανατολικά, πηδαλιουχούμενο από το SJ, όπως και η +PV. Λόγω του έντονου στροβιλισμού του όλου συστήματος, το θερμό μέτωπο/σύσφιγξη κινήθηκε πολύ αργότερα από ό,τι το ψυχρό, οπισθοχωρώντας, στην ουσία προς τα ΒΒΔ. Είτε λόγω των ευνοϊκότερων συνθηκών του οριακού θαλάσσιου οριακού στρώματος (αστάθεια, υγρασία) από εκείνες του Σαχαριανού, είτε λόγω του ότι στα ΒΔ (Σικελία) προϋπάρχει ήδη το κυρίως χαμηλό βαρομετρικό του βορειοαφρικανικού συστήματος, η βόμβα προσκολλάται στο θερμό τμήμα του μετώπου. Έτσι, πολύ γρήγορα από τις πρώτες ώρες της 6^{ης} Φεβρουαρίου, η βόμβα κινείται προς τα ΒΒΔ, απομακρυνόμενη γρήγορα από την +PV, η οποία πηδαλιουχείται από τον SJ κατ’ ευθείαν προς τα ανατολικά.

Η μετέπειτα τροχιά της μετεωρολογικής βόμβας κατά τη διάρκεια της 6^{ης} Φεβρουαρίου εξαρτάται κυρίως από τη θέση και τον προσανατολισμό του θερμού/συνεσφιγμένου μετώπου. Άρα ο ρόλος της +PV ήταν κυρίως να δώσει το έναυσμα για την εκρηκτική κυκλογένεση έως και τις πρώτες πρωινές ώρες της 6^{ης} Φεβρουαρίου.

Από τα διαθέσιμα στοιχεία, προκύπτει πως κατά τη διάρκεια της ώριμης φάσης της εκρηκτικής κυκλογένεσης (06 – 18 UTC 6 Φεβ), σημαντικό ρόλο έπαιξε η υγρή ανωμεταφορά, όπως φαίνεται από τις δορυφορικές εικόνες των Σχ. 5.2δ και ε. Ενδεικτικό της αστάθειας που επικρατεί στην περιοχή της βόμβας, είναι ότι το κατακόρυφο προφίλ της θ_e παρουσιάζει ελάχιστο (301K) στα 700 hPa, καθόλη τη διάρκεια, από τις 00 έως και τις 15 UTC 6 Φεβρ. (βλ. τομή Σχ. 7.1 και Hovmöller Σχ. 7.2). Πάντως, στην ώριμη φάση της εκρηκτικής κυκλογένεσης, ο στρόβιλος της βόμβας, που σαφώς άρχισε από τα χαμηλά στρώματα, έφθασε μέχρι και τα 500 hPa. Πράγματι, από τις 12 έως τις 18 UTC 6 Φεβ., το γεωδυναμικό ύψος των 500 hPa μειώθηκε απότομα κατά 80 gpm, πέφτοντας στα 5280 gpm επάνω από το Ιόνιο.

Η κυκλόλυση αρχίζει στις 18 UTC 6 Φεβ, καθώς οι αρκτικές αέριες μάζες καλύπτουν ολη την Αδριατική και αρχίζουν σταδιακά να αναμιγνύονται και στο Β. Ιόνιο, μειώνοντας την ένταση της υγρής ανωμεταφοράς, που είναι η βασική διαδικασία που συντηρεί τη βόμβα στην ώριμη φάση της.

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Την περίοδο 6-7 Φεβρουαρίου 2012 ένα ισχυρό σύστημα χαμηλών πιέσεων παρατηρήθηκε στην Μεσόγειο και συγκεκριμένα στο Ιόνιο Πέλαγος. Η συγκεκριμένη ύφεση αποδείχτηκε ότι πληροί το κριτήριο των Sanders and Gyakum, γι' αυτό και μπορεί να χαρακτηριστεί ως «Μετεωρολογική Βόμβα». Η ελάχιστη τιμή βαρομετρικής πίεσης καταγράφηκε στην Ζάκυνθο (978.4hPa) από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο διάστημα 0230-0240 UTC στις 7 Φεβρουαρίου 2012. Οι χαμηλές πιέσεις στην περιοχή του Ιονίου Πελάγους σε συνδυασμό με τις υψηλές πιέσεις στα Βαλκάνια αλλά και την Ευρώπη προκάλεσαν ισχυρούς ανέμους (μεγαλύτερους από 40 κόμβους) σε μεγάλο μέρος της Ανατολικής Μεσογείου. Στην Ελληνική Επικράτεια οι ισχυρότεροι άνεμοι καταγράφηκαν στα δυτικά ηπειρωτικά της χώρας (στις περιοχές στις οποίες ο ανατολικός άνεμος έδρασε ως καταβάτης από την οροσειρά της Πίνδου), στο βόρειο Αιγαίο αλλά και το νότιο Ιόνιο. Μάλιστα το ισχυρό βορειοανατολικό ρεύμα στο Αιγαίο σε συνδυασμό με την ορογραφία στα ανατολικά ηπειρωτικά της χώρας προκάλεσε αξιοσημείωτης έντασης αλλά και διάρκειας βροχοπτώσεις στην ανατολική Στερεά Ελλάδα αλλά και την ανατολική Θεσσαλία. Χαρακτηριστική είναι η μέτρηση των 175 χιλιοστών στις 6 Φεβρουαρίου του 2012 στην Μακρινίτσα (στο Πήλιο).

