



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΜΕΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΝΕΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΜΠΕΚΙΑΡΗ ΖΩΗ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΦΥΣΙΚΟΣ, Α.Π.Θ.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Επιβλέπων: ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΦΕΙΔΑΣ, Καθηγητής ΑΠΘ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
'ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020**





ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΜΕΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΝΕΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

USE OF SATELLITE DATA FOR A STUDY OF MESOSCALE CON- VECTIVE SYSTEM IN GREECE

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

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 16/3/2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Φείδας Χαράλαμπος, Καθηγητής ΑΠΘ, Επιβλέπων

Ζάνης Πρόδρομος, Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος

Πυθαρούλης Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος





Ευχαριστίες

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου προτάθηκε από τον καθηγητή κ. Χαράλαμπο Φείδα. Με μεγάλη μου χαρά συμφώνησα στην διεκπεραίωση της μελέτης του καταγιδοφόρου φαινομένου (γνωστό και ως Μέδουσα κατά το Ελληνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών), του οποίου την ένταση έτυχε και να βιώσω προσωπικά στη Θεσσαλονίκη.

Έτσι λοιπόν, πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χαράλαμπο Φείδα, για την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπό μου, την άπογη συνεργασία που είχαμε, καθώς ήταν πάντοτε πρόθυμος να με βοηθήσει και να με κατευθύνει. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για την πολυτέλεια του χρόνου που μου παρείχε, προκείμενου να μπορέσω να φέρω σε πέρας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, χωρίς να χρειαστεί να διακόψω άλλες υποχρεώσεις της καθημερινότητας μου.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Δημήτρη Μπρίκα, ο οποίος με μεγάλη προθυμία, καλοσύνη και ανιδιοτέλεια μου παρείχε δεδομένα, τα οποία αποτέλεσαν απαραίτητα για τη συγγραφή των αποτελεσμάτων της εργασίας, γνώσεις και χρήσιμες πληροφορίες, που θα με βοηθήσουν και μετέπειτα στην πορεία μου, καθώς επίσης τον ευχαριστώ και για τον χρόνο που αφιέρωσε με σκοπό να με βοηθήσει στην εκπόνηση της διπλωματικής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του μεταπτυχιακού προγράμματος για την υπομονή και την επιμονή τους ώστε να εφοδιάσουν τους συμφοιτητές μου και έμένα με πολύ σημαντικές γνώσεις.

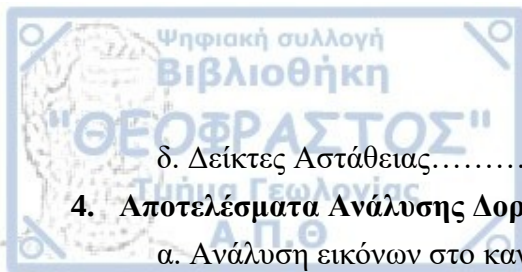
Δε θα μπορούσα να παραλείψω την απίθανη ομάδα μας 'τα κουμουλάκια' : την Αναστασία, τον Αλέξανδρο και το Χρήστο, που μαζί τους πέρασα δυο απίστευτα χρονιά σπουδών, έμαθα πολλά από τις ατελείωτες συζητήσεις μαζί τους και κυρίως από τη στάση ζωής τους, καθώς ο καθένας τους αποτελεί μοναδική προσωπικότητα. Με βοήθησαν πολύ στο να εξελιχθώ ως άνθρωπος και ως επιστήμονας, και τους ευχαριστώ πολύ γι' αυτό.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που τόσα χρονιά με στηρίζει για τις επιλογές μου και τους πολύτιμους φίλους μου, οι οποίοι έδειξαν κατανόηση όλο αυτό το διάστημα της εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς αναγκάστηκα να θυσιάσω χρόνο από την παρέα τους. Φυσικά, ο σύντροφός μου, Χάρης, που είναι δίπλα μου, μου συμπαραστέκεται και με ενθαρρύνει σε κάθε μου βήμα, δίνοντας μου δύναμη για να συνεχίζω και στα επόμενα, αξίζει ιδιαίτερες ευχαριστίες.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	8
1. Εισαγωγή.....	10
2. Δεδομένα – Μεθοδολογία.....	17
2.1 Δεδομένα.....	17
2.2 Μεθοδολογία.....	17
2.2.1 Σύντομη εισαγωγή για τον MSG (MeteoSat Second Generation).....	17
2.2.2 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων των καναλιών του δορυφόρου Meteosat.....	18
α. Κανάλια του Ορατού.....	19
β. Κανάλια του Θερμικού Υπερύθρου.....	20
γ. Κανάλια των υδρατμών.....	20
2.2.3 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων διαφοράς καναλιών του δορυφόρου Meteosat.....	22
α. T6.2 - T10.8.....	22
β. T6.2 - T7.3.....	23
γ. T10.8 - T12.0.....	23
2.2.4 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων των συνδυασμών καναλιών RGB.....	23
α. Airmass.....	24
β. Day Convective Storms.....	24
γ. Day Microphysics.....	24
δ. Night Microphysics.....	25
3. Αποτελέσματα Συνοπτικής και Θερμοδυναμικής Ανάλυσης	26
3.1 Στάδια Εξέλιξης του MCS.....	26
3.2 Ανάλυση Συνοπτικής Κατάστασης.....	28
α. Συνοπτικοί χάρτες επιφανείας.....	28
β. Γεωδυναμικά ύψη και θερμοκρασία στα 500 hPa.....	29
γ. Θερμοκρασία και θερμική μεταφορά στα 850 hPa.....	31
δ. Αεροχείμαρρος στα 300 hPa.....	33
ε. Υγρασία στα 700 hPa.....	36
στ. Δυναμικός Στροβιλισμός στα 300hPa.....	38
3.3 Κατακόρυφες τομές.....	41
α. Δυναμική Τροπόπαυση.....	41
β. Σχετική Υγρασία.....	43
γ. Σύγκλιση.....	45
3.4 Τεφίγραμμα.....	48
α. Αθήνα.....	50
β. Θεσσαλονίκη.....	51
γ. Bridizi, Ιταλία.....	53



δ. Δείκτες Αστάθειας.....	54
4. Αποτελέσματα Ανάλυσης Δορυφορικών Εικόνων.....	57
α. Ανάλυση εικόνων στο κανάλι 9 του υπερύθρου - IR10.8.....	57
β. Ανάλυση εικόνων στο κανάλι 5 των υδρατμών - WV6.2μm.....	67
γ. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch5-Ch6 ($T_{6.2}-T_{7.3}$).....	74
δ. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch5-Ch9 ($T_{6.2}-T_{10.8}$).....	79
ε. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch9-Ch10 ($T_{10.8}-T_{12.0}$).....	85
στ. Ανάλυση εικόνων RGB : Airmass.....	90
ζ. Ανάλυση εικόνων RGB : Day Convective Storm.....	94
η. Ανάλυση εικόνων RGB : Day Microphysics.....	96
θ. Ανάλυση εικόνων RGB : Night Microphysics.....	99
5. Συμπεράσματα.....	102
6. Βιβλιογραφία.....	108

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη ενός μέσης κλίμακας νεφικού συστήματος κατακόρυφης ανάπτυξης (MCS), το οποίο εξελίχθηκε πάνω από τον ελλαδικό χώρο στις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Αρχικά, ερευνάται η συνοπτική κατάσταση που επικράτησε τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, καθώς και τα δυναμικά αίτια που ήταν υπεύθυνα για την δημιουργία και την ένταση του συστήματος. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται χάρτες μετεωρολογικών παραμέτρων που απευθύνονται στα διαφορά επίπεδα της ατμόσφαιρας, κατακόρυφες τομές κατά μήκος της περιοχής ενδιαφέροντος, καθώς επίσης και τεφιγράμματα της Αθήνας, της Θεσσαλονίκης και του Bridizi. Ακολούθως, πραγματοποιείται ανάλυση και περιγραφή δορυφορικών εικόνων, προερχόμενες από το δορυφόρο MSG (Meteosat Second Generation). Η μελέτη των δορυφορικών προϊόντων αποτελεί το βασικό σκοπό και κύριο μέρος της εργασίας αυτής. Τα δορυφορικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από μεμονωμένα κανάλια, από διαφορές καναλιών και από συνδυασμούς RGB. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τις εκάστοτε δορυφορικές εικόνες αφορούν την έκταση του νεφικού συστήματος, τα στάδια εξέλιξης του, τη μορφή και το σχήμα των επιμέρους τμημάτων που συνθέτουν το MCS, καθώς και τις περιοχές που επηρέασε το καταιγιδόφορο αυτό σύστημα. Αναφορικά, κατά τη διάρκεια εξέλιξης του, το σύστημα απέκτησε τη μορφή ενός μέσης κλίμακας συμπλέγματος πολυκύτταρων καταιγίδων, λίγο αργότερα το χαρακτηριστικό σχήμα-V, ενώ λίγο πριν τη διάλυση του, το σχήμα και η έκταση του το ενέταξαν στην κατηγορία ενός κυκλικού καταιγιδόφορου συστήματος μέσο-β κλίμακας. Επιπλέον, στην εργασία αυτή αναλύονται με λεπτομέρεια το ύψος των κορυφών των νεφών μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η σύσταση και το οπτικό τους πάχος. Τέλος, πραγματοποιείται παράθεση δυναμικών παραμέτρων σε δορυφορικές εικόνες, προκειμένου να γίνει καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και της συμβολής των αιτιών που το προκάλεσαν.



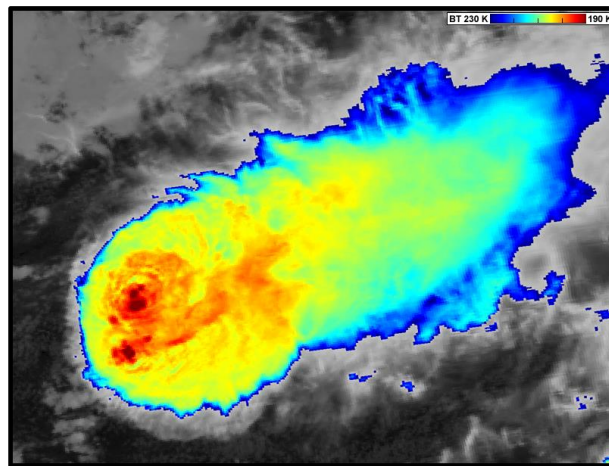
Abstract

The present thesis is concerned with the study of a Mesoscale Convective System (MCS), developed over the Greek territory on July 16 and 17, 2017. First, the synoptic condition of the time period and the dynamic causes responsible for the creation and intensity of the system are being examined. For this purpose, maps of meteorological parameters addressed to different levels of the atmosphere, vertical cross-sections along the area of interest, as well as skew-t diagrams of Athens, Thessaloniki and Bridizi are presented. Thereafter, satellite images from the MSG (Meteosat Second Generation) satellite are analyzed. The study of satellite products is the main purpose and the main part of this thesis. The satellite products come from single channels, channel differences and RGB combinations. Information obtained from the satellite images concern the extent of the system, the stages of development, the form and shape of the individual components of MCS, as well as the areas affected by the storm system. To mention, during the evolution, the system acquired the form of a Multicell Cluster Storm, shortly after the characteristic V-shape (large-scale Wedge Type) and before its dissipation, its shape and extent placed the system in the category of a Meso- β Circular Convective System (M- β CCS). In addition, this thesis analyzes in detail the cloud top height and the cloud microphysics, such as their composition and optical thickness. Finally, dynamic parameters are plotted in satellite images, in order to better understand the phenomenon and its causes.

1. Εισαγωγή

Χαρακτηριστικό μετεωρολογικό φαινόμενο που αξίζει ιδιαίτερη μελέτη είναι οι καταιγίδες (Convective Storms). Γενικά, τα καταιγιδοφόρα συστήματα (Convective Systems) παίζουν μεγάλο ρόλο στη διάδοση ενέργειας, ορμής και μάζας στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας (Cotton and Anthes, 1989), ενώ η βροχόπτωση που προκύπτει είναι βασικό στοιχείο του υδρολογικού κύκλου, σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο.

Οι καταιγίδες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον αριθμό ή την οργάνωση των κύριων πυρήνων που δημιουργούνται από ανοδικά ρεύματα, σε μονοκύτταρες (Single Cell) ή πολυκύτταρες καταιγίδες (Multicell and Supercell). Οι μονοκύτταρες έχουν σύντομη διάρκεια ζωής, αποτελούμενες από έναν μόνο πυρήνα και είναι καταιγίδες τοπικού χαρακτήρα (1-25km). Οι πολυκύτταρες καταιγίδες αποτελούνται από ένα σύμπλεγμα πυρήνων, ο καθένας από τους οποίους βρίσκεται σε διαφορετική φάση του κύκλου ζωής, όμως ολόκληρο το σύστημα κινείται σαν μια μονάδα. Στην κατηγορία των πολυκύτταρων καταιγίδων ανήκουν και τα μέσης κλίμακας καταιγιδοφόρα συστήματα (Mesoscale Convective Systems-MCSs), για τα οποία έχουν γίνει πολλές μελέτες τις τελευταίες δεκαετίες.

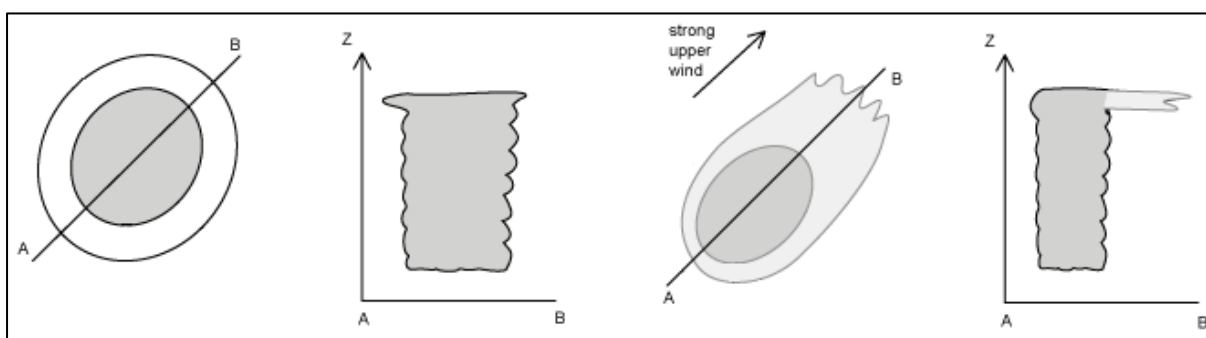


Σχ. 1. Καταιγιδοφόρο σύστημα μέσης κλίμακας, όπως απεικονίζεται σε ενισχυμένη δορυφορική εικόνα στο κανάλι του υπέρυθρου (Πηγή : Setvak, 2010)

Ως MCS ορίζονται τα μεγάλα οργανωμένα νεφικά συστήματα χωρικής κλίμακας μέσο-α (250-2500km) και μέσο-β (25-250km), τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο νεφών που παρουσιάζουν έντονη κατακόρυφη ανάπτυξη και των οποίων ο κύκλος ζωής είναι μεγαλύτερος από τις μεμονωμένες νεφικές αναπτύξεις που τα δημιουργούν. Τα MCS μπορούν να εμφανιστούν με διάφορους τύπους και σε διαφορετικά σχήματα, όπως είναι τα πολύ μεγάλα κυκλικού σχήματος (MCC) ή αυτά που παρουσιάζονται σε σχήμα μεγάλης γραμμής (Squall

Lines). Ένας πιο περιγραφικός ορισμός λέει πως, ανεξαρτήτως σχήματος, το νεφικό σύστημα όλων των τύπων MCS αποτελείται από οργανωμένα συμπλέγματα με άκμονες που συγχωνεύονται σε μια ενιαία νεφική ασπίδα (Houze,1993) και έχει την τάση να σχηματίζει μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από συνεχόμενη βροχόπτωση, με έκταση από 100km και πάνω. Ο κύκλος ζωής τους μπορεί να διαρκέσει από λίγες ώρες έως και 2-3 ημέρες. Ο Houze (1993), επίσης, επέκτεινε αυτόν τον ορισμό, συμπληρώνοντας πως τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ πιο σύνθετα από τα μεμονωμένα cb νέφη τοπικής κλίμακας.

Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά για την ανάπτυξη των καταιγιδοφόρων συστημάτων μέσης κλίμακας είναι η υγρασία στα χαμηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, η δυναμική αστάθεια, η ύπαρξη ανοδικών ρευμάτων και η κατακόρυφη διάτμηση του ανέμου, η οποία μπορεί να ενισχύσει ή να καταστείλει τις ανοδικές κινήσεις. Ανοδικές κινήσεις εμφανίζονται λόγω δυναμικών αιτιών, όπως είναι η ορογραφία, είτε λόγω θερμικών παραγόντων, όπως η ύπαρξη θερμών υγρών αέριων μαζών κάτω από ψυχρές ξηρές, το οποίο και αποτελεί συνθήκη δημιουργίας δυναμικής αστάθειας. Ακόμη, μπορεί να οφείλονται στη κατάλληλη διάταξη αεροχειμάρρου ή ενός αυλώνα στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας. Τα ανοδικά ρεύματα εντοπίζονται στην περιοχή όπου γεννιούνται και αναπτύσσονται οι νεφικοί πυρήνες που παρουσιάζουν μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, ενώ τα καθοδικά στην περιοχή κάτω από την στρατόμορφη νεφική ασπίδα. Το σχήμα της νεφικής ασπίδας, η οποία εκτείνεται στο επίπεδο του Equilibrium Level, εξαρτάται από την κατακόρυφη διάτμηση του ανέμου στο ύψος αυτό και μπορεί να είναι κυκλικό, οβάλ ή τριγωνικό. Όσο πιο μεγάλη η διάτμηση, τόσο πιο πολύ τείνει το σχήμα προς το οβάλ και το τριγωνικό. Στο σχήμα 2 φαίνεται πως απεικονίζεται ένα MCS στις δορυφορικές εικόνες, ανάλογα με το μέτρο του ανέμου που επικρατεί στην ανώτερη τροπόσφαιρα.



Σχ. 2. Απεικόνιση MCS σε δορυφορική εικόνα, με ασθενή και ενισχυμένο άνεμο στην ανώτερη ατμόσφαιρα, αντίστοιχα, μαζί με τις αντίστοιχες κατακόρυφες τομές αυτών.

(Πηγή : <http://www.eumetrain.org/satmanu/>)

Σύμφωνα με τους Morel και Senesi (2002), τα μέσης κλίμακας καταιγιδόφορα συστήματα επιβεβαιώνονται από τη χρήση εικόνων από δορυφόρους ή ραντάρ και αφορούν κατά κανόνα τις θερμές περιόδους του έτους, συνηθέστερα στην Αμερική και την Αφρική, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν απασχολήσει και αρκετές περιοχές της Ευρώπης, ενώ οι μελέτες κάνουν αναφορά κυρίως σε εμφάνιση του τύπου MCC. Κλιματολογικά δεδομένα αποδεικνύουν πως η νότια Αμερική, η Αφρική, η περιοχή του δυτικού Ειρηνικού Ωκεανού και η Ινδία πλήττονται κυρίως από MCC. Μεγάλες καταστροφές και στις ΗΠΑ οφείλονται κατά καιρούς σε αυτά τα συστήματα. Αντιθέτως, στην Ευρώπη είναι περισσότερο σπάνια. Παρόλο που τα MCC παρουσίαζαν μεγαλύτερη συχνότητα, οπότε και ήταν πιο εύκολο να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, για τα MCS οι μελέτες παραμένουν σπάνιες. Παρ'ολ'αυτά, τα MCS, τα οποία αποκαλούνται και US MCS λόγω του ότι οι κλιματολογικές μελέτες αφορούσαν συστήματα που εμφανίστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν καθιερωθεί να χαρακτηρίζονται από μια περιοχή θερμοκρασίας κάτω των -52°C και έκτασης 10.000km^2 (Augustine, 1989).