Στην παρούσα εργασία βρέθηκε ότι ένα μέτωπο στη περιοχή της κεντρικής Μεσογείου, αλλά και βόρειας Αφρικής, δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες για κυκλογένεση στην κατώτερη Τροπόσφαιρα, λόγω βαροκλινικής αστάθειας (Hoskins et al. 1985) από την αλληλεπίδραση της ισχυρής βαροκλινικής ζώνης στην κατώτερη τροπόσφαιρα με ανωμαλίες δυναμικού στροβιλισμού στην ανώτερη τροπόσφαιρα (αυλώνας στα 500 hPa και δυναμική ανωμαλία της τροπόπαυσης). Αυτό το μέτωπο βρισκόταν στην συγκεκριμένη περιοχή για πολλές ημέρες προκαλώντας σημαντικές βροχοπτώσεις. Λίγες ώρες όμως πριν την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης, η επέκταση του Αζορικού αντικυκλώνα προς τις περιοχές της βόρειας Αφρικής σε συνδυασμό με την βάθυνση του χαμηλού των υψών στην περιοχή της Ιταλίας κατά 40 gpdm μέσα σε ένα διάστημα 18 ωρών, οδήγησαν στην περαιτέρω ενίσχυση του. Απόρροια της ενίσχυσης του μετώπου ήταν και η ενίσχυση της παρατηρούμενης κυκλωνικής κυκλοφορίας επάνω από την περιοχή της Λιβύης στην κατώτερη Τροπόσφαιρα. Με αυτόν τον τρόπο και σύμφωνα με την μελέτη των Karacostas et. al. (2014) δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες έτσι ώστε οι διαταραχές στην ανώτερη Τροπόσφαιρα να μπορούν να διαδοθούν έως την επιφάνεια.

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε και ο λόγος της βάθυνσης του χαμηλού των υψών στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου και συγκεκριμένα της Ιταλίας. Διαπιστώθηκε ότι λίγες ώρες πριν αλλά και κατά την διάρκεια της έναρξης της εκρηκτικής κυκλογένεσης η δυναμική τροπόπαυση βρισκόταν στην μέση περίπου τροπόσφαιρα, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο το πεδίο της δυνητικής θερμοκρασίας ενώ ακριβώς μπροστά από την ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού εντοπιζόταν ο στρόβιλος στην περιοχή της Ιταλίας. Επομένως πιθανότατα η βάθυνση του συγκεκριμένου συστήματος, το οποίο διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο τόσο με την συμμετοχή του στην ενίσχυση του μετώπου αλλά και με την «σύνδεση» του με τον ρηχό στρόβιλο στην περιοχή της Λιβύης, πιθανότατα οφείλεται στην ανωμαλία της Τροπόπαυσης. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα χρήζει περισσότερης μελέτης σε επόμενη εργασία.

Σημαντική στην «εκρηκτική» βάθυνση του συστήματος θεωρείται και η συνεισφορά του μεγίστου του αεροχειμάρρου. Συγκεκριμένα από την αρχή της 5ης Φεβρουαρίου 2012 έως και την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης παρατηρείται μία συνεχής εξάπλωση της ράχης στον Ατλαντικό ωκεανό προς τα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Η κίνηση αυτή της ράχης του Ατλαντικού εξαναγκάζει τον μεγάλο μήκους κύματος αυλώνα να επεκταθεί προς τα νοτιοδυτικά, που «μεγεθύνεται» (amplifies) με αυτόν τον τρόπο μέσα στην Αφρική. Η παραπάνω κυκλοφορία οδηγεί σε ενίσχυση της βαθμίδας των υψών επάνω από την βορειοδυτική Αφρική, γεγονός που ενδυναμώνει το μέγιστο του αεροχειμάρρου στην ανώτερη Τροπόσφαιρα. Είναι χαρακτηριστικό πως σε ένα διάστημα 18 ωρών οι άνεμοι στον πυρήνα του μεγίστου του αεροχειμάρρου ενισχύθηκαν κατά 30-40 κόμβους. Παράλληλα με την ενίσχυση του, κατά την διάρκεια της περιόδου πριν από την έναρξη της εκρηκτικής κυκλογένεσης, το μέγιστο του αεροχειμάρρου αλλάζει και μορφή. Συγκεκριμένα η καμπυλότητα του αλλάζει συνεχώς μέχρις ότου καταλήξει καθαρά κυκλωνική στις 18 UTC 05 Φεβρουαρίου (ώρα έναρξης της εκρηκτικής κυκλογένεσης). Έτσι, σύμφωνα και με τους Beebe and Bates, (1965), απόκλιση εμφανίζεται κυρίως στο μπροστινό τμήμα του. Η παρούσα μελέτη παρουσίασε στοιχεία, που συνηγορούν στο ότι το μέγιστο του αεροχειμάρρου μέσω των αγεωστροφικών κυκλοφοριών και, κατά συνέπεια, μέσω της αύξησης της οριζόντιας απόκλισης της μάζας, επηρέασε τον στρόβιλο για ένα διάστημα περίπου 6 ωρών (από τις 06-12 UTC 06 Φεβρουαρίου). Σε αυτό το διάστημα παρατηρούνται και οι μεγαλύτεροι ρυθμοί βάθυνσης της μετ. βόμβας στην επιφάνεια.

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε και η θέση της επιφάνειας 2 PVU η οποία σύμφωνα με τους Hoskins et al. (1985) είναι αντιπροσωπευτική της Τροπόπαυσης για την περιοχή της Μεσογείου τον χειμώνα. Βρέθηκε ότι η συγκεκριμένη επιφάνεια βρίσκεται επάνω και

πίσω από την επιφανειακή ύφεση μόνο κατά την διάρκεια του χρονικού διαστήματος της ταχύτερης βάθυνσης του υπό μελέτη χαμηλού, δηλαδή από τις 06 έως τις 12 UTC 06 Φεβρουαρίου. Σε αυτό το διάστημα η 2 PVU σταδιακά ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη αλλά η αποτελεσματικότητα της παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα, μέσω της αύξησης του Rossby penetration height, μιας και κινείται προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Τέλος από τις 18 UTC στις 06 Φεβρουαρίου και έπειτα η ανωμαλία του PV απομακρύνεται από την «βόμβα» κινούμενη ανατολικά.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στις 06 UTC στις 06 Φεβρουαρίου ο ρηχός στρόβιλος από την Λιβύη πιθανότατα «συνδέεται» με το χαμηλό των υψών στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου. Το αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης είναι ότι την συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρατηρείται ένας ενιαίος στρόβιλος ο οποίος εκτείνεται σε όλη την Τροπόσφαιρα. Πάνω σε αυτόν τον στρόβιλο, όπως σημειώθηκε και παραπάνω συνεισφέρουν το μέγιστο σεροχειμάρρου (μέσω της οριζόντιας απόκλισης της μάζας στην ανώτερη Τροπόσφαιρα), η ανωμαλία του δυνητικού στροβιλισμού (μέσω της μεταφοράς ενέργειας και στροβιλισμού από την Τροπόπαυση) αλλά και η κλίση του μεγάλου μήκους κύματος αυλώνα η οποία την συγκεκριμένη χρονική στιγμή γίνεται αρνητική στο οριζόντιο επίπεδο. Μάλιστα η αλλαγή κλίσης του αυλώνα είναι ικανή να επιδράσει στο πεδίο της απόκλισης της μάζας, μέσω της μείωσης της απόστασης από την κατάντι ράχη, αλλά και στην στατική της ατμόσφαιρας, μιας και η ψυχρή μεταφορά στην μέση και ανώτερη Τροπόσφαιρα μειώνει την στατική ευστάθεια. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η αλλαγή της κλίσης του αυλώνα ήταν ακόμη πιο σημαντική λόγω και της δυνητικής αστάθειας που παρατηρήθηκε στα χαμηλότερα στρώματα και συγκεκριμένα στο στρώμα 925hPa – 800hPa, αστάθεια που απελευθερώθηκε όταν διήλθε ο στρόβιλος από την περιοχή την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Σε μελλοντικές εργασίες θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί και ο ρόλος των ροών αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας από την επιφάνεια με την χρήση πειραμάτων καθώς και η μεταφορά ξηρού αέρα στην ισοβαρική επιφάνεια των 800hPa με την χρήση δορυφορικών εικόνων, η οποία οδήγησε σε αύξηση των τιμών δυνητικής αστάθειας στο χαμηλότερο τμήμα της Τροπόσφαιρας. Τέλος σημαντική θεωρείται και η επιπλέον έρευνα επάνω στο κομμάτι της συνεισφοράς της ανωμαλίας της Τροπόπαυσης επάνω στον στρόβιλο της «βόμβας» όταν αυτός εκτεινόταν σε όλη την Τροπόσφαιρα αλλά και επάνω στο χαμηλό των υψών στην περιοχή της Ιταλίας, το οποίο διαδραμάτισε τον δικό του ξεχωριστό ρόλο στην περαιτέρω εξέλιξη και βάθυνση του συστήματος.