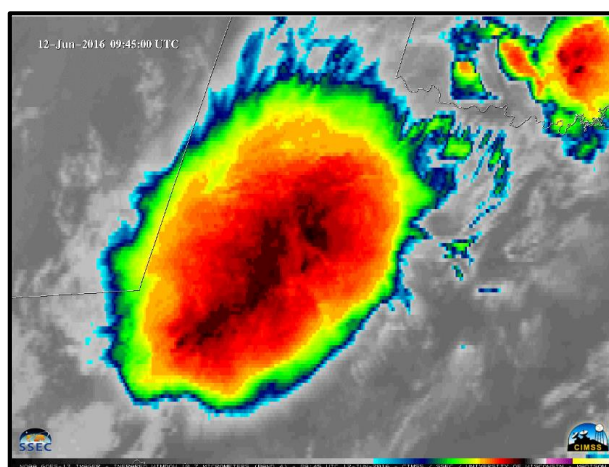
Όσον αφορά τα συστήματα που λαμβάνουν χώρα στην Ευρώπη, προέκυψε η ανάγκη μελέτης με διαφορετικά κριτήρια από τα US MCS. Οι Morel και Senesi (2002), λοιπόν, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως τα Ευρωπαϊκά MCSs, τα οποία εμφανίζονται κυρίως τη θερμή περίοδο του χρόνου (Απρίλιο-Σεπτέμβριο) με μέγιστη συχνότητα από το Μάιο μέχρι τον Αύγουστο, έχουν θερμοκρασιακό κατώφλι τους -45°C και ελάχιστη έκταση τα 10.000km^2 . Κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου, η εκκίνηση των MCS κορυφώνεται στις 14.00UTC τοπική ώρα, λόγω της θέρμανσης των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Παρ'ολ'αυτά, στην Ευρώπη, όπου τα MCSs διαρκούν κατά μέσο όρο 5,5 ώρες, το 20% αυτών των συστημάτων εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της νύχτας, ανάμεσα στις 22.00UTC και 09.00UTC τοπική ώρα, οπότε και οι μηχανισμοί που αναμένονται να παίξουν βασικό ρόλο είναι η σύγκλιση στα χαμηλότερα επίπεδα, η εμφάνιση ψυχρής λίμνης στα μεσαία στρώματα ή εν προϋπάρχον σύστημα.

Οι Kolios και Feidas (2010), οι οποίοι εστίασαν την έρευνα τους στη λεκάνη της Μεσογείου, μελετώντας πλήθος MCS με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων, διαπίστωσαν πως, η πλειοψηφία των MCSs είναι κυρίως ηπειρωτικής προέλευσης και η δημιουργία τους σχετίζεται με την ορογραφία της περιοχής που εντοπίζονται. Επιπλέον, ο χρόνος γέννησης και διάσπασης τους αποκαλύπτει έναν ημερήσιο κύκλο που σχετίζεται με τον ημερήσιο κύκλο θέρμανσης της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, ένα τυπικό σύστημα στη Μεσόγειο γεννιέται, κατά μέσο όρο, μεταξύ 14.00UTC και 17.00UTC τοπική ώρα, έχει διάρκεια τουλάχιστον 3 ώρες και τείνει να κινηθεί από βορειοδυτικά προ νοτιοανατολικά, με μια μέση ταχύτητα 36km/h . Τέλος, τα MCSs της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου παρουσιάζουν μια εποχιακή 'μετανάστευση', με τάση να εμφανίζονται πάνω από στεριά τους μήνες Απρίλιο μέχρι Αύγουστο και πάνω από θάλασσα από Σεπτέμβρη έως Δεκέμβρη.

Τέλος, παρόλο που η ισχυρότερη κακοκαιρία τείνει να επικρατεί στη φάση εκκίνησης του κύκλου ζωής ενός MCS, οι ισχυρότερες βροχοπτώσεις γενικότερα προκύπτουν όταν το

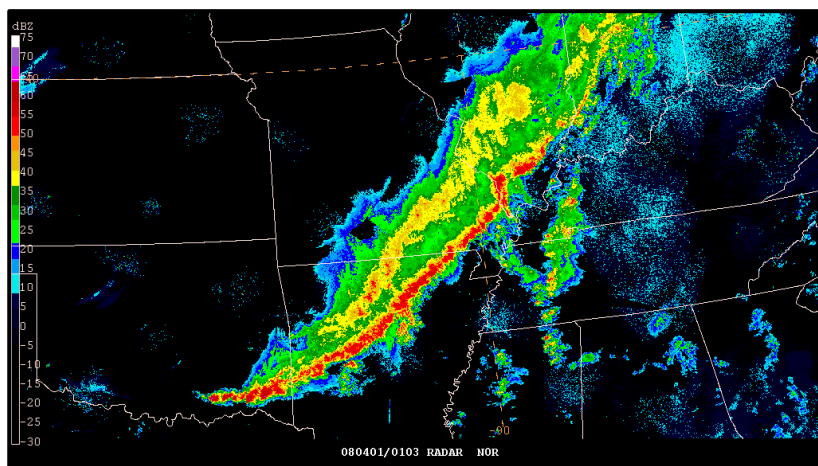
σύστημα βρίσκεται στη φάση ανάπτυξης. Οι McAnelly και Cotton (1989), σε έρευνα τους που αφορούσε 122 καταιγιδοφόρα συστήματα μέσης κλίμακας, ανακάλυψαν πως η μέγιστη μέση τιμή του ποσού βροχής καταμετρήθηκε μετά την εκκίνηση του συστήματος και αρκετές ώρες πριν αυτό αποκτήσει τη μέγιστη έκταση. Ομοίως, ο Collander's (1993), σε έρευνα που αφορούσε την ωριαία βροχόπτωση από 350 διαφορετικά καταιγιδοφόρα συστήματα, έδειξε πως η μέγιστη συχνότητα έντονης βροχόπτωσης (ποσού 25mm ανά ώρα) παρατηρήθηκε κυρίως 2 έως 6 ώρες μετά την εκκίνηση των συστημάτων.

Τα μέσης κλίμακας καταιγιδοφόρα συμπλέγματα (Mesoscale Convective Complex-MCC) αποτελούν μια ειδική περίπτωση τύπου MCS, που έχουν οριστεί από τον Maddox (1980) ως μέσο-α κλίμακας, ημικυκλικά MCS, ιδιαίτερα ψυχρών κορυφών νεφών, που παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια. Η ανάπτυξη και εξέλιξη ενός τέτοιου συστήματος δεν προβλέπεται βάση αριθμητικών μοντέλων, όμως έχει καθιερωθεί ένα θεωρητικό μοντέλο βάση της ανάλυσης των φυσικών χαρακτηριστικών του σε ενισχυμένες δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπερύθρου. Συγκεκριμένα, ο Maddox πρότεινε πως, για να χαρακτηριστεί ως MCC ένα καταιγιδοφόρο σύστημα στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, πρέπει να αποτελείται από συνεχόμενη νεφική ασπίδα θερμοκρασίας κάτω των -32°C και έκτασης πάνω από 100.000km^2 , καθώς και από μια εσωτερική ψυχρή περιοχή της νεφικής ασπίδας θερμοκρασίας κάτω των -52°C και έκτασης πάνω από 50.000km^2 . Εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια αυτά, αρχίζει και η φάση γέννησης και ανάπτυξης, ενώ όταν παύουν να ισχύουν το σύστημα μπαίνει στη φάση διάλυσης. Τα κριτήρια αυτά πρέπει να ικανοποιούνται για τουλάχιστον 6 ώρες. Όταν βρεθεί στη μέγιστη έκταση, πρέπει η συνεχή ψυχρή νεφική ασπίδα να έχει εκκεντρότητα πάνω 0,7. Τέλος, τα συστήματα αυτά αναπτύσσονται και εξελίσσονται κυρίως τις βραδινές ώρες, ενώ πρόκειται για τα καταιγιδοφόρα συστήματα μέσης κλίμακας με τα μεγαλύτερα ποσοστά μετρήσιμου ύδατος, συγκριτικά με τα υπόλοιπα (Tollerud and Collander, 1993).



Σχ. 3. Μέσης κλίμακας καταιγιδοφόρο σύμπλεγμα (MCC), όπως απεικονίζεται σε ενισχυμένη δορυφορική εικόνα στο κανάλι του υπερύθρου (Πηγή : <https://cimss.ssec.wisc.edu/>)

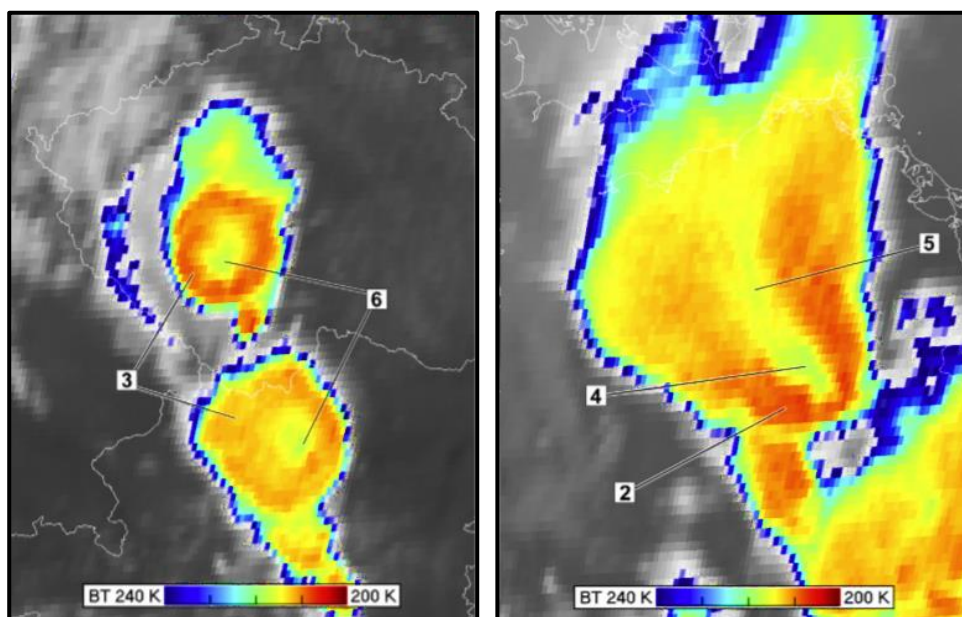
Τέλος, τα Squall Lines, ή αλλιώς γραμμές λαίλαπας, δε καθορίζονται με τόσο αυστηρά κριτήρια όσο τα MCC. Ο Hane (1986) διατύπωσε έναν γενικό ορισμό, σύμφωνα με τον οποίο ο όρος Squall Line αποδίδεται σε οποιοδήποτε νεφικό σύστημα κατακόρυφης ανάπτυξης εμφανίζεται σε γραμμή. Ο εντοπισμός τους γίνεται κυρίως με τη χρήση ραντάρ. Σε ραντάρ βασίστηκε και η ερευνα των Bluestein and Jain (1985), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι τα Squall Lines αποτελούνται από παραπλήσιες νεφικές αναπτύξεις, οι οποίες σχηματίζουν ένα πρότυπο με αναλογία μήκους-πλάτους τουλάχιστον πέντε προς ένα, παρουσιάζουν κίνηση ως ένα σύστημα και διατηρούν αυτό το σχήμα για τουλάχιστον 15 λεπτά. Τα μεμονωμένα κύτταρα που συνθέτουν αυτό το σύστημα έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να διαρκούν από 30 έως 60 λεπτά. Ως ενιαίο σύστημα, η γραμμή λαίλαπας παρουσιάζει γρήγορη οριζόντια μετατόπιση. Η γραμμή των καταιγίδων μπορεί να είναι συνεχόμενη ή να παρουσιάζει κενά και σπασίματα. Τα σπασίματα της γραμμής είναι η ευνοϊκή περιοχή στην οποία μπορεί να αναπτυχθούν ανεμοστρόβιλοι. Ένα σύστημα γραμμής λαίλαπας συνήθως σχηματίζεται πίσω από ένα ψυχρό μέτωπο και η γραμμή των καταιγίδων εκτείνεται κατά μήκος της μετωπικής επιφάνειας, όπου, λόγω των έντονων ανοδικών ρευμάτων που παρασέρνουν προς την ανώτερη τροπόσφαιρα υγρό και θερμό αέρα, η κατακόρυφη ανάπτυξη είναι μεγάλη. Τα Squall Lines είναι υπεύθυνα για πολλές καταστροφές σε σκεπές, υπόστεγα, δέντρα και ηλεκτρικά καλώδια λόγω των ισχυρών ανέμων που παράγουν στη μπροστινή πλευρά τους, έως και 30-40m/s.



Σχ. 4. Καταιγιδοφόρο σύστημα γραμμής λαίλαπας (Squall Line), όπως απεικονίζεται σε εικόνα από ραντάρ (Πηγή : <http://apollo.lsc.vsc.edu/>)

Δυο άλλες κατηγορίες καταιγιδοφόρων συστημάτων μέσης κλίμακας που προκύπτουν από το σχήμα της νεφικής ασπίδας είναι τα συστήματα ψυχρού δακτυλίου (Cold Rings) και καταιγίδες U/V (Cold-V/U ή Enhanced-V -εφόσον είχε διαπιστωθεί από enhanced IR10,8 εικόνες-). Γι' αυτές τις δυο κατηγορίες δεν έχει διατυπωθεί κάποιος επίσημος ορισμός που να

διευκρινίζει τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, όπως θερμοκρασιακό κατώφλι, συγκεκριμένο σχήμα ή μέγεθος, διάρκεια κτλ. Για το λόγο αυτό δεν είναι ξεκάθαρο εάν ένα σύστημα θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως Cold Ring ή Cold-V/U από τα φυσικά χαρακτηριστικά του, πάρα μόνο από την απεικόνιση και το σχήμα που παρουσιάζει η νεφική ασπίδα που το υπερκαλύπτει, σε ενισχυμένες εικόνες του υπερύθρου. Στις αρχές του '80 οι Negri (1982), Fujita (1982), McCann et al. (1983) και αρκετοί άλλοι αργότερα, προσπάθησαν να διερευνήσουν την προέλευση των U/V καταιγίδων και κυρίως της θερμής περιοχής (Warm Area) που περικλείουν οι ψυχρές κορυφές των νεφών σε σχήμα U/V. Διαπίστωσαν πως παρουσιάζουν ομοιότητα με τις Cold Ring-shaped καταιγίδες, με τη μόνη διαφορά ότι οι ψυχρές κορυφές νεφών των τελευταίων έχουν σχήμα δακτυλίου και περικλείουν εξ' ολοκλήρου τη θερμή περιοχή (Embedded Warm Area). Επιπρόσθετα, οι μηχανισμοί που πυροδοτούν και τους δυο τύπους συστημάτων φαίνεται πως είναι οι ίδιοι, ενώ οι παράγοντες που τα διαχωρίζουν είναι η διάτμηση του ανέμου στην ανώτερη τροπόσφαιρα και το μέγεθος της αναστροφής στην κατώτερη στρατόσφαιρα. Στο σχήμα 5 γίνεται υπόδειξη των θερμών και ψυχρών περιοχών της νεφικής ασπίδας για τους δυο τύπους καταιγίδων.



Σχ. 5. Ενισχυμένες δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπερύθρου. Αριστερά: καταιγιδοφόρο σύστημα ψυχρού δακτυλίου (Cold Ring) , Δεξιά: καταιγιδοφόρο σύστημα σχήματος U/V.

(2), (3): Ψυχρές κορυφές νεφών, (4), (5), (6): Θερμή περιοχή (Embedded Warm Area)

(Πηγή : Setvak, 2010)

Τέλος, σύμφωνα με τους Setvak et al. (2010), υπάρχει η πιθανότητα να υπάρχει σύνδεση ανάμεσα σε αυτούς τους δυο τύπους. Πιο συγκεκριμένα, σε ορισμένες περιπτώσεις η καταιγίδα σχήματος Cold Ring καθώς εξελίσσεται, μπορεί να μετατραπεί σε Cold U/V, δεν

μπορεί όμως να πραγματοποιηθεί το αντίθετο. Σε γενικές γραμμές, τα νεφικά συστήματα στα οποία εμφανίζονται ενσωματωμένες θερμές περιοχές, αποτελούν σύνηθες φαινόμενο στις δορυφορικές εικόνες του MSG πάνω από την Ευρώπη, με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης των Cold Ring-shaped καταιγίδων.

Κλείνοντας, το γενικότερο συμπέρασμα είναι πως, πάρα το σχετικά μικρό τους μέγεθος, τα μεγάλης διάρκειας αργά κινούμενα καταιγιδοφόρα συστήματα μέσης κλίμακας μπορεί να γίνουν επικίνδυνα, καθώς πολύ συχνά συνοδεύονται από έντονες κακοκαιρίες, όπως πλημύρες, χαλάζι, δυνατούς ανέμους, ακόμα και ανεμοστρόβιλους, προκαλώντας πολλά ατυχήματα και σοβαρές ζημιές. Όταν εξελίσσονται πάνω από ωκεανούς, μπορούν να αποκτήσουν μέχρι και τη μορφή τροπικού κυκλώνα. Γι' αυτό η επιστημονική μελέτη και κατ' επέκταση η έγκαιρη πρόγνωση τους είναι πολύ σημαντική. Με το πέρασμα των χρόνων, η παρατηρησιακή περιγραφή και η θεωρητική κατανόηση αυτών των καταιγιδοφόρων συστημάτων εξελίχθηκε ραγδαία, παρέχοντας λεπτομερειακά εννοιολογικά μοντέλα για την οργάνωση των συστημάτων, την κυκλοφορία του ανέμου, τη θερμοκρασιακή δομή και τις μικροφυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στους διάφορους τύπους των MCSs. Από το τέλος της δεκαετίας του '70 ήταν εφικτή η πρόσβαση σε δεδομένα από γεωστάσιμους δορυφόρους. Η διαθεσιμότητα και ανάλυση αυτών των δεδομένων παρέχουν έναν μοναδικό τρόπο για την αναγνώριση και παρακολούθηση της εξέλιξης ενός καταιγιδοφόρου συστήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές που είναι πρακτικά δύσκολη η πρόσβαση, όπως στους ωκεανούς και στα τροπικά δάση. Επιπλέον, οι δορυφορικές μέθοδοι που αναγνωρίζουν και παρακολουθούν τις ιδιότητες της δομής ενός συστήματος, όπως η θερμοκρασία λαμπρότητας, η περιοχή που καλύπτουν, η περίμετρος, η εκκεντρότητα κτλ., μπορούν να παρέχουν αξιόλογες πληροφορίες για τους δυναμικούς μηχανισμούς που εμπλέκονται στον κύκλο ζωής τους, περιλαμβάνοντας και την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα καταιγιδοφόρα συστήματα με τη μεγάλης κλίμακας κυκλοφορία (Silva Dias and Ferreira 1992; Cohen et al. 1995).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη του καταιγιδοφόρου συστήματος MCS που επηρέασε τον ελλαδικό χώρο στις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Τα εντονότερα φαινόμενα εκδηλώθηκαν ως ισχυρές καταιγίδες, συνοδευόμενες από χαλάζι και ισχυρούς ανέμους, ενώ στα ορεινά προκλήθηκαν ακόμα και χιονοθύελλες. Το αποτέλεσμα αυτών των δυσμενών καιρικών συνθηκών ήταν έντονα πλημμυρικά φαινόμενα, με αρκετές περιοχές να έχουν τεθεί σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, προκλήθηκαν ζημιές σε ανθρώπινες περιουσίες, κινδύνεψαν ανθρώπινες ζωές, ενώ υπήρξε και ένας νεκρός.