Ahrens D, 2008: Essentials of Meteorology: an invitation to the atmosphere. 5th edition. In: Chapter 8, Air masses, Fronts and Middle-Latitude Cyclones.

Beebe R G, Bates F C, 1955: A mechanism for assisting in the release of convective instability. Monthly Weather Review, 83, 1–10.

Brikas D, Karacostas T S, Pytharoulis I, 2013: Synoptic aspects of the Eastern Mediterranean explosive cyclogenesis of 22 January 2004. Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric, Springer Atmospheric Sciences 2013, 35-41.

Businger S, Graziano T M, Kaplan M L, Rozumalski R A, 2004: Cold-air cyclogenesis along the Gulf-Stream front: investigation of diabatic impacts on cyclone development, frontal structure, and track. Meteorol. Atmos Phys. 88, 65–90.

Capaldo M, Conte M, Finizio C, Todisco G, 1980: A detailed analysis of a severe storm in the central Mediterranean: the case of the Trapani flood. Riv Meteorol Aeronaut v.XL, n.2-3.

Chen S J, Kuo Y H, Zhang P Z, Bai Q F, 1992: Climatology of explosive cyclones of the East Asian Coast. Monthly Weather Review 120: 3029–3035, DOI: 10.1175/1520-0493.

Conte M, 1986: The meteorological “bomb” in the Mediterranean: a synoptic climatology. Riv Meteorol Aeronaut 46:121–130.

Conte M, Piervitali E, Colacino M, 1997: The meteorological bomb in the Mediterranean. INM/WMO international symposium on cyclones and hazardous weather in the Mediterranean. MMA/ UIB:283-28.

Emanuel K, 1994: Atmospheric Convection. Oxford University Press, 580 pp.

Emanuel K, 2005: Genesis and maintenance of “Mediterranean hurricanes”. Advances in Geosciences 2: 217–220.

Fita L, Romero R, Luque A, Emanuel K, Ramis C, 2007: Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model. Natural Hazards and Earth System Sciences 7: 41–56.

Floca H, 1990: Explosive cyclogenesis in the Mediterranean. MSc dissertation. University of Reading, Department of Meteorology, 103pp.

Gyakum J R, 1983b: On the evolution of the QE II storm. Part II: Dynamic and thermodynamic structure. Mon. Wea. Rev., 111, 1156-1173.

Gyakum J R, Anderson J R, Grumm R H, Gruner E L, 1989: North Pacific cold-season surface cyclonic activity: 1975 – 1983. *Monthly Weather Review* 117: 1141–1155, DOI: 10.1175/1520-0493.

Gyakum J R, Danielson R E, 2000: Analysis of meteorological precursors to ordinary and explosive cyclogenesis in the western north pacific, *Monthly Weather Review*, 128, 851–863.

Holton, J R, 1992: An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, 511 pp.

Homar V, Ramis C, Alonso S, 2002: A deep cyclone of African origin over the Western Mediterranean: diagnosis and numerical simulation. *Ann Geophys* 20:93–106. doi:10.5194/angeo-20-93- 2002.

Homar V, Jansa A, Campins J, Genoves A, Ramis C, 2007: Towards a systematic climatology of sensitivities of Mediterranean high impact weather: a contribution based on intense cyclones. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7:445–454. doi:10.5194/nhess-7-445- 2007.