2. Δεδομένα - Μεθοδολογία

2.1 Δεδομένα

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα, αρχικά για την απεικόνιση των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικράτησαν κατά τη διάρκεια του συστήματος, στις 16 και 17 Ιουλίου 2017 και έπειτα για την ανάλυση των φαινομένων που προκάλεσαν το MCS.

Αρχικά, έγινε χρήση των δεδομένων Re-analysis, τα οποία παρήχθησαν από το Ευρωπαϊκό Κέντρο ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), με ανάλυση πλέγματος $0,7^\circ \times 0,7^\circ$, ανά 6 ώρες (00.00UTC, 06.00UTC, 12.00UTC, 18.00UTC) για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Όσον αφορά τις παραμέτρους των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε απεικόνιση της θερμοκρασίας, των γεωδυναμικών υψών, του ανέμου, της σχετικής υγρασίας, του δυναμικού στροβιλισμού και της απόκλισης για τα ισοβαρικά επίπεδα των 1000hPa, 925hPa, 850hPa, 700hPa, 600hPa, 400hPa, 300hPa, 250hPa, 200hPa, 150hPa και 100hPa, με σκοπό την ανάλυση της συνοπτικής κατάστασης της ατμόσφαιρας για τις δυο αυτές ημέρες. Επιπλέον, χάρτες επιφανείας από το μετεωρολογικό γραφείο UKMO (United Kingdom Meteorological Office) χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Τέλος, για την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών της ατμόσφαιρας καθ' ύψος διατέθηκαν τεφιγράμματα και δείκτες αστάθειας (Showalter Index, K Index, Lifted Index, CAPE) από το πανεπιστήμιο Wyoming, τα οποία προέρχονταν από ραδιοβολίσεις στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης, της Αθήνας και του Bridizi (Ιταλία).

Για την απεικόνιση των δορυφορικών εικόνων με σκοπό την εκτενέστερη ανάλυση της κατάστασης, από δορυφορικής σκοπιάς, κρίθηκε απαραίτητη η λήψη δορυφορικών δεδομένων από το γεωστάσιμο δορυφόρο δεύτερης γενιάς MSG (MeteoSat Second Generation), ο οποίος έχει τεθεί σε λειτουργία από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό των Μετεωρολογικών Δορυφόρων EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Περισσότερες πληροφορίες για το δορυφόρο MSG παρέχονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Μεθοδολογία

2.2.1 Σύντομη εισαγωγή για τον MSG (MeteoSat Second Generation)

Για περισσότερο από 40 χρόνια οι μετεωρολογικοί δορυφόροι αποτελούν τον καλύτερο τρόπο στην παρατήρηση της αλλαγής του καιρού σε μεγάλη κλίμακα. Τυπικά, η επιχειρησια-

κή μετεωρολογία χρησιμοποιεί δυο τύπους δορυφόρων για να λαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες:

i) Δορυφόροι πολικής τροχιάς (Polar Orbiting Satellites): πρόκειται για δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, η οποία διέρχεται από τους δυο πόλους της γης με απόκλιση 90° . Περιστρέφονται σε ύψος 800-1500km γύρω από τη γη. Μπορούν να παρέχουν πληροφορίες υψηλής χωρικής ανάλυσης, αλλά χαμηλής χρονικής ανάλυσης, για το λόγο ότι διέρχονται από το ίδιο σημείο της γης δυο φορές τη μέρα. Πολικής τροχιάς είναι οι δορυφόροι NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration).

ii) Γεωστάσιμοι δορυφόροι (Geostationary Satellites): πρόκειται για δορυφόρους υψηλής τροχιάς. Περιστρέφονται σε ύψος 36.000km γύρω από τη γη, στο επίπεδο του Ισημερινού. Κινούνται με τη γωνιακή ταχύτητα της γης και 'βλέπουν' πάντα την ίδια περιοχή της γης. Σε αντίθεση με τους δορυφόρους πολικής τροχιάς, οι γεωστάσιμοι έχουν υψηλή χρονική ανάλυση, της τάξης των 15', ενώ λόγω του μεγάλου ύψους στο οποίο κινούνται παρουσιάζουν χαμηλή χωρική ανάλυση. Ο δορυφόρος δεύτερης γενιάς MSG (MeteoSat Second Generation) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού EUMETSAT αποτελεί γεωστάσιμο δορυφόρο για την περιοχή της Ευρώπης.

Σήμερα, η τρέχουσα σειρά των δορυφόρων METEOSAT δεύτερης γενιάς φέρει το πολυφασματικό ραδιόμετρο SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Το όργανο αυτό απεικονίζει τον πλήρη δίσκο της γης σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο 15', σε 12 φασματικές περιοχές, οι οποίες περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πιν.1). Οι απεικονίσεις αυτές παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης των γρήγορα μεταβαλλόμενων δυναμικών φαινομένων, όπως η ισχυρή κατακόρυφη ανάπτυξη (deep convection).

2.2.2 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων των καναλιών του δορυφόρου Meteosat

Ο απεικονιστής των δορυφορικών εικόνων, SEVIRI, διαθέτει οκτώ φασματικά κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο (IR), τρία κανάλια στο ορατό και ένα κανάλι ευρείας ζώνης (0.4 – 1.1μm) υψηλής ανάλυσης στην φασματική περιοχή του ορατού. Από τα οκτώ φασματικά κανάλια θερμικού υπέρυθρου, τα τέσσερα καταγράφουν θερμοκρασίες νεφών καθώς και γήινων και θαλάσσιων επιφανειών, ενώ τα υπόλοιπα καταγράφουν την υγρασία της ατμόσφαιρας (H_2O) το όζον (O_3) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα. Ο πίνακας 1 παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά αυτών των καναλιών και δείχνει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται κάθε κανάλι: για παρατηρήσεις νεφών και θερμοκρασίας επιφανειών, υδρατμών ή όζοντος.

Κανάλι	Φασματική Ζώνη (μm)	Χαρακτηριστικά Φασματικής Ζώνης (μm)			Κύρια Παρατηρησιακή Εφαρμογή
		λ_{cen}	λ_{min}	λ_{max}	
1	VIS0.6	0.635	0.56	0.71	Επιφάνεια, Νέφη, Πεδίο ανέμου
2	VIS0.8	0.81	0.74	0.88	Επιφάνεια, Νέφη, Πεδίο ανέμου
3	NIR1.6	1.64	1.50	1.78	Επιφάνεια, Φάση νέφους
4	IR3.9	3.90	3.48	4.36	Επιφάνεια, Νέφη, Πεδίο ανέμου
5	WV6.2	6.25	5.35	7.15	Υγρασία, Υψηλά νέφη, Αστάθεια
6	WV7.3	7.35	6.85	7.85	Υγρασία, Αστάθεια
7	IR8.7	8.70	8.30	9.1	Επιφάνεια, Νέφη, Αστάθεια
8	IR9.7	9.66	9.38	9.94	Όζον
9	IR10.8	10.80	9.80	11.80	Επιφάνεια, Νέφη, Αστάθεια
10	IR12.0	12.00	11.00	13.00	Επιφάνεια, Νέφη, Αστάθεια
11	IR13.4	13.40	12.40	14.40	Ύψος νεφών Cirrus, Αστάθεια
12	HRV	Broadband (about 0.4 – 1.1 μm)			Επιφάνεια, Νέφη

Πίν. 1. Φασματικές περιοχές καναλιών του SEVIRI : μέγιστη, ελάχιστη και κεντρική τιμή μήκους κύματος των καναλιών. Κύριες εφαρμογές κάθε καναλιού

α. Κανάλια του Ορατού

Στη φασματική περιοχή 0.38-1.7μm, που είναι η περιοχή του ορατού, ανήκουν τα κανάλια 1: 0.6μm, 2: 0.8μm, 3: 1.6μm και 12: 0.5-0.9μm.

Στα κανάλια του ορατού η αναγνώριση των νεφών, καθώς επίσης και του χιονιού και του πάγου γίνεται μέσω της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Επιτυγχάνεται η διάκριση μεταξύ των νεφών που αποτελούνται από υδροσταγόνες από αυτά που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους. Τέλος, στα κανάλια του ορατού αναγνωρίζονται τα χαρακτηριστικά των επιφανειών του εδάφους, όπως η βλάστηση και το έδαφος.

Η ηλιακή ακτινοβολία που καταγράφει ο αισθητήρας, προέρχεται είτε από ανάκλαση από τις κορυφές των νεφών και την επιφάνεια της γης, είτε από σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερη η ανακλαστικότητα, τόσο πιο ανοιχτές είναι οι αποχρώσεις του γκρι στην δορυφορική εικόνα και αντιστρόφως. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανακλαστικότητα είναι το πάχος του νέφους, το περιεχόμενο του νέφους σε νερό, η σύστασή τους, εάν δηλαδή αποτελούνται από υδροσταγόνες ή παγοκρυστάλλους καθώς επίσης και το μέγεθος των υδροσταγόνων και παγοκρυστάλλων. Μεγάλη ανακλαστικότητα, λοιπόν, θα έχουν νέφη με μεγάλο πάχος, μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό/πάγο και με μικρές σε μέγεθος υδροσταγόνες/παγοκρυστάλλους.

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί το κανάλι υψηλής ανάλυσης στην φασματική περιοχή του ορατού, HRV (High-Resolution Visible). Χαρακτηριστικό γνώρισμα του καναλιού αυτού είναι η παρακολούθηση χαρακτηριστικών μικρής κλίμακας, για το λόγο του ότι προσφέρει απεικόνιση υψηλής ανάλυσης.

β. Κανάλια του Θερμικού Υπερύθρου

Στη φασματική περιοχή 8-12.5μm, που αποτελεί το ατμοσφαιρικό παράθυρο, δηλαδή την περιοχή εκπομπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα, βρίσκονται τα κανάλια 8: 9.7μm, 9: 10.8μm και 10: 12μm.

Στα κανάλια του υπέρυθρου η αναγνώριση νεφικών συστημάτων, καθώς και η διάκριση υψηλών λεπτών Cirrus από το νεφικό σύστημα, οφείλεται στην εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα νέφη και την επιφάνεια της γης. Η απόχρωση με την οποία αποδίδονται τα νέφη των δορυφορικών εικόνων στα κανάλια του θερμικού υπέρυθρου, εξαρτάται από τη θερμοκρασία των νεφών. Ψυχρές περιοχές νεφών εμφανίζονται με ανοιχτές αποχρώσεις, ενώ θερμές περιοχές με σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Αναλυτικότερα, υψηλά και μεσαία νέφη αποδίδονται με ανοιχτό γκρι έως λευκό χρώμα, ενώ θερμότερα νέφη, όπως τα χαμηλά, ή και ομίχλη, απεικονίζονται με σκούρο γκρι. Συνεπώς, αυτές οι δορυφορικές εικόνες εξυπηρετούν στην διάκριση των υψηλών ψυχρών κορυφών νεφών.

Αντίστοιχες αποχρώσεις ισχύουν και για τις γήινες επιφάνειες, όπου παγοκαλυμμένες περιοχές ανιχνεύονται με λευκό χρώμα ενώ το θερμό έδαφος απεικονίζεται με σκούρο γκρι. Με εξαίρεση τις πολικές περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ψυχρά νέφη, όπως μεσαία και υψηλά, είναι εύκολα αναγνωρίσιμα πάνω από θερμό έδαφος.

γ. Κανάλια των υδρατμών

Στη φασματική περιοχή 5.7-7.1μm, που είναι η περιοχή μέγιστης απορρόφησης των υδρατμών, ανήκουν τα κανάλια 5:6.2μm και 6:7.3μm.

Τα κανάλια απορρόφησης των υδρατμών, καταγράφουν ακτινοβολία στην φασματική περιοχή όπου οι υδρατμοί απορροφούν και συνεπώς εκπέμπουν στο μέγιστο. Η περιοχή μέγιστης απορρόφησης είναι γύρω από τα 6μm. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν οι υδρατμοί προέρχεται κατά κύριο λόγο από τα υψηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας (300-600hPa).

Στις WV εικόνες, με ανοιχτές αποχρώσεις του γκρι απεικονίζονται μεγάλα ποσά υδρατμών στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα, η οποία όμως μπορεί να επικαλύπτει πιθανή υγρασία στα κατώτερα στρώματα, καθώς ο αισθητήρας καταγράφει την υγρασία που βρίσκεται υψηλότερα στην ατμόσφαιρα. Με σκούρες αποχρώσεις απεικονίζονται οι υδρατμοί των κατώτερων στρωμάτων, η ανίχνευση των οποίων προϋποθέτει ο αέρας στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα να είναι ξηρός. Συνοπτικά, ανοιχτοί τόνοι του γκρι υποδεικνύουν υψηλή υγρασία στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα (ψυχρότεροι υδρατμοί των ανώτερων στρωμάτων) ενώ σκούρες αποχρώσεις φανερώνουν χαμηλή υγρασία στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα (θερμότεροι υδρατμοί των κατώτερων στρωμάτων).

Η ανάλυση των WV εικόνων μπορεί να δώσει πληροφορίες για τον υπολογισμό των ανέμων στα διάφορα επίπεδα της τροπόσφαιρας, ανάλογα με την κίνηση των υδρατμών, καθώς και το ύψος των ημιδιάφανων νεφών. Όσον αφορά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των

δύο καναλιών, το κανάλι 5 καταγράφει μόνο την ακτινοβολία που προέρχεται από τα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, σε αντίθεση με το κανάλι 6 στο οποίο φτάνει ακτινοβολία ακόμα και από τα κατώτερα στρώματα. Συνεπώς, με τη σύγκριση των δύο καναλιών μπορεί να γίνει διαφοροποίηση μεταξύ δύο διαφορετικών επιπέδων ως προς το περιεχόμενο τους σε υδρατμούς. Τέλος, τα δύο κανάλια χρησιμεύουν στην δυναμική ανάλυση της ανώτερης τροπόσφαιρας.

Η ανάλυση της δυναμικής κατάστασης στις WV εικόνες πραγματοποιείται στις υγρές και ξηρές περιοχές της ανώτερης τροπόσφαιρας, καθώς και στα όρια ανάμεσα στις δύο περιοχές, όπου η αντίθεση μεταξύ ανοικτών και σκούρων αποχρώσεων του γκρι είναι μεγάλη. Αυτά τα "όρια υγρασίας" σχετίζονται με σημαντικές διεργασίες μεγάλης κλίμακας της ανώτερης τροπόσφαιρας:

i) Ύψος της τροπόπαυσης

Περιοχές με απότομη αντίθεση στα επίπεδα του γκρι σχετίζονται με ισχυρή βαθμίδα των υψών της δυναμικής τροπόπαυσης. Σκούρες περιοχές στην εικόνα των υδρατμών υπονοούν χαμηλά ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης των 1.5 PVU, ενώ ανοιχτόχρωμες περιοχές αντιστοιχούν σε μεγάλα ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης. Όταν η δυναμική τροπόπαυση εντοπίζεται υψηλά στην ατμόσφαιρα, επιτρέπει στα νέφη να παρουσιάσουν μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται φωτεινή απόχρωση στην εικόνα των υδρατμών.

ii) Ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης

Η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης τοποθετείται στην περιοχή όπου επικρατούν σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Η επιφάνεια των 1.5PVU εμφανίζεται τοπικά σε ελάχιστο ύψος με παράλληλη επικράτηση καθοδικών κινήσεων στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα. Η περιοχή μπροστά από την ανωμαλία εμφανίζεται με ανοιχτές αποχρώσεις του γκρι. Υποδεικνύει μέγιστο ύψος της επιφάνειας των 1.5PVU και ανοδικές κινήσεις στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα. Η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης συνοδεύεται από την εισβολή ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα στα μέσα και ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας, που εντοπίζεται κατά μήκος της αναδίπλωσης της τροπόσφαιρας.

iii) Αεροχείμαρρος

Ο αεροχείμαρρος και συγκεκριμένα ο άξονας της περιοχής με τις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμων στην ανώτερη τροπόσφαιρα (jet streak), τοποθετείται κατά μήκος της περιοχής με τη μεγαλύτερη αντίθεση ανοιχτών-σκούρων αποχρώσεων, που αποτελούν περιοχές με διαφορετική υγρασία. Τα όρια της υγρασίας προκύπτουν από την έντονη κλίση της τροπόπαυσης, η οποία κλίση υποδεικνύει και μεγάλη βαθμίδα των γεωδυναμικών υψών στο επίπεδο αυτό, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ισχυρό άνεμο.

Για την απεικόνιση των δορυφορικών εικόνων υπάρχουν τρεις τρόποι:

- i) Απεικονίσεις από μεμονωμένα κανάλια που συνήθως παρουσιάζονται ως ασπρόμαυρες χρησιμοποιώντας την κλίμακα του γκρι, π.χ. T10.8.
- ii) Απεικονίσεις από διαφορές μεταξύ δυο καναλιών, οι οποίες παρουσιάζονται επίσης ως ασπρόμαυρες, π.χ. T6.2 - T10.8. Η απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ δυο καναλιών βοηθάει στον εντοπισμό και την ενίσχυση ενός φαινομένου, το οποίο δεν θα μπορούσε να γίνει αντιληπτό σε εικόνα ενός καναλιού.
- iii) Εικόνες που συνδυάζουν περισσότερα από δυο κανάλια ταυτόχρονα (πολυφασματικές εικόνες) σε μια χρωματική σύνθεση του κόκκινου (R), του πράσινου (G) και του μπλε (B). Καθεμία απόχρωση αποδίδει είτε ένα μεμονωμένο κανάλι είτε διαφορές καναλιών, π.χ. WV6.2 - WV7.3, IR9.7 - IR10.8, WV6.2. Η προσθήκη χρωμάτων σε μια απεικόνιση ενισχύει τα οπτικά χαρακτηριστικά των εικόνων και έτσι η εξαγωγή των συμπερασμάτων μπορεί να γίνει πιο γρήγορα και αποτελεσματικά.

Παρακάτω αναλύονται οι τρόποι λειτουργίας των διαφορών καναλιών και των συνδυασμών RGB που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φαινομένου.

2.2.3 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων διαφοράς καναλιών του δορυφόρου Meteosat

Πολυφασματικά δεδομένα από το δορυφόρο MSG αποτυπώνονται σε δορυφορική εικόνα ως αποτέλεσμα ενός καναλιού ή διαφοράς καναλιών, με σκοπό την παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των νεφών και την μελέτη των φυσικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών διαφόρων καταιγιδοφόρων συστημάτων. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των νεφών παρέχουν πληροφορίες σε διάφορες φασματικές ζώνες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατηγοριοποίηση τους, ανάλογα με το οπτικό τους πάχος, το ύψος της κορυφής τους και τη σύσταση τους. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των νεφών εκτιμώνται ως διαφορές θερμοκρασίας λαμπρότητας (Brightness Temperature Differences-BTDs) ή διαφορές ανακλαστικότητας (Radiance Differences-RDs) ανάμεσα σε δυο κανάλια, σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες που πρόκειται να μελετηθούν.

α. T6.2 - T10.8

Οι διαφορές θερμοκρασίας λαμπρότητας (Brightness Temperature Differences - BTDs) μεταξύ των καναλιών θερμικού υπερύθρου παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μικροφυσική των κορυφών των νεφών.