Hoskins B J, McIntyre M I, Robertson A W, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 111:877-947.

Jacobs N A, Lackmann G M, Raman S, 2004: The Combined Effects of Gulf Stream-Induced Baroclinicity and Upper-Level Vorticity on U.S. East Coast Extratropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 133, 2494-2501.

Jansa A, Monserrat S, Gomis D, 2007: The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami. *Advances in GeoSciences* 12: 1–4.

Karacostas T S, Flocas A A 1983: The development of the “bomb” over the Mediterranean area. *La Meteorologie, Actes de la conference “eau verte”* 34:351-358.

Karacostas T S, Brikas D, Pytharoulis I, Pennas P, 2010: Dynamic processes of the Mediterranean bomb of 2004. *Proceedings of the 10th international conference on meteorology and climatology*, Patra, Greece.

Karacostas T, Brikas D, Pytharoulis I, 2014: Meteorological «bomb»: Dynamic Characteristics. Volume in memory of Prof. Apostolos Flocas, National and Kapodistrian University of Athens, Zitis Publications, 67-74. ISBN: 978-960-466-129-9 (in Greek).

Kathleen M C, Capehart W J, 2008: Sensitivity of medium-range forecasts in WRF to Sea Surface Temperatures, 9th WRF Users Workshop, 23-27 June 2008, Boulder, Colorado.

Katsafados P, Mavromatidis E, Papadopoulos A, Pytharoulis I, 2011: Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on

sea surface temperature. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 1233–1246. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1233-2011>.

Kouroutzoglou J, Flocas H A, Simmonds I, Keay K, Hatzaki M, 2011a: Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. *Int J Climatol* 31:1785–1802. doi:10.1002/joc. 2203.

Kouroutzoglou J, Flocas H A, Simmonds I, Keay K, Hatzaki M, 2011b: Assessing characteristics of Mediterranean explosive cyclones for different data resolution. *Theor Appl Climatol* 105:263–275. doi:10.1007/s00704-010-0390-8.

Kouroutzoglou J, Flocas H A, Keay K, Simmonds I, Hatzaki M, 2013a: A high-resolution climatological study on the comparison between surface explosive and ordinary cyclones in the Mediterranean. *Reg Environ Chang*. doi:10.1007/s10113-013- 0461-3.

Lagouvardos K, Kotroni V, Nickovic S, Jovic D, Kallos G, Tremback C J, 1999: Observations and model simulations of a winter sub- synoptic vortex over the central Mediterranean. *Meteorological Applications* 6: 371–383, DOI: 10.1017/S1350482799001309.

Lagouvardos K, Kotroni V, Defer E, 2006: Synoptic environment related to rapid cyclogenesis in the Eastern Mediterranean. *Adv Geosci* 7:115–119. doi:10.5194/adgeo-7-115-2006

Lagouvardos K, Kotroni V, Defer E, 2007: The 21–22 January 2004 explosive cyclogenesis over the Aegean Sea: observations and model analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133: 1519–1531, DOI: 10.1002/qj.121.

Lim E P, Simmonds I, 2002: Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events. *Monthly Weather Review* 130: 2188–2209, DOI: 10.1175/1520-0493.

Lionello P, Bhend J, Buzzzi A, Della-Marta P M, Krichak S O, Jansa A, Maheras P, Sanna A, Trigo I F, Trigo R, 2006: Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment. *Dev. Earth Environ. Sci.* 4:325–372.

Lin H, Brunet G, Derome J, 2009: An Observed Connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate* 22(2):364-380 DOI: 10.1175/2008JCLI2515.1.

Market P S, Moore J T, Rochette S M, 2000: On calculating vertical motions in isentropic coordinates. *Natl. Wea. Dig.*, 24(4), 31-37.

Martin J E, Otkin J A, 2004: The rapid growth and decay of an extratropical cyclone over the central Pacific Ocean, *Weather Forecast.*, 19, 358–376,

Metheniti K, 2012: A case of Rapid Cyclogenesis over Ionian Sea on February 6th, 2012. EUMETSAT: www.eumetsat.int/website/home/Images/ImageLibrary/DAT_3120362.html

Michaelides S, Karacostas T S, Sánchez J L, Retalis A, Pytharoulis I, Homar V, Romero R, Zanis P, Giannakopoulos C, Bühl J, Ansmann A, Merino A, Melcón P, Lagouvardos K, Kotroni V, Bruggeman A, López-Moreno J I, Berthet C, Katragkou E, Tymvios F, Hadjimitsis D G, Mamouri R E, Nisantzi A, 2018: Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Research* 208 4–44.