Οι διαφορές BT μεταξύ των καναλιών 6.2μm και 10.8μm είναι αποτελεσματικές στη διάκριση υψηλών και χαμηλών/μεσαίων νεφών (Lutz et al. 2003). Η δορυφορική εικόνα διαφοράς T6.2 - T10.8 μπορεί να οπτικοποιήσει την κατανομή της υγρασίας πάνω από τις

κορυφές των καλά ανεπτυγμένων κατακόρυφα νεφών, καθώς και για κορυφές που έχουν εισχωρήσει στη στρατόσφαιρα (Overshooting Tops-OT) (Fritz and Laszlo, 1993; Schmetz et al., 1997). Θετικές διαφορές εμφανίζονται όταν εντοπίζεται υγρασία στη στρατόσφαιρα, με αποτέλεσμα τον εντοπισμό των υπερυψωμένων κορυφών (Overshooting Tops), το οποίο αποτελεί και ένδειξη ισχυρής κακοκαιρίας. Αντίθετα, μικρές αρνητικές διαφορές ή τιμές κοντά στο μηδέν φανερώνουν την ύπαρξη υψηλών παχιών νεφών, ενώ μεγάλες αρνητικές τιμές την ύπαρξη μεσαίων ή χαμηλών νεφών και κατ' εξαίρεση ημιδιαφανών νεφών Cirrus.

β. T6.2 - T7.3

Η διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας ανάμεσα στα δυο κανάλια των υδρατμών, T6.2 - T7.3, αποτυπώνει σε δορυφορική εικόνα την ύπαρξη ή μη υγρασίας στα ανωτέρα επίπεδα της τροπόσφαιρας. Αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση των υψηλών κορυφών των νεφών που προσεγγίζουν την τροπόπαυση ή την ξεπερνούν. Οι κορυφές των νεφών αυτών, που βρίσκονται κοντά στο ύψος της τροπόπαυσης, εκπέμπουν ως μέλαν σώμα στα κανάλια των υδρατμών, συνεπώς, η θερμοκρασία λαμπρότητας είναι σχεδόν η ίδια για τα δυο κανάλια και η διαφορά BT είναι μικρή θετική ή προσεγγίζει το μηδέν. Αντιθέτως, λόγω διαφορετικής απορρόφησης από τα δυο κανάλια, της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα χαμηλότερα νέφη, η διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας των δυο καναλιών αποκτά μεγάλες αρνητικές τιμές.

γ. T10.8 - T12.0

Το παράθυρο διαχωρισμού θερμοκρασίας λαμπρότητας μεταξύ των καναλιών 10.8μm και 12.0μm αποτελεί μια καλή ένδειξη του οπτικού πάχους των νεφών και είναι αρκετά αποτελεσματικό στη διαφοροποίηση των οπτικά παχιών σωρειτόμορφων (cumuliform) νεφών από τα οπτικώς λεπτά νέφη Cirrus (Inoue 1985, 1987). Τα οπτικά παχιά νέφη χαρακτηρίζονται από μικρές θετικές τιμές διαφορών θερμοκρασίας λαμπρότητας, ενώ τα οπτικά λεπτά νέφη αντιστοιχούν σε μεγάλες θετικές τιμές. Τα οπτικά παχιά και συνεπώς μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης νέφη αναμένεται να σχετίζονται με ισχυρή βροχόπτωση.

2.2.4 Ερμηνείες δορυφορικών εικόνων των συνδυασμών καναλιών RGB

Η τεχνική σύνθεσης εικόνας RGB μεταφέρει πληροφορίες από διάφορα φασματικά κανάλια σε ένα μόνο προϊόν για βέλτιστη οπτικοποίηση, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την πρωταρχική μορφή και υφή των νεφών και της επιφάνειας της γης. Η σύνθεση εικόνων RGB πραγματοποιείται από το συνδυασμό τριών διαφορετικών καναλιών ή διαφόρων καναλιών σε

μια μεμονωμένη χρωματική σύνθεση. Η EUMETSAT έχει αναπτύξει έναν καθορισμένο τύπο συνθέσεων RGB, σχεδιασμένων να καταγράφουν ατμοσφαιρικά φαινόμενα και παραμέτρους, όπως καταιγίδες, μικροφυσική των νεφών, ομίχλη, χαμηλή/υψηλή νέφωση, αέριες μάζες, σκόνη κ.α. (Kerkmann et al. 2006). Παρακάτω αναλύονται οι εικόνες RGB, που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη του φαινομένου και εξυπηρετούν στην παρακολούθηση καταιγιδοφόρων νεφών και την ανάλυση αέριων μαζών.

α. Airmass

Ο συνδυασμός RGB (WV6.2 - WV7.3, IR9.7 - IR10.8, WV6.2) που ονομάζεται και Airmass RGB, δίνει πληροφορίες κατά κύριο λόγο για τη δυναμική της ατμόσφαιρας, καθώς υποδεικνύει τα χαρακτηριστικά της, βοηθάει στο διαχωρισμό των αέριων μαζών - θερμών τροπικών από ψυχρές πολικές - και στην ανίχνευση της θέσης του αεροχειμάρρου. Επιπρόσθετα, κατά την ανάλυση αυτών των εικόνων μπορεί να ανιχνευθεί η ύπαρξη συστήματος χαμηλών πιέσεων, μετωπικά νεφικά συστήματα και ο καθοδικός ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας που τα συνοδεύει. Τέλος, με τη διαφοροποίηση στις αποχρώσεις μπορούν να διαχωριστούν υψηλά από μεσαία νέφη. Αυτό το προϊόν RGB μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλες τις ώρες τις ημέρας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, εφόσον οι αποχρώσεις δεν επηρεάζονται από την περίοδο του χρόνου ή της ημέρας.

β. Day Convective Storms

Ο συνδυασμός RGB (WV6.2 - WV7.3, IR3.9 - IR10.8, NIR1.6 - VIS0.6) ή αλλιώς Convective Storms RGB, χρησιμοποιεί πληροφορίες από τρεις διαφορές καναλιών, ώστε να διακρίνει τα βροχοφόρα νέφη έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης από τα νέφη Cirrus, με βάση τη μικροφυσική της κορυφής των νεφών. Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη πάνω από ηπειρωτικές περιοχές, η παρουσία μικρών παγοκρυστάλλων σε συνδυασμό με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στην κορυφή των νεφών προσδίδουν έντονα φαινόμενα. Αυτό το προϊόν RGB έχει ρυθμιστεί στο να τονίζει τέτοιου είδους νέφη. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι πως εξυπηρετεί στην αναγνώριση έντονων ανοδικών κινήσεων, καθώς επίσης και στον εντοπισμό καταιγιδοφόρων συστημάτων μέσης κλίμακας (MCS).

γ. Day Microphysics

Ο συνδυασμός RGB (VIS0.8, IR3.9r, IR10.8) δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης και διάκρισης νεφών διαφορετικής σύνθεσης, καθώς παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη φάση που βρίσκονται τα σωματίδια της κορυφής των νεφών, εάν δηλαδή είναι υδροσταγόνες ή

παγοκρυστάλλια, το μέγεθος τους και τη θερμοκρασία των κορυφών. Επιπλέον, πληροφορεί για το οπτικό πάχος ενός νέφους και, συνεπώς, την κατακόρυφη ανάπτυξη του. Με τη βοήθεια διαδοχικών εικόνων Day Microphysics, μπορεί κάποιος να παρατηρήσει τη διαδικασία ανάπτυξης και τις φάσεις ενός νεφικού συστήματος, την εκκίνηση της παγοποίησης της κορυφής των νεφών, την εξέλιξη του μεγέθους των σωματιδίων του νέφους και τη διαδικασία διάλυσης του νέφους μέσω της διάκριση μεγάλων παγοκρυστάλλων. Ο μοναδικός περιορισμός αυτού του προϊόντος είναι ο χρόνος της εφαρμογής του, καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ασφαλή μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και όσο υπάρχει η ηλιακή ακτινοβολία.

δ. Night Microphysics

Ο συνδυασμός RGB (IR12.0 - IR10.8, IR10.8 - IR3.9, IR10.8) έχει δημιουργηθεί με πρωταρχικό σκοπό την ανίχνευση ομίχλης ή των χαμηλών νεφών της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το προϊόν αυτό παρέχει την καλύτερη χρωματική αντίθεση ανάμεσα σε περιοχές με ομίχλη ή χαμηλή νέφωση και σε ανέφελες, με σκοπό την διάκριση τους. Παρ' ολ' αυτά, σε περίπτωση επίδρασης ηλιακής ακτινοβολίας, ο συνδυασμός αυτός δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί, συνεπώς είναι χρήσιμος μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας.

3. Αποτελέσματα Συνοπτικής και Θερμοδυναμικής Ανάλυσης

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης του καταιγιδοφόρου συστήματος μέσης κλίμακας, που επηρέασε με ισχυρές βροχοπτώσεις την Ελλάδα στις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Αρχικά γίνεται περιγραφή της κίνησης του συστήματος και έπειτα ανάλυση της συνοπτικής κατάστασης των ημερών διέλευσης του συστήματος πάνω από τη χώρα. Στο τελευταίο και βασικό τμήμα της ενότητας αυτής πραγματοποιείται ανάλυση των δορυφορικών εικόνων και εξαγωγή συμπερασμάτων της ατμοσφαιρικής κατάστασης και των φυσικών χαρακτηριστικών των νεφών που συνέθεσαν το σύστημα αυτό.

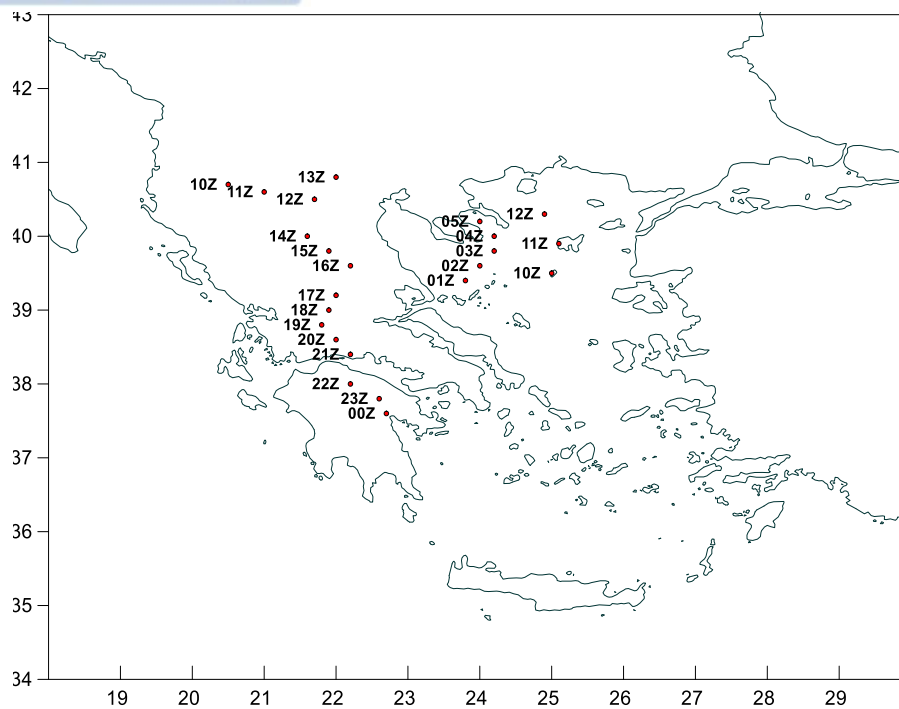
3.1 Στάδια Εξέλιξης του MCS

Για τις ανάγκες της μελέτης αυτής και την οπτικοποίηση της κίνησης του συστήματος κατασκευάστηκε ο παρακάτω χάρτης, στον οποίο απεικονίζονται οι διαδοχικές θέσεις του κέντρου του συστήματος με βήμα μιας ώρας, από την εκκίνηση του στις 16 Ιουλίου, 10.00UTC έως και την οριστική του λήξη στις 17 Ιουλίου, 12.00UTC.

Η γενικότερη μετακίνηση του MCS παρατηρήθηκε πως είχε διεύθυνση ανατολική-νοτιοανατολική στις 16 Ιουλίου, ενώ την επομένη παρέμεινε σχεδόν στάσιμο στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου, με ελαφριά μετατόπιση προς βόρεια. Οι τέσσερις διαφορετικές μορφές νεφικών αναπτύξεων που εξελίχθηκαν πάνω από τον ελλαδικό χώρο διακρίνονται εύκολα στο χάρτη.

Πιο αναλυτικά, οι πρώτες μεμονωμένες καταιγίδες απασχόλησαν αρχικά τα βορειοδυτικά και αργότερα τα βόρεια-κεντρικά τμήματα της χώρας, από τις 10.00UTC και για τις επόμενες τρεις σχεδόν ώρες, παρουσιάζοντας μετακίνηση προς τα ανατολικά. Μετά τις 13.00UTC το κέντρο του συστήματος μετατοπίζεται πάνω από την οροσειρά της Πίνδου, όπου και θα παραμείνει για άλλες τρεις ώρες, επηρεάζοντας την κεντρική Μακεδονία, την Ήπειρο και τη Θεσσαλία με τη μορφή ενός συμπλέγματος πολυκύτταρων καταιγίδων. Από τις 17.00UTC και έπειτα το σύστημα θα παρουσιάσει μια συνεχόμενη πορεία προς τα νότια, με διάρκεια αρκετών ωρών μέχρι το τέλος της μέρας, έχοντας το σχήμα ενός σφηνοειδούς καταιγιδοφόρου συστήματος. Η θέση του κέντρου του κινείται με αργό ρυθμό πάνω από τη Στερεά Ελλάδα, ενώ καταλήγει τελικά πάνω από την Πελοπόννησο, όπου επιταχύνει την πορεία του. Μετά το πέρας αυτού, ένα νέο κυκλικό καταιγιδοφόρο σύστημα αναπτύσσεται, παραμένοντας σχεδόν στάσιμο πάνω από το βορειοδυτικό Αιγαίο, πλήττοντας τα νησιά των Σποράδων και τη Χαλκιδική για περισσότερες από τέσσερις ώρες. Τέλος, μικρότερης

έντασης μεμονωμένες καταιγίδες εξελίσσονται ως κατάλοιπα του MCS γύρω από την περιοχή της Λήμνου λίγο πριν τη 12^η μεσημβρινή της 17ης Ιουλίου.



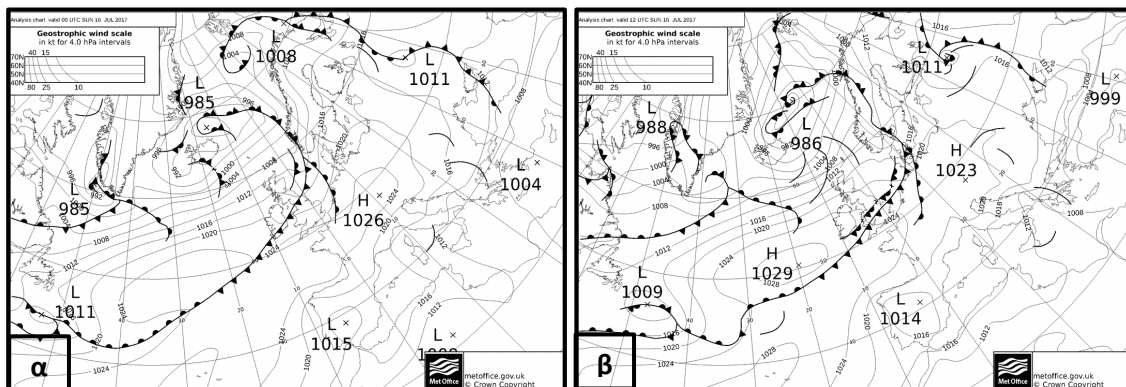
Σχ. 6. Χάρτης απεικόνισης της κίνησης του συστήματος

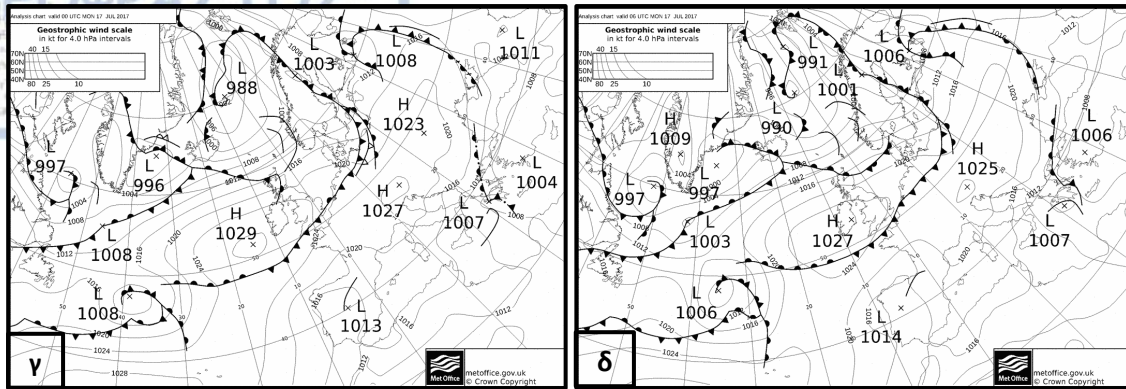
3.2 Ανάλυση Συνοπτικής Κατάστασης

α. Συνοπτικοί χάρτες επιφανείας

Στις 16 Ιουλίου η ανάλυση στην επιφάνεια αποτύπωσε ένα κέντρο χαμηλών πιέσεων ανατολικά, στην περιοχή της Ρωσίας, από όπου ξεκίνησε και επεκτάθηκε μέσα στη μέρα το ψυχρό μέτωπο. Στο Σχ. 7α το μέτωπο φαίνεται να καταλήγει στη Μαύρη Θάλασσα. Από την άλλη μεριά της Ευρώπης, δυτικά, εντοπίζεται ο αζορικός αντικυκλώνας, ο οποίος έχει μετακινηθεί στη δυτική Ευρώπη, παίζοντας και αυτός το δικό του ρόλο στην εξέλιξη των φαινομένων. Πάνω από τη χώρα και συγκεκριμένα στα βορειοανατολικά εμφανίζεται μια διαταραχή των ανώτερων στρωμάτων της τροπόσφαιρας, η οποία όπως θα αναλυθεί παρακάτω, πέρασε πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας τις θερμές ώρες της ημέρας, με αποτέλεσμα να εκδηλωθούν φαινόμενα στην περιοχή, τα οποία κατά τόπους ήταν έντονα. Σε αυτό συνετέλεσε και η ορογραφία της περιοχής. Τέλος, το χαμηλό των 1004hPa στην περιοχή της Τουρκίας βοήθησε στο να διατηρηθεί ένα βορειοανατολικό ρεύμα στην επιφάνεια, εμπλουτίζοντας τα ανατολικά της χώρας με υγρασία και κρατώντας έτσι τις τιμές της απόλυτης υγρασίας υψηλές.

Το μέτωπο το οποίο κατά τη διάρκεια της 16^{ης} Ιουλίου έδωσε μεγάλα ποσά βροχής στην περιοχή των Βαλκανίων, καθώς εκτεινόταν από τη Μαύρη Θάλασσα έως τη νότια Ιταλία, όπως θα αποτυπωθεί καλύτερα στις δορυφορικές εικόνες, φαίνεται πως έχει μετατοπιστεί νοτιότερα, καταλήγοντας τελικά πάνω από το βόρειο Αιγαίο, τις πρωινές ώρες της 17^{ης}. Το επιφανειακό χαμηλό νοτιοανατολικά της Ιταλίας, στο Σχ. 7γ, σε συνδυασμό με την διαταραχή στην ανώτερη τροπόσφαιρα, που θα σχολιαστεί παρακάτω, αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες για την ένταση και τη διάρκεια των φαινομένων που συνεχίστηκαν έως και το μέσον της 17^{ης} Ιουλίου. Το χαμηλό των 1004hPa, έχοντας μετατοπιστεί ελάχιστα βορειότερα, συνεχίζει να επηρεάζει την κατώτερη ατμόσφαιρα της περιοχή του Αιγαίου, καθώς μεταφέρει θερμές και υγρές αέριες μάζες προς την ευρύτερη περιοχή, εντείνοντας τα φαινόμενα.





Σχ. 7. Χάρτες επιφανείας για τις 00.00UTC, 12.00UTC της 16^{ης} και 00.00UTC, 06.00UTC της 17^{ης} Ιουλίου 2017 (πηγή : www.wetter3.de)

β. Γεωδυναμικά ύψη και θερμοκρασία στα 500 hPa

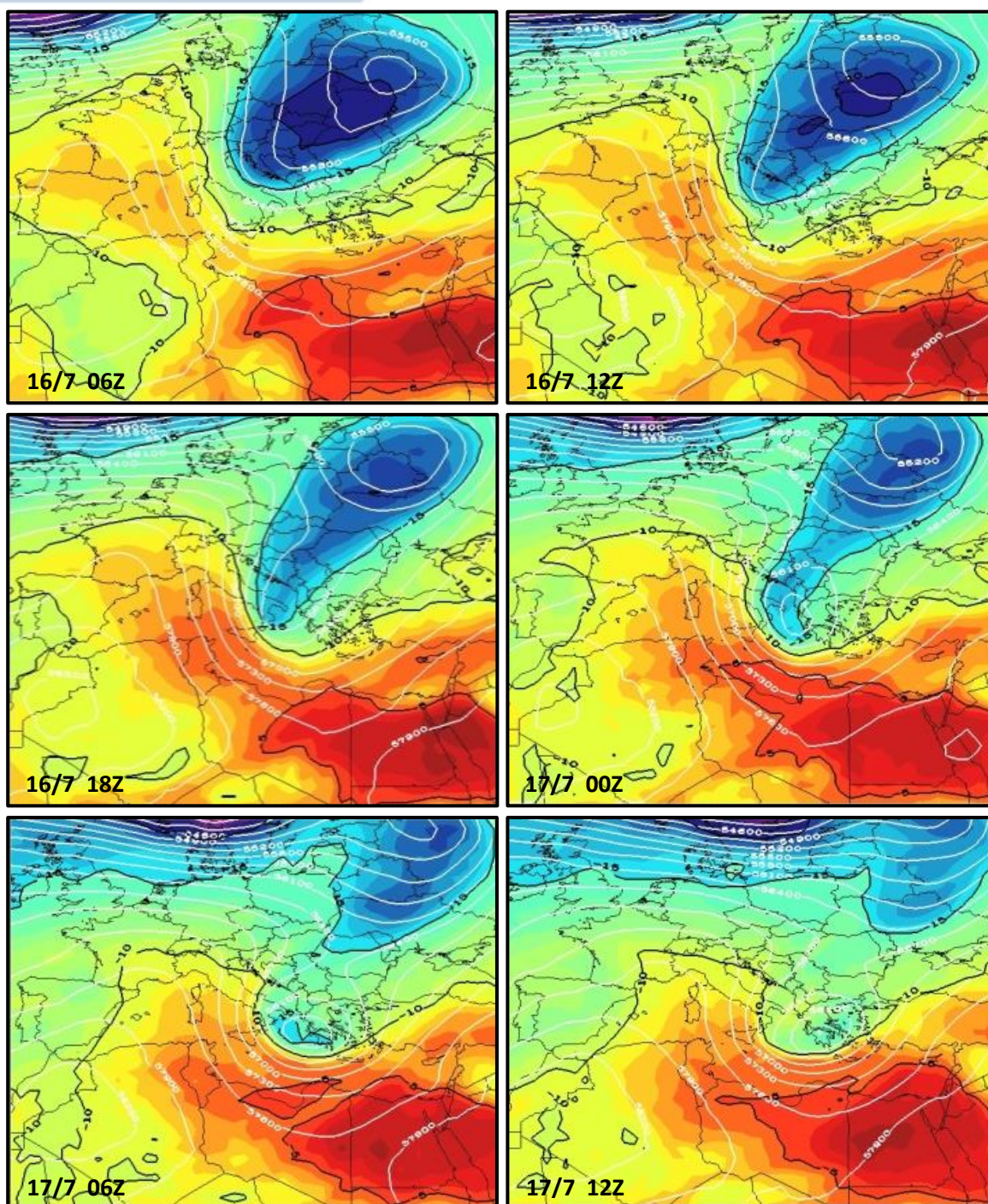
Ξεκινώντας την ανάλυση της ανώτερης τροπόσφαιρας και της στάθμης των 500hPa τις πρώτες πρωινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, παρατηρείται αυλώνας (trough), ο οποίος εκτείνεται πάνω την κεντρική Ευρώπη μέχρι την Ιταλία, με τον ανατολικό τομέα του να εντοπίζεται πάνω από τα Βαλκάνια (Σχ. 8). Η κυκλοφορία στην κεντρική Ευρώπη έχει καταστεί μεσημβρινή, λόγω της ράχης (ridge) που καλύπτει τη δυτική Ευρώπη και του αζορικού αντικυκλώνα (Σχ. 7) ο οποίος πιέζει τις ισοβαρείς, καθώς παρουσιάζει κίνηση προς τα δυτικά της Ευρώπης. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ψυχρές αέριες μάζες να μετακινούνται νοτιότερα και η θερμοκρασία των -15°C να επικρατεί στην ανώτερη τροπόσφαιρα των Βαλκανίων καθ'όλη τη διάρκεια της μέρας.

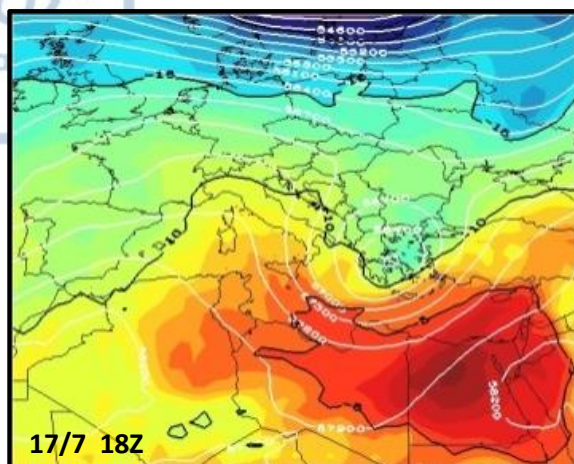
Καθώς εξελίσσεται η μέρα, ο αντικυκλώνας συμπιέζει περεταίρω τις ισοβαρείς στην περιοχή των Βαλκανίων με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του αυλώνα ανατολικότερα. Στις 18.00UTC ολόκληρη η χώρα βρίσκεται σε κυκλωνική κυκλοφορία, με ανέμους να εντοπίζονται ενισχυμένοι στα δυτικά αυτής στο επίπεδο των 500hPa και μια έντονη μεταφορά στροβιλισμού στα ανατολικά της.

Στις 17 Ιουλίου 00.00UTC το σύστημα αποκόπτεται από την κυκλοφορία και το κέντρο των χαμηλών γεωδυναμικών υψών εντοπίζεται στο Ιόνιο, με τιμή να έχει πέσει στα 5580 g.p.m.. Το πεδίο των ανέμων παραμένει ενισχυμένο στα δυτικά του χαμηλού, μαρτυρώντας και τη διάταξη του αεροχειμάρρου. Την ίδια ώρα, το κέντρο της κυκλωνικής κυκλοφορίας στη στάθμη των 850hPa εντοπίζεται ανατολικότερα και πιο συγκεκριμένα πάνω από την Πελοπόννησο (Σχ. 9). Μια τέτοια διάταξη γεωδυναμικών υψών στις ισοβαρικές επιφάνειες των 500hPa και 850hPa χαρακτηρίζει την ατμόσφαιρα ως βαροκλινική.

Τέλος, τις μεσημβρινές ώρες της 17^{ης} καταγράφεται μια ανατολική και λίγο αργότερα βορειοανατολική μετατόπιση του κλειστού χαμηλού. Τις απογευματινές ώρες οι θέσεις των

κέντρων των χαμηλών στις στάθμες των 500hPa και 850hPa έδειξαν ότι το σύστημα πλέον είχε καταστεί σχεδόν βαροτροπικό και παρουσιάζει εξασθένηση.





Σχ. 8. Χάρτες γεωδυναμικών υψών και θερμοκρασίας στο ισοβαρικό επίπεδο των 500hPa, για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Οι μαύρες γραμμές αφορούν θερμοκρασία, με βήμα 5°C. Οι άσπρες γραμμές αφορούν τα γεωδυναμικά ύψη (g.p.d.m.). Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει τη θερμοκρασία (°C)

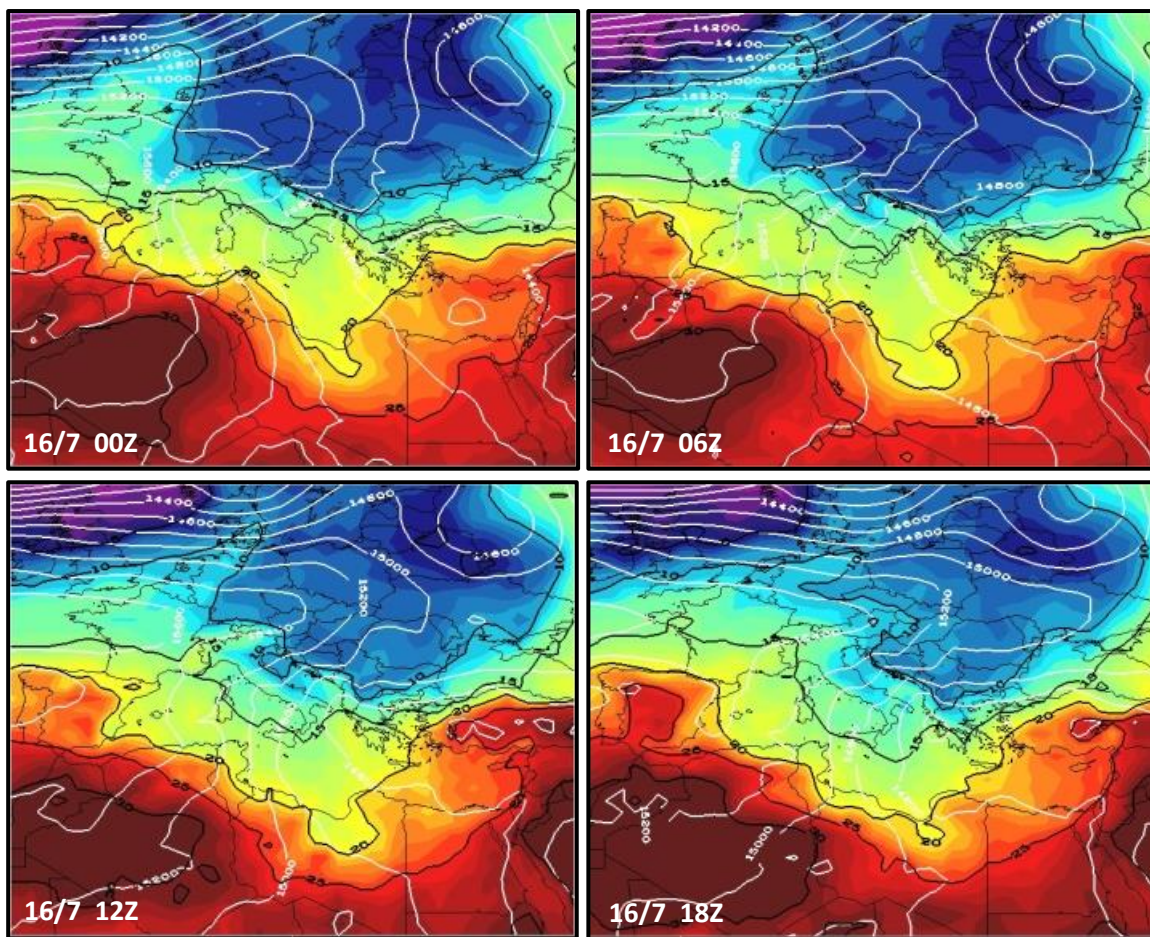
γ. Θερμοκρασία και θερμική μεταφορά στα 850 hPa

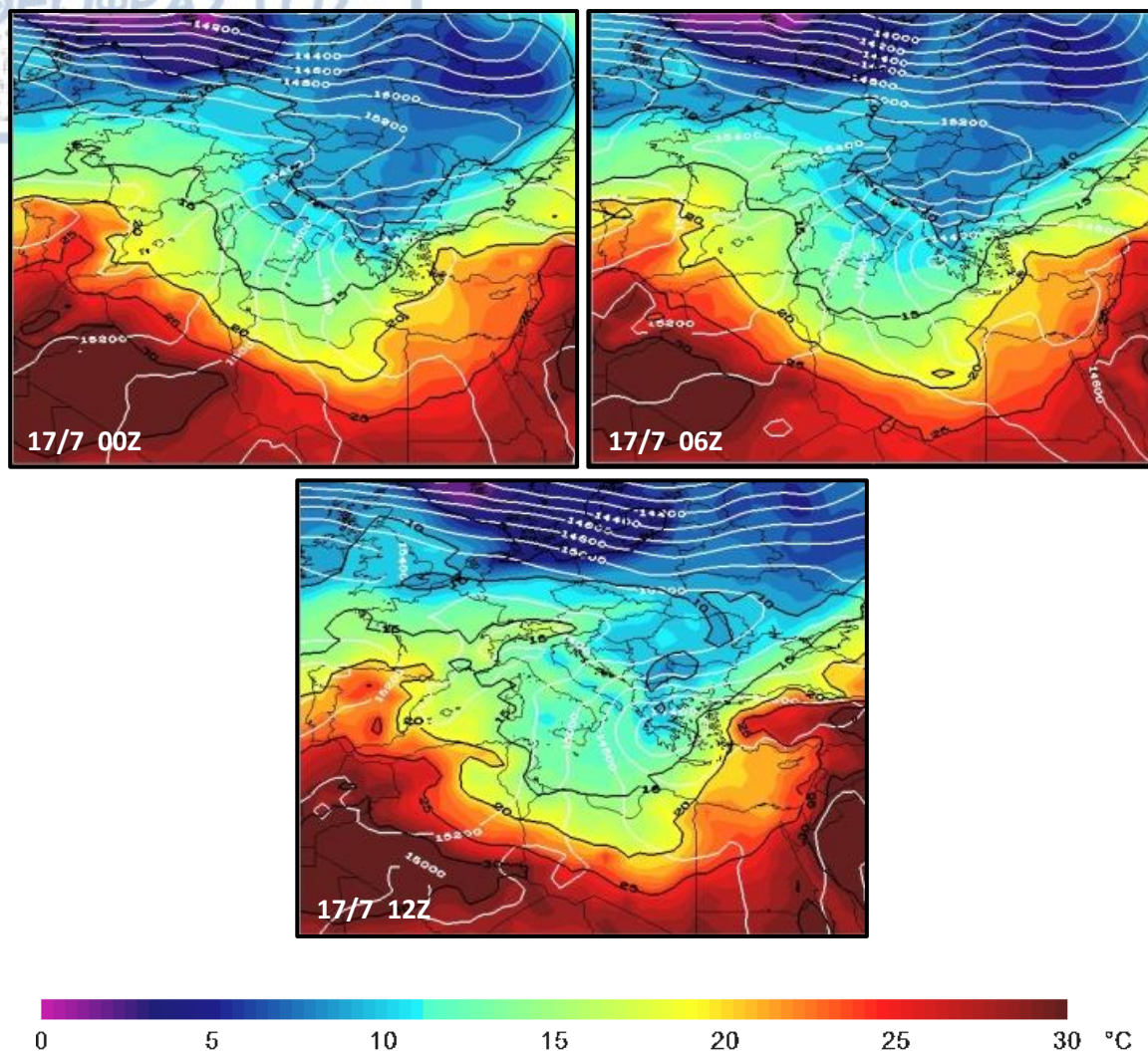
Στις 16 Ιουλίου 00.00UTC ψυχρές αέριες μάζες, σκανδιναβικής προέλευσης, φαίνεται να έχουν κατέλθει και να έχουν κατακλύσει την κεντρική και ανατολική Ευρώπη, φτάνοντας έως και τη Βαλκανική χερσόνησο. Πιο συγκεκριμένα, η ισόθερμη των 10°C εντοπίζεται πάνω από την Ιταλία, τη Βόρεια Μακεδονία και τη Βουλγαρία. Αντιθέτως, χαρακτηριστική είναι και η θερμή εισβολή από τα νότια, εφόσον η θερμοκρασία στην ισοβαρική επιφάνεια των 850hPa φτάνει να αγγίξει τους 20°C πάνω από το Αιγαίο και την Τουρκία. Παρατηρείται, λοιπόν, πως η βαθμίδα στην περιοχή μεταξύ των δυο ισόθερμων είναι ιδιαίτερα ενισχυμένη, στη συγκεκριμένη ισοβαρική επιφάνεια. Έτσι, αποτυπώνεται χαρακτηριστικά η ύπαρξη μετωπικής δραστηριότητας, με το ψυχρό μέτωπο να εντοπίζεται στις 06.00UTC στην περιοχή των Βαλκανίων με άξονα από τα δυτικά παράλια της Μαύρης Θάλασσας έως την περιοχή της νότιας Ιταλίας.

Τις επόμενες ώρες, η ψυχρή μεταφορά συνεχίζεται με κατεύθυνση προς μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, μετατοπίζοντας το μέτωπο, το οποίο έχει πλέον νοτιοανατολική κίνηση. Ταυτόχρονα, η θερμή αέρια μάζα από την περιοχή της Τουρκίας συνέχισε να παρουσιάζει οριζόντια μεταφορά σύμφωνα με τη διεύθυνση του ανέμου στα κατώτερα στρώματα, συναντώντας την ψυχρότερη στα δυτικά τμήματα και ολισθαίνοντας επάνω στη μετωπική επιφάνεια, δίνοντας ένα παχύ νεφικό στρώμα, από το έδαφος έως και το ύψος της τροπόπαυ-

σης. Στις 18.00UTC οι ψυχρές αέριες μάζες αρχίζουν να εκτείνονται σταδιακά μέχρι τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας ενώ παρέμεναν εκεί για τουλάχιστον ένα δωδεκάωρο. Οι θερμοκρασίες στη στάθμη των 850hPa γι' αυτό το διάστημα ήταν στους 10°C στα βόρεια και κεντρικά και 15°C στα νότια της χώρας, αποτυπώνοντας μια αρκετά έντονη θερμοβαθμίδα πάνω από μια σχετικά μικρή περιοχή. Η έντονη αυτή θερμοβαθμίδα αποτελεί ένδειξη επιφανειακής σύγκλισης. Όντως, στην επιφάνεια εντοπίστηκε ενισχυμένη ζώνη επιφανειακών συγκλίσεων στην περιοχή του βορείου Αιγαίου τις πρωινές ώρες της 17^{ης} Ιουλίου.

Συνοψίζοντας, από την ανάλυση των χαρτών των δυο ισοβαρικών επιφανειών, 500hPa και 850hPa προκύπτει πως η πτώση των γεωδυναμικών υψών σε συνδυασμό με την κάθοδο ψυχρών αέριων μαζών, έδωσε φαινόμενα και μεγάλα ύψη υετού στα ηπειρωτικά κυρίως τμήματα της χώρας. Συνυπολογίζοντας το ότι η διαταραχή της ανώτερης τροπόσφαιρας πέρασε πάνω από τη χώρα τις θερμές ώρες, τα φαινόμενα που εντοπιστήκαν στον ηπειρωτικό κορμό ήταν κατά τόπους έντονα.





Σχ. 9. Χάρτες γεωδυναμικών υψών και θερμοκρασίας στο ισοβαρικό επίπεδο των 850hPa, για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Οι μαύρες γραμμές αφορούν θερμοκρασία, με βήμα 5°C. Οι άσπρες γραμμές αφορούν τα γεωδυναμικά ύψη (g.p.d.m.). Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει τη θερμοκρασία (°C)

δ. Αεροχειμάρρος στα 300 hPa

Η διάταξη του αεροχειμάρρου, όπως θα προκύψει από τη δυναμική ανάλυση αργότερα, αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα στη χωρική και χρονική εξέλιξη των φαινομένων της 16^{ης} και 17^{ης} Ιουλίου.

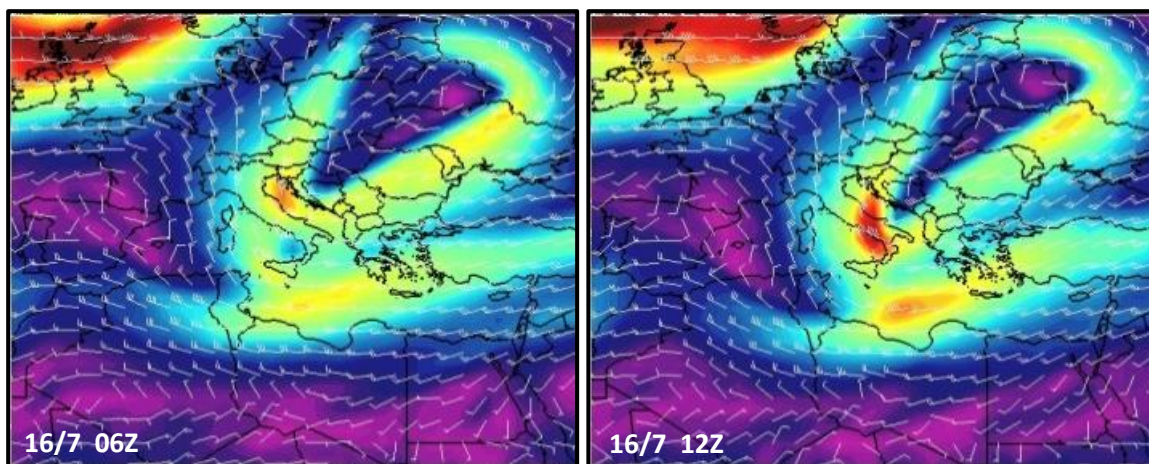
Όπως αποτυπώνεται στο Σχ. 10 στις πρώτες πρωινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, ο αεροχείμαρρος, έχοντας αποκτήσει βόρεια συνιστώσα, είναι σε απολυτή συνέπεια με την κυκλοφορία στα 500hPa, η οποία έχει καταστεί μεσημβρινή. Να σημειωθεί πως αυτού του είδους η κυκλοφορία αφήνει τις υψηλές πιέσεις στα δυτικά του αεροχειμάρρου και επιτρέπει στις ψυχρότερες αέριες μάζες να κατέλθουν από τη βόρεια Ευρώπη στις νοτιότερες περιοχές.

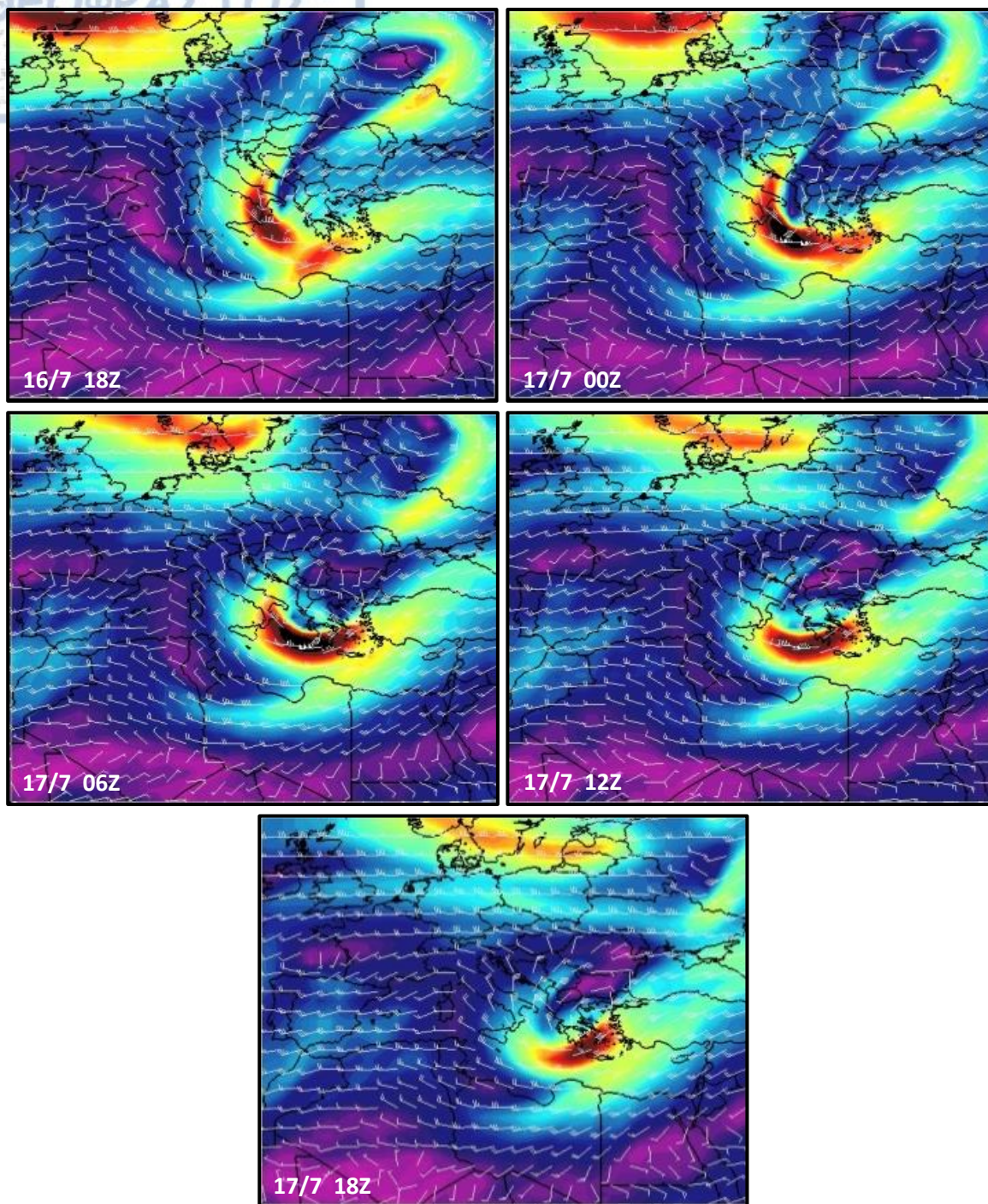
Επίσης, μια τέτοια θέση των μεγίστων του αεροχειμάρρου όπως φαίνεται στις 06.00UTC έως τις 18.00UTC με πορτοκαλί και κόκκινο, δυτικά δηλαδή του αυλώνα, εντείνει την βάθυνση του αυλώνα νοτιότερα, όπως και παρατηρήθηκε στους χάρτες της ισοβαρικής επιφάνειας των 500hPa, ευνοώντας παράλληλα και τις ανοδικές κινήσεις στην αριστερή έξοδο του.

Στις 18.00UTC, λοιπόν, οι ενισχυμένες εντάσεις (jet streak) που εντοπίστηκαν στο δυτικό κλάδο του αεροχειμάρρου, ευνόησαν την εκδήλωση έντονων φαινομένων στην κεντρική-νότια ηπειρωτική χώρα αλλά και στο νότιο Ιόνιο, αφού σύμφωνα με τη θεωρία οι ανοδικές κινήσεις εντοπίζονται στην αριστερή έξοδο και στη δεξιά είσοδο του αεροχειμάρρου, λόγω της απόκλισης αέριων μαζών στα συγκεκριμένα σημεία (Πυθαρούλης, 2017). Το jet streak στη συνέχεια κινήθηκε νοτιοανατολικά αρχικά και έπειτα ανατολικά, μετατοπίζοντας την περιοχή των ανοδικών αντίστοιχα. Την ίδια κατεύθυνση ακολούθησε και η πορεία του MCS.

Αντίστοιχα, τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης} Ιουλίου, η θέση και διάταξη του αεροχειμάρρου, ο οποίος μετακινήθηκε βορειοανατολικότερα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη του αποκομμένου χαμηλού στα 500hPa και την έντονη σύγκλιση ανέμων στην επιφάνεια, ευνόησε τις ανοδικές κινήσεις στο Αιγαίο, όπου και εκδηλώθηκαν έντονα φαινόμενα μέχρι και τις 18.00UTC. Μάλιστα, στις 00.00UTC και 06.00UTC, η ένταση των ανέμων ξεπερνά τα 70m/s, δηλαδή τους 130kts, στην περιοχή του jet streak.

Τέλος, ο αεροχειμάρρος εξασθενεί, αφού έχει φτάσει μέχρι το ανατολικό Αιγαίο και τα παράλια της Τουρκίας στις 00.00UTC της 18^{ης}.





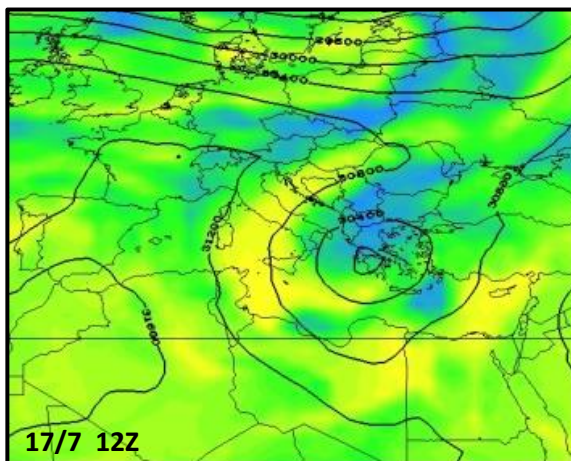
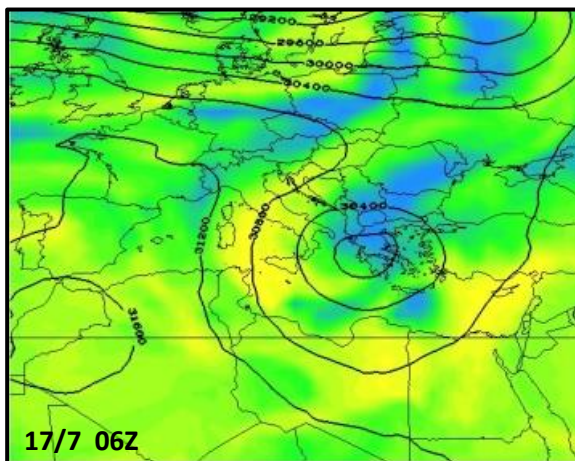
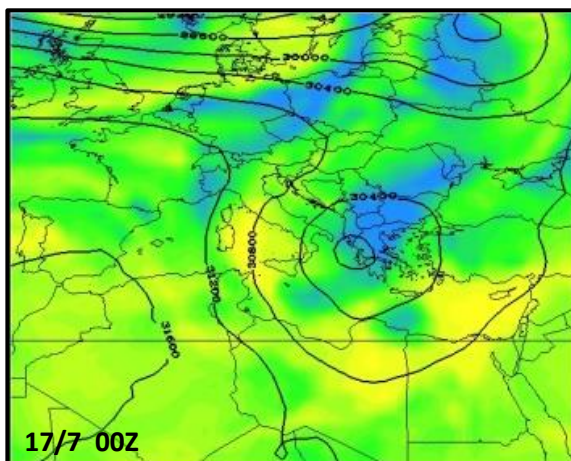
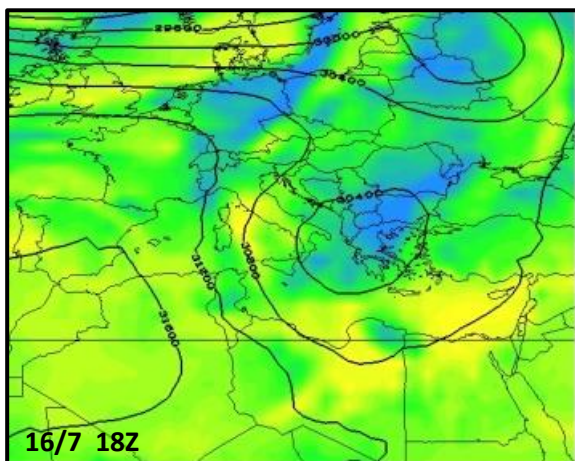
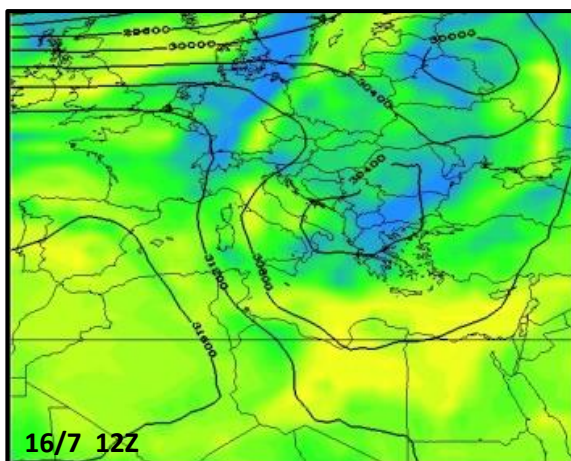
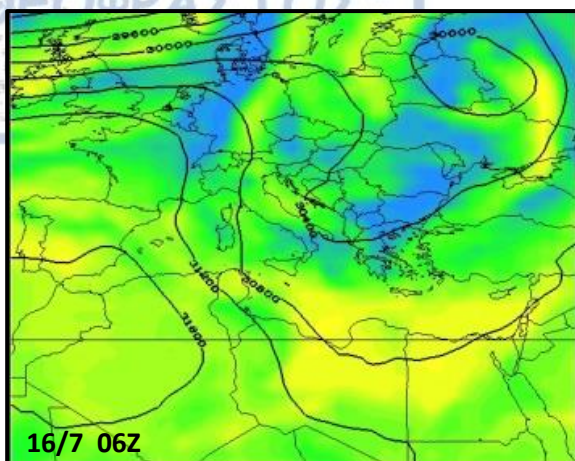
Σχ. 10. Χάρτες έντασης και διεύθυνσης ανέμου στο ισοβαρικό επίπεδο των 300hPa, για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Οι δείκτες ανέμου προσδιορίζουν την ένταση και διεύθυνση του ανέμου. Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει την ένταση του ανέμου

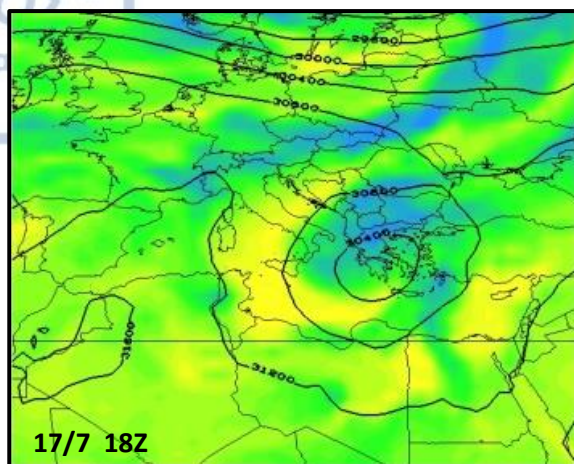
ε. Υγρασία στα 700 hPa

Μεγάλα ποσοστά σχετικής υγρασίας, που φτάνουν μέχρι και πάνω από 80%, εμφανίζονται στην περιοχή χαμηλών πιέσεων στη βαλκανική χερσόνησο, στις 16 Ιουλίου (Σχ. 11). Το επιφανειακό χαμηλό που εντοπίστηκε πάνω από την Τουρκία έπαιξε βασικό ρόλο στη μεταφορά υγρασίας στην περιοχή, καθώς το βορειοανατολικό ρεύμα μετέφερε θερμό αέρα ο οποίος εμπλουτιζόταν με υδρατμούς κατά τη διέλευση του πάνω από το Αιγαίο. Οι ψυχρές αέριες μάζες που κατήλθαν από μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, λειτούργησαν σαν τοίχος και ευνόησαν τον κορεσμένο θερμό αέρα να ανέλθει σε μεγαλύτερα ύψη στην ατμόσφαιρα, ολισθαίνοντας επάνω στη μετωπική επιφάνεια. Εξάλλου, η περιοχή μπροστά από το μέτωπο αποτελεί περιοχή σημαντικών ανοδικών κινήσεων. Συνεπώς, σε συμφωνία με όσα μόλις ειπώθηκαν, υγρασία ποσοστού πάνω από 95% εντοπίζεται παράλληλα της γραμμής του μετώπου στις 12.00UTC, το οποίο εκτείνονταν από τη Μαύρη θάλασσα, διέσχιζε τις νότιες χώρες των Βαλκανίων και κατέληγε στη νότια Ιταλία. Επακόλουθο όλων αυτών αποτέλεσε η δημιουργία εκτεταμένων νεφικών στρωμάτων τόσο σε οριζόντια έκταση όσο και κατακόρυφα και το οποίο θα αποτυπωθεί αργότερα στις δορυφορικές εικόνες.

Καθώς η περιοχή των ανοδικών ρευμάτων μετατοπίζεται μέσα στη μέρα (16 Ιουλίου) νοτιότερα, η ίδια εξέλιξη διαπιστώνεται και για την υγρασία, η οποία φαίνεται να αυξάνει σταδιακά στο νότιο ηπειρωτικό κορμό, στην Πελοπόννησο έως και το νότιο Ιόνιο αργά της 16^{ης} και τις πρώτες ώρες της 17^{ης}, οι οποίες αποτέλεσαν τις περιοχές των ανοδικών κινήσεων για εκείνες τις ώρες. Εξάλλου, υγρασία στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας σε συνδυασμό με κάποιο μηχανισμό που μπορεί να πυροδοτήσει την ανύψωση της κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η διάταξη του αεροχειμάρρου, η απόκλιση αέριων μαζών στην ανώτερη τροπόσφαιρα και η επιφανειακή σύγκλιση, αποτελούν σημαντικοί παράγοντες για την ανάπτυξη μεγάλων νεφικών συστημάτων. Αργότερα όμως, καθώς η περιοχή σύγκλισης μετακινείται στο βορειοδυτικό Αιγαίο, η περισσότερη υγρασία εντοπίζεται στη βόρεια Ελλάδα, όπου και έχει μετακινηθεί και το σύστημα.

Τις απογευματινές ώρες της 17^{ης}, οπότε και το σύστημα έχει διαλυθεί, η υγρασία πέφτει σε ποσοστό κάτω από 80% στην ευρύτερη περιοχή της χώρας, αφήνοντας κάποια κατάλοιπα στη βόρεια Ελλάδα και κυρίως στη Θράκη, τα οποία όμως και αυτά σταδιακά εξαφανίζονται.





Σχ. 11. Χάρτες ποσοστών υγρασίας στον ισοβαρικό επίπεδο των 700hPa, για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Οι μαύρες γραμμές αφορούν τα γεωδυναμικά ύψη (g.p.d.m.) στο επίπεδο των 700hPa

στ. Δυναμικός Στροβιλισμός στα 300hPa

Μελετώντας τον χάρτη του Σχ. 12, που απεικονίζει το δυναμικό στροβιλισμό στη στάθμη των 300hPa, παρατηρείται έντονη χρωματική διαβάθμιση όπου οι τιμές είναι υψηλές στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Υψηλές τιμές του δυναμικού στροβιλισμού σε αυτό το επίπεδο υπονοούν την πτώση της τροπόπαυσης σε χαμηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας σε εκείνη την περιοχή και την αναδίπλωση της μέσω του μηχανισμού μεταφοράς στρατοσφαιρικού αέρα προς τη μέση τροπόσφαιρα, κατά μήκος του άξονα του αεροχειμάρρου.

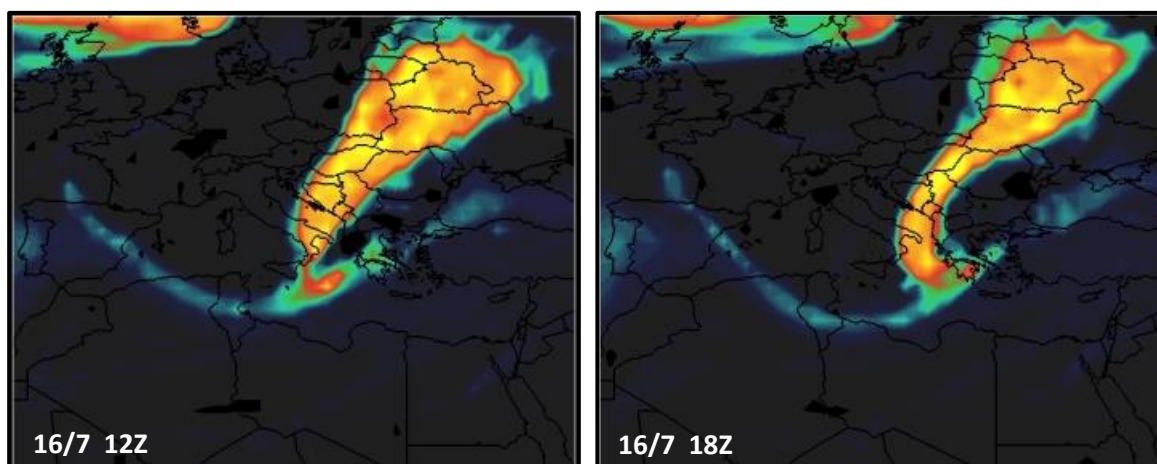
Έτσι, λοιπόν, στις 12.00UTC στις 16 Ιουλίου και ενώ το MCS βρίσκεται στην ακμή του πάνω από την Ελλάδα, η αναδίπλωση της τροπόπαυσης αποτυπώνεται στη βορειοανατολική Ευρώπη, πάνω από τα δυτικά και κεντρικά Βαλκάνια και νότια της Ιταλίας, οι περιοχές, όμως, ενδιαφέροντος που η εισβολή επηρεάζει τη δυναμική του συστήματος που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία είναι οι δυο τελευταίες. Η στρατοσφαιρική, λοιπόν, εισβολή, που συνοδεύεται από ξηρό και ψυχρό αέρα ο οποίος εισχωρεί στην ανώτερη τροπόσφαιρα, συντελεί στο να ενταθεί η αστάθεια. Σύμφωνα με τη θεωρία, στην περιοχή μπροστά από την ανωμαλία της τροπόπαυσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση ανατολικά της τροπόπαυσης, δηλαδή πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας και βορειότερα, υφίστανται ανοδικά ρεύματα. Τα ανοδικά ρεύματα είναι ικανά να παρασύρουν υγρασία υψηλότερα και συνεπώς ο αέρας να καταστεί υγρότερος λόγω διαβατικής συμπίκνωσης (Φείδας, 2017). Συνεπώς, συγκρίνοντας με τους χάρτες υγρασίας στα 700hPa, ακριβώς μπροστά από την ανωμαλία της τροπόπαυσης η υγρασία ξεπερνά το 95% σε εκείνο το επίπεδο. Έτσι αποδεικνύεται και η

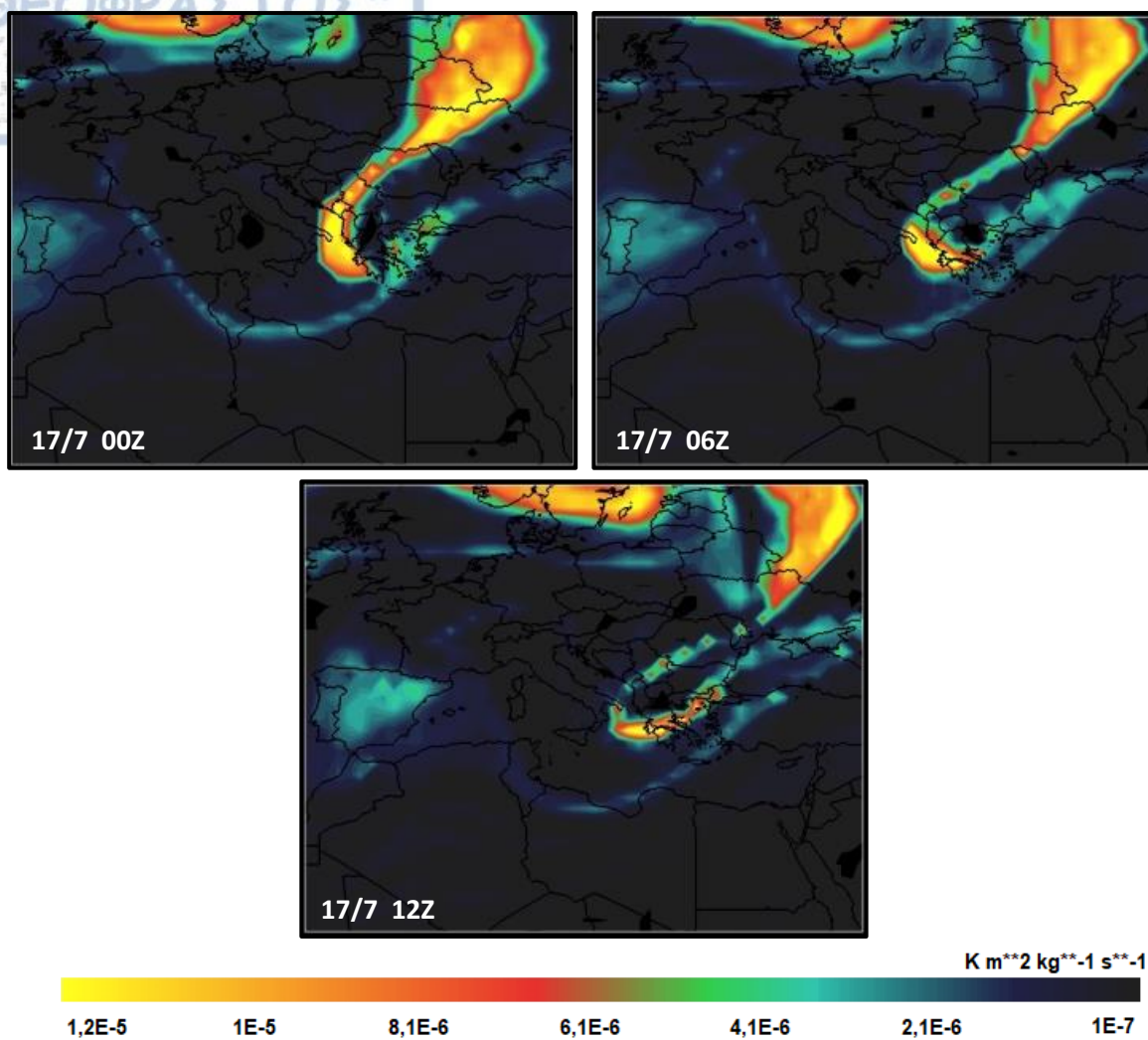
δυναμική αστάθεια της ατμόσφαιρας, καθώς ιδανική συνθήκη είναι η ύπαρξη υγρής ατμόσφαιρας χαμηλά και ξηρής ψυχρής ψηλά.

Η μελέτη των WV δορυφορικών εικόνων είναι άλλη μια παράμετρος με την οποία μπορεί να εντοπιστεί η κάθοδος ξηρού ψυχρού στρατοσφαιρικού αέρα. Όπως θα σχολιαστεί και παρακάτω, στο τεφίγραμμα των 12.00UTC για την πόλη Bridizi της Ιταλίας, η τροπόπαυση έχει φτάσει στο ύψος των 320hPa, επιβεβαιώνοντας τη στρατοσφαιρική εισβολή για εκείνο το χρονικό διάστημα, ενώ ακόμα πιο έντονη είναι στις 00.00UTC, όποτε και η τροπόπαυση εντοπίζεται στα 380hPa, ενώ ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας έχει εισβάλει μέχρι και τα 680hPa.

Στις 00.00UTC της 17^{ης} Ιουλίου η χαμηλωμένη δυναμική τροπόπαυση εντοπίζεται ανατολικότερα, πάνω από το Ιόνιο μέχρι και τα παράλια της δυτικής Ελλάδας. Και πάλι, συγκρίνοντας τη θέση και διάταξη του αεροχειμάρρου και συγκεκριμένα τη θέση της αριστερής εξόδου, με τον ανατολικό τομέα της δυναμικής τροπόπαυσης προκύπτει ότι οι περιοχές με τα ανοδικά ρεύματα συμπίπτουν, που πρόκειται για την ευρύτερη περιοχή της νότιας Ελλάδας. Τόσο στο τεφίγραμμα της Θεσσαλονίκης, όσο και στις Αθηνάς ακόμα περισσότερο, για τις 12.00UTC της 16^{ης} και για τις 00.00UTC της 17^{ης}, αποτυπώνεται ξεκάθαρα η στρατοσφαιρική εισβολή και η πτώση της τροπόπαυσης. Τέλος, πίσω-δυτικά της δυναμικής τροπόπαυσης πραγματοποιούνται καθοδικές κινήσεις. Στις δορυφορικές εικόνες για τις 00.00UTC είναι ξεκάθαρη η ανέφελη ατμόσφαιρα πάνω από την Ιταλία εκείνη την ώρα.

Αργότερα, καθώς ολόκληρο το σύστημα μετατοπίζεται ανατολικότερα, το ίδιο διαπιστώνεται και για την περιοχή των υψηλών τιμών δυναμικού στροβιλισμού. Στις 06.00UTC επηρεάζεται κυρίως το βόρειο Αιγαίο και η Χαλκιδική, ενώ η ύπαρξη των μεγάλων τιμών δυναμικού στροβιλισμού πάνω και δυτικά του ηπειρωτικού κορμού της χώρας σηματοδοτεί και το τέλος των φαινομένων σε εκείνη την περιοχή. Έτσι, διαπιστώνεται άλλος ένας λόγος ενίσχυσης των ανοδικών ρευμάτων στην περιοχή του Αιγαίου, πέρα από την ύπαρξη του μετώπου και την επίδραση της διάταξης του αεροχειμάρρου, που είναι η πτώση της επιφάνειας της δυναμικής τροπόπαυσης και η θέση στην οποία βρίσκεται ο ανατολικός της κλάδος.

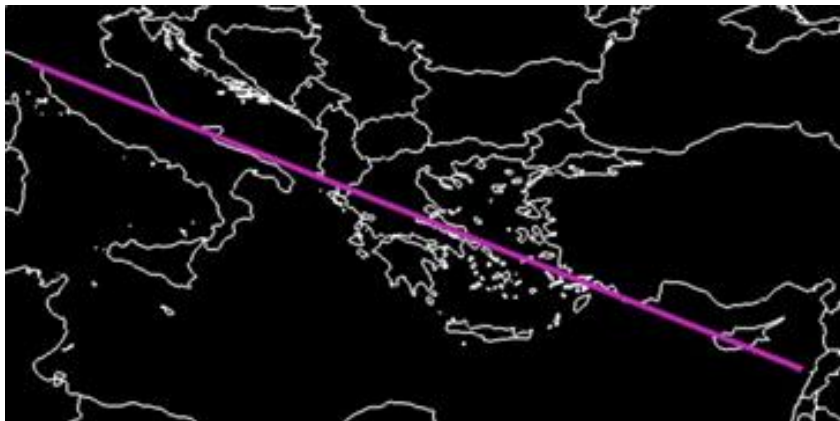




Σχ. 12. Χάρτες δυναμικού στροβιλισμού στο ισοβαρικό επίπεδο των 300hPa, για τις 16 και 17 Ιουλίου 2017

3.3 Κατακόρυφες τομές

Στην καλύτερη κατανόηση της κατάστασης κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα θα συντελέσει η ανάλυση κατακόρυφων τομών στις οποίες απεικονίζονται τα πεδία : δυναμική τροπόπαυση σε παράθεση με την ένταση και διεύθυνση του ανέμου, σχετική υγρασία και σύγκλιση. Η τομή εκτείνεται από τα βορειοδυτικά της Ιταλίας, διέρχεται από την πολη Bridizi, κοντά από τις Σποράδες και τη Ρόδο και φτάνει έως τις παράκτιες περιοχές της Συρίας στην ανατολική Μεσόγειο (Σχ. 13).



Σχ.13. Απεικόνιση της θέσης της κατακόρυφης τομής

α. Δυναμική Τροπόπαυση

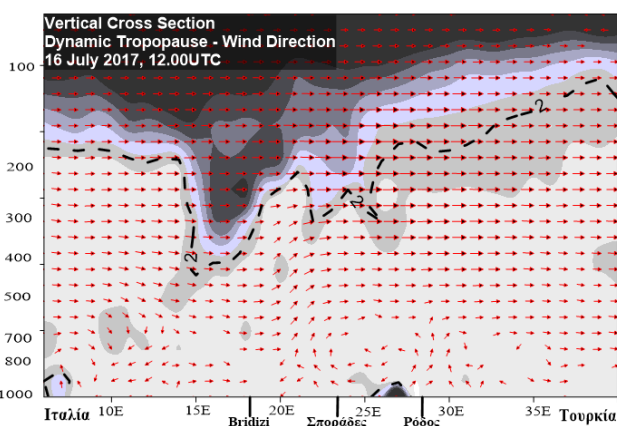
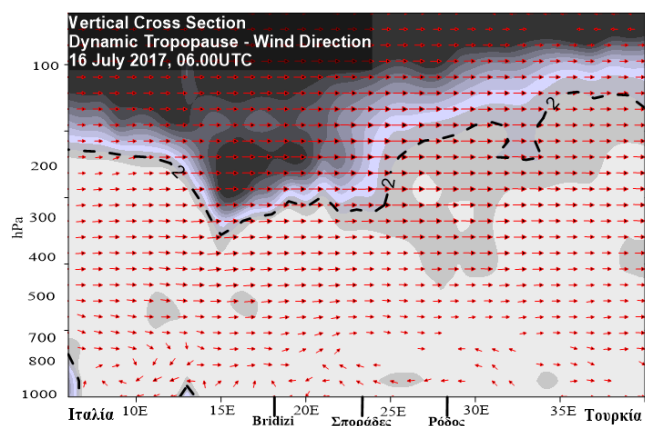
Στις κατακόρυφες τομές του Σχ. 14 αποτυπώνεται η θέση της δυναμικής τροπόπαυσης, δηλαδή της επιφάνειας των 2PVU, σε παράθεση με τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου για το χρονικό διάστημα που εξελίσσεται το σύστημα.

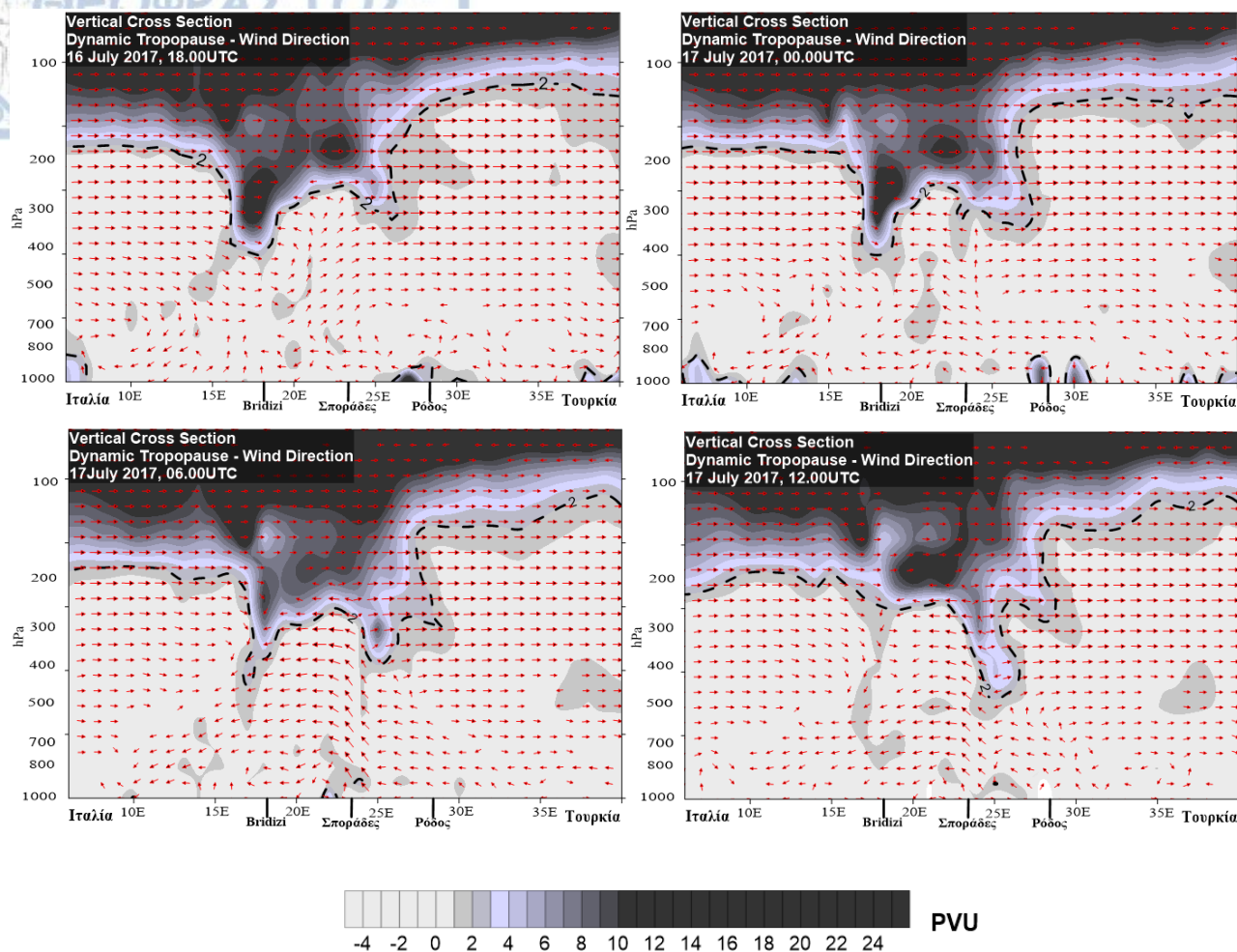
Ξεκινώντας από τις 16 Ιουλίου, στις 06.00UTC δεν παρατηρείται ιδιαίτερη βάθυνση της δυναμικής τροπόπαυσης, παρά μόνο πάνω από το Bridizi και γενικότερα πάνω από το νότιο άκρο της Ιταλίας και το Ιόνιο, όπου έχει αρχίσει να κατέρχεται ελαφρώς και εντοπίζεται περίπου στο ύψος των 300hPa. Με το πέρασμα της ώρας, στις 12.00UTC και 18.00UTC η επιφάνεια των 2PVU έχει κατέλθει σημαντικά, στα 400hPa με 420hPa, παρασέρνοντας στρατοσφαιρικό αέρα χαμηλότερα στην ατμόσφαιρα, πάνω από την ίδια περιοχή. Πρόκειται για την ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, μπροστά από την οποία, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, οι ανοδικές κινήσεις είναι έντονες προκαλώντας αστάθεια στην ατμόσφαιρα και, σε συνδυασμό με υγρασία, έντονα φαινόμενα. Πράγματι, στο Σχ.14 διαπιστώνονται ανοδικά ρεύματα αέρα πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας, όπου και εντοπίζονται τα εντονότερα φαινόμενα εκείνες τις ώρες. Αξίζει να σημειωθεί ότι πάνω

από την περιοχή της κακοκαιρίας η τροπόπαυση εντοπίζεται αρκετά ψηλά, συγκεκριμένα εκτείνεται έως τα 250hPa, γεγονός που επιτρέπει τα νέφη να επεκταθούν σε ύψος, ενώ αντίθετα, εκεί όπου η τροπόπαυση έχει φτάσει χαμηλά δεν ευνοούνται οι υψηλές κορυφές των νεφών. Όπως θα διαπιστωθεί και αργότερα στην ανάλυση των δορυφορικών εικόνων, όντως στην περιοχή της νότιας Ιταλίας και το Ιόνιο (γύρω στις 19^ο γεωγραφικό μήκος), τα νέφη δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένα κατακόρυφα, σε αντίθεση με αυτά που σχηματίζονται και αναπτύσσονται πάνω από την κεντρική Ελλάδα.

Μέχρι και τις βραδινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου παρατηρείται αντίστοιχη εικόνα της δυναμικής τροπόπαυσης, με μετατόπιση, όμως, του συστήματος προς τα ανατολικά και τις ανοδικές κινήσεις να εντοπίζονται πλέον πάνω από το Αιγαίο. Ειδικότερα στις 00.00UTC της 17^{ης} χαρακτηριστική είναι η αποτύπωση των έντονων ανοδικών κινήσεων στην περιοχή του βορειοδυτικού Αιγαίου, καθώς και η έντονη σύγκλιση χαμηλά στην τροπόσφαιρα και η έντονη απόκλιση στο ύψος της τροπόπαυσης. Αντιθέτως, πάνω από τη δυτική Ελλάδα επικρατούν καθοδικές κινήσεις. Τέλος, πάρα τη ραγδαιότητα των φαινομένων στη Χαλκιδική και τις Σποράδες τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης}, τα νέφη δεν απεικονίζονται να έχουν αποκτήσει το ύψος των νεφικών πυρήνων που δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν στις 16 Ιουλίου πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό. Και σε αυτό επίσης ευθύνεται το χαμηλό σχετικά ύψος της τροπόπαυσης, στα 300hPa.

Στις 12.00UTC η δυναμική τροπόπαυση έχει αρχίσει να επιστρέφει στο ύψος των 250hPa πάνω από τον ευρύτερο ελλαδικό χώρο, γεγονός που σηματοδοτεί και τη λήξη των φαινομένων στο βορειοδυτικό Αιγαίο, καθώς παύουν να υφίστανται ανοδικές κινήσεις. Μόνο πάνω από το βορειοανατολικό Αιγαίο παρατηρείται πτώση της δυναμικής τροπόπαυσης που συνοδεύεται από στρατοσφαιρική εισβολή, καθώς και ασθενείς ανοδικές κινήσεις στα ανατολικά της χώρας και στην περιοχή της Λήμνου, που αποτέλεσε και την τελευταία περιοχή που επηρεάστηκε από το καταιγιδοφόρο σύστημα.





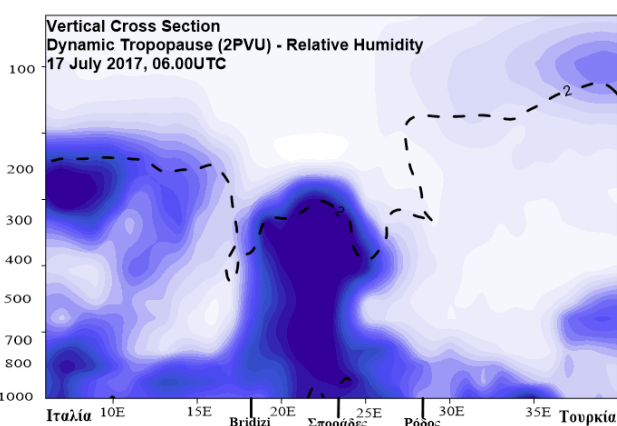
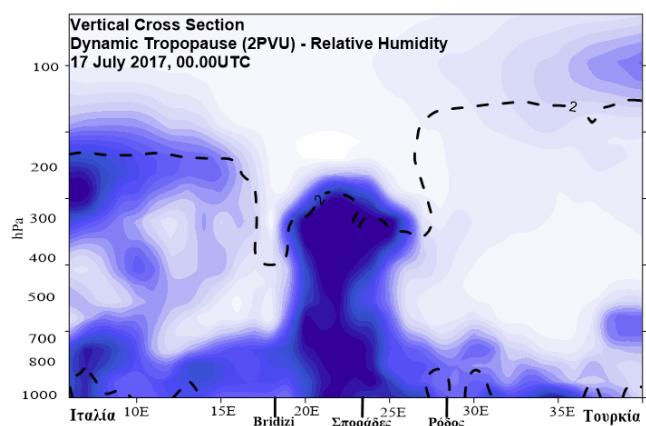
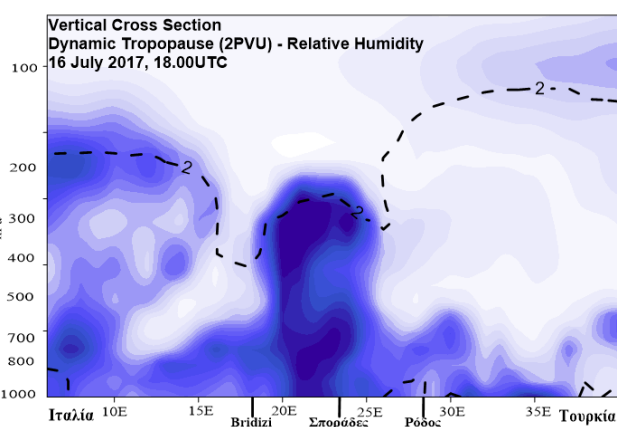
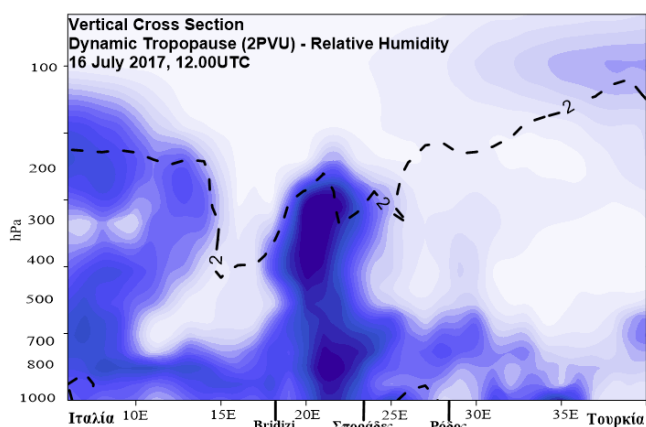
Σχ. 14. Απεικόνιση του δυναμικού στροβιλισμού και της διεύθυνσης του ανέμου σε κατακόρυφες τομές. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αφορά την δυναμική τροπόπαυση των 2PVU

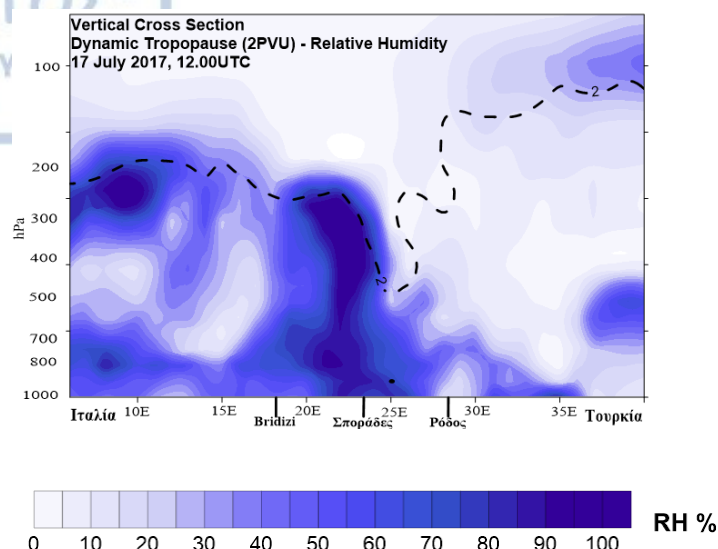
β. Σχετική Υγρασία

Στην κατακόρυφη τομή που απεικονίζει τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, στις 12.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου (Σχ.15), μεγάλα ποσά υγρασίας εντοπίζονται σε ολόκληρη την ατμόσφαιρα από τα παρεδάφια μέχρι και λίγο πάνω από το ύψος της τροπόπαυσης, από τα δυτικά παράκτια τμήματα της χώρας έως και πάνω από το δυτικό Αιγαίο, με μέγιστο πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό, όπου και εξελίσσεται το σύστημα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Χαρακτηριστική είναι και η εισβολή ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα δυτικά της πόλης Bridizi, μέχρι περίπου το επίπεδο των 700hPa, που σε συνδυασμό με την ύπαρξη υγρασίας στα χαμηλότερα επίπεδα, έχει επιδράσει θετικά στην εμφάνιση δυναμικής αστάθειας στην ατμόσφαιρα, καθώς οι παραπάνω συνθήκες αποτελούν ιδανικές. Η αστάθεια αυτή, σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες, πυροδοτούν την ανάπτυξη των ανοδικών κινήσεων ανατολικά από την περιοχή που εντοπίζε-

ται η στρατοσφαιρική εισβολή, οι οποίες τείνουν να ενισχύσουν το σύστημα, μεταφέροντας υγρασία από τα χαμηλά στα υψηλότερα στρώματα και αυξάνοντας τα ποσοστά υγρασίας καθ' ύψος, το οποίο αποτυπώνεται καλύτερα στις 18.00UTC, οπότε και το περιβάλλον παρατηρείται να γίνεται πιο υγρό.

Το σύστημα τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης} Ιουλίου μετακινείται βορειοανατολικότερα, πάνω από το βορειοδυτικό Αιγαίο, τη Χαλκιδική και τις Σποράδες. Πρόκειται και για το χρονικό διάστημα, κυρίως στις 06.00UTC, και την περιοχή στην οποία η σύγκλιση στην κατώτερη τροπόσφαιρα είναι στο μέγιστο, οπότε και τα ανοδικά ρεύματα εξίσου έντονα, ικανά να φτάσουν μεγάλα ποσά σχετικής υγρασίας, πάνω από 95% σε ποσοστό, στο ύψος της τροπόπαυσης και λίγο πιο πάνω. Υγρασία πάνω από το επίπεδο της τροπόπαυσης υπονοεί την ύπαρξη προεξεχουσών κορυφών, το οποίο επιβεβαιώνεται και στις σχετικές δορυφορικές εικόνες. Τέλος, το σύστημα αρχίζει να εξασθενεί έχοντας δώσει μεγάλα ποσά υετού στην περιοχή του βορειοδυτικού Αιγαίου, ενώ στην ανώτερη τροπόσφαιρα παραμένουν κάποια 'κατάλοιπα' υγρασίας, τα οποία έδωσαν τις τελευταίες έντονες βροχοπτώσεις στο βορειοανατολικό Αιγαίο λίγο μετά τις 12.00UTC.





Σχ. 15. Απεικόνιση των ποσοστών υγρασίας σε κατακόρυφες τομές

γ. Σύγκλιση

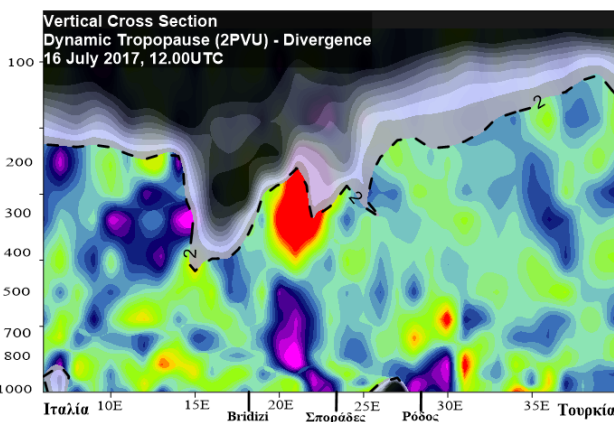
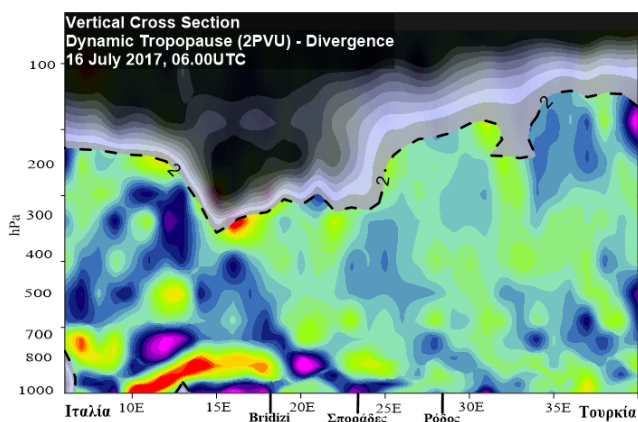
Στις κατακόρυφες τομές του Σχ. 16 απεικονίζονται περιοχές στις οποίες ο άνεμος παρουσιάζει σύγκλιση (αρνητικές τιμές) ή απόκλιση (θετικές τιμές). Στις 06.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου, οπότε και το σύστημα δεν έχει μετατοπιστεί και αναπτυχθεί ακόμα πάνω από τον ελλαδικό χώρο αλλά επηρεάζει τη νότια Ιταλία και τη Βαλκανική χερσόνησο, επικρατούν συνθήκες ασθενής σύγκλισης πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό, γύρω στα 800hPa που κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στους ορεινούς όγκους της Πίνδου, ενώ στην υπερκείμενη ατμόσφαιρα οι συνθήκες προσεγγίζουν μια ουδέτερη κατάσταση.

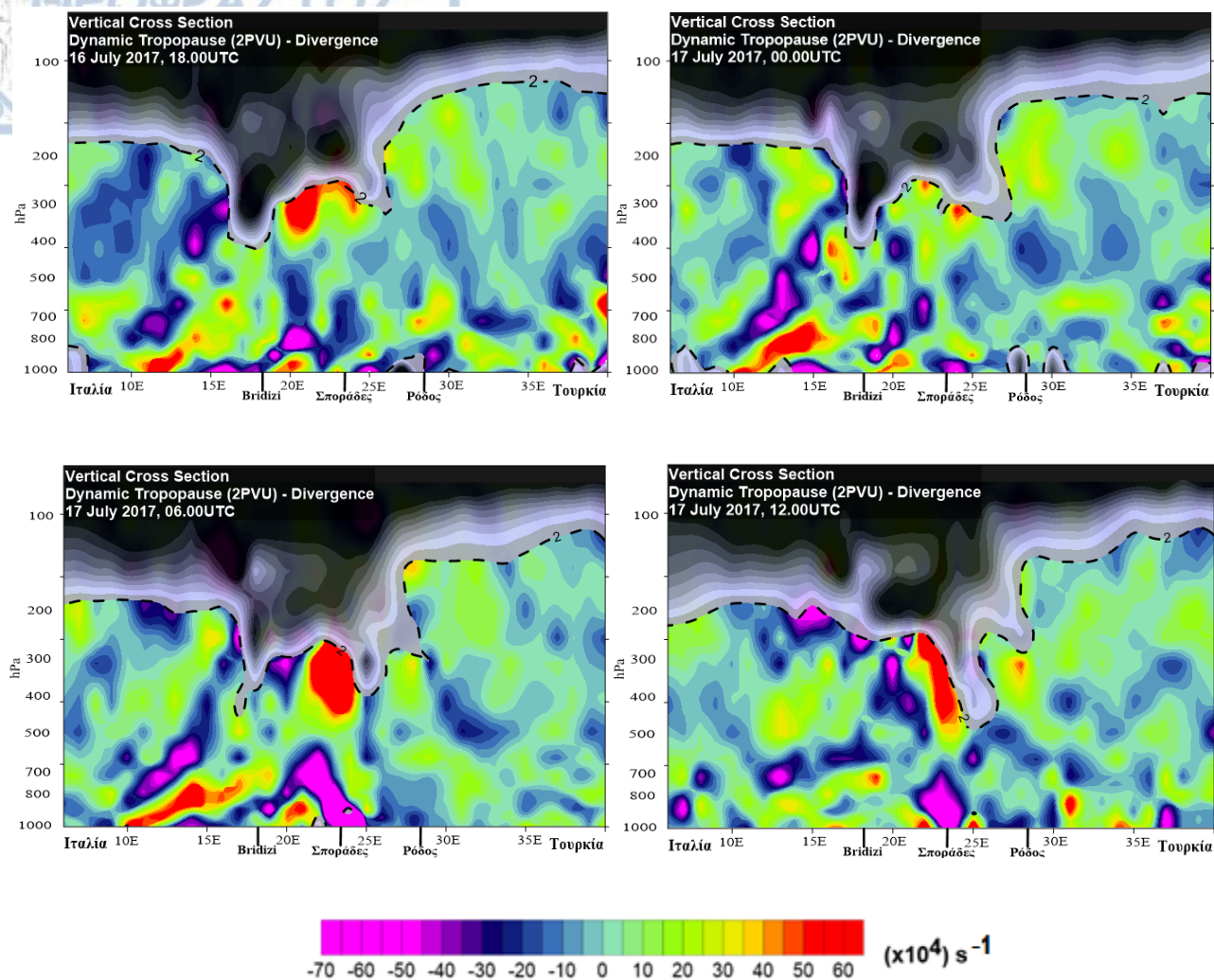
Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η κατάσταση που επικρατεί στις 12.00UTC, καθώς η σύγκλιση έχει επεκταθεί από την επιφάνεια μέχρι το ύψος της μέσης τροπόσφαιρας, που αποτελεί και το επίπεδο μηδενικής απόκλισης, ενώ πάνω από τα 400hPa εμφανίζεται έντονη η απόκλιση, η οποία αντισταθμίζει την υποκείμενη σύγκλιση. Η κατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ανοδικών ρευμάτων στην περιοχή όπου εξελίσσεται το σύστημα εκείνο το διάστημα, κατά μήκος του ηπειρωτικού κορμού. Πέραν, όμως, αυτής της κατάστασης, στην ύπαρξη ανοδικών ρευμάτων συντελεί και η ανωμαλία της τροπόπαυσης που τοποθετείται δυτικά των ανοδικών. Παρ' ολ' αυτά, λόγω της έντονης απόκλισης από τα 400hPa και πάνω, οι κορυφές των νεφών εκείνη τη χρονική στιγμή πάνω από τη Θεσσαλία περιορίζονται μέχρι τη στάθμη των 400hPa, καθώς η κατακόρυφη τομή δεν διατρέχει την περιοχή με τις μεγαλύτερες αναπτύξεις που εκείνη τη στιγμή εντοπίζονται στη βορειοδυτική Μακεδονία, αλλά βρίσκεται λίγο νοτιότερα.

Αργότερα, στις 18.00UTC, η έντονη σύγκλιση υποχωρεί σε χαμηλότερα ύψη και αντίστοιχα η απόκλιση προς μεγαλύτερα ύψη, ενώ από τα 750hPa έως τα 400hPa, επικρατεί ζώνη σύγκλισης η οποία εμφανίζεται να είναι ασθενής. Συνεπώς, οι ανοδικές κινήσεις παραμένουν ισχυρές και οι συνθήκες ευνοϊκές ώστε να επιστρέψουν στα νέφη να αναπτυχθούν ακόμα περισσότερο καθ' ύψος, στην περιοχή της Θεσσαλίας και νοτιότερα πάνω από τη Στερεά Ελλάδα, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις δορυφορικές εικόνες. Παράλληλα, συνθήκες ασθενής απόκλισης λαμβάνουν χώρα πάνω από το Ιόνιο και τη νότια Ιταλία σε ολόκληρη την ατμόσφαιρα, γεγονός που πιστοποιεί την έλλειψη νεφικών πυρήνων στην περιοχή.

Στις 00.00UTC, η απόκλιση έχει εξασθενήσει αισθητά πάνω από τον κεντρικό κορμό της χώρας, το ίδιο και η σύγκλιση χαμηλότερα, σε μικρότερο όμως βαθμό. Εντύπωση, όμως, προκαλεί η ζώνη επιφανειακών