Newton C W, 1965: Variations in structure of subtropical current system accompanying a deep polar outbreak. *Monthly Weather Review*, 93, 101–110.

Palmen E, Newton C W, 1969: Atmospheric circulation systems. Their structure and physical interpretation. Academic Press, New York.

Paluch I, 1979: *J. Atmos. Sci.* 36. 2467–2478.

Paschos F, Tremoulis E, Karacostas TS, 2014: Study of the explosive cyclogenesis 'JULIA' in the Mediterranean area. 12th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, Heraklion, Greece. Hellenic Meteorological Society.

Pettersen S, 1956: *Weather Analysis and Forecasting*. Mc Graw Hill, New York.

Prezerakos N G, Michaelides S C, 1989: A composite diagnosis in sigma coordinates of the atmospheric energy balance during intense cyclonic activity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 115: 463–486, DOI: 10.1002/qj.49711548703.

Pytharoulis I, Craig G C, Ballard S P, 2000: The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995. *Meteorological Applications* 7: 261–279, DOI: 10.1016/S1464-1909(99)00056-8.

Pytharoulis I, Kotsopoulos S, Tegoulis I, Kartsios S, Bampzelis D, Karacostas T, 2016: Numerical modeling of an intense precipitation event and its associated lightning activity over northern Greece. *Atmos Res*, 169: 523–538. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.06.019.

Reale O, Atlas R, 2001: Tropical cyclone-like vortices in the extratropics: observational evidence and synoptic analysis. *Weather and Forecasting* 16: 7–34, DOI: 10.1175/1520-0434.

Rex D F, 1950a: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action. *Tellus* 2, 196–211.

Rex D F, 1950b: The climatology of blocking action. *Tellus* 2, 275–301.

Roebber P J, 1984: Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. *Monthly Weather Review* 112: 1577–1589, DOI: 10.1175/1520-0493.

Rogers E, Bosart L F, 1986: An investigation of explosively deepening oceanic cyclones. *Monthly Weather Review* 114: 702 – 718, DOI: 10.1175/1520-0493.

Sanders F, Gyakum J R, 1980: Synoptic-dynamic climatology of the “Bomb”. *Monthly Weather Review* 108: 1589 – 1606, DOI: 10.1175/1520-0493.

Sanders F, 1986: Explosive cyclogenesis in the west-central North Atlantic Ocean, 1981–1984, Part I: Composite structure and mean behavior, *Monthly Weather Review*, 114, 1781–1794.

Sanders F, Bosart L F, Lai C C, 1991: Initiation and evolution of an intense upper-level front. *Monthly Weather Review*, 119, 1337–1367.

Thorncroft C D, Hoskins B J, McIntyre M E, 1993: Two paradigms of baroclinic- wave life- cycle behaviour, Royal Meteorological Society, <https://doi.org/10.1002/qj.49711950903>

Thorncroft C D, Flokas H, 1997: A case study of Saharan cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1147-1165. Winters and Martin, 2017 <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/MWR-D-16-0262.1>

Uccellini L W, Petersen R A, Wash C H, Brill K F, 1984: The Presidents’ Day cyclone of 18–19 February 1979: Synoptic overview and analysis of the subtropical jet streak influencing the pre-cyclogenetic period. *Monthly Weather Review*, 112, 31–55.

Uccellini L W, Kocin P J, 1987: The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the East Coast of the United States. *Weather and Forecasting*, 2, 289–308.

Uccellini L W, Petersen R A, Brill K F, Kocin P J, Tuccillo J J, 1987: Synergistic interactions between an upper-level jet streak and diabatic processes that influence the development of a low-level jet and a secondary coastal cyclone. *Monthly Weather Review*, 115, 2227–2261.

Yamamoto M, Hirose N, 2007: Impact of SST reanalyzed using OGCM on weather simulation: A case of developing cyclone in the Japan Sea area, *Geophysical Research Letters*, 34, L005808.

Λυσίτσα X E, 2010: Συνοπτικά, δυναμικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της “μετεωρολογικής βόμβας” της περιόδου 21-23

Ιανουαρίου 2004. Διπλωματική εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.

Μακρογιάννης Τ, Σαχσαμάνογλου Χ, 2004: Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας, Εκδόσεις Χάρις.

Μπρίκας Δ, 2006: Ο υποτροπικός αεροχείμαρρος και η συμβολή του στη δημιουργία και ένταση εξαιρετικών φαινομένων στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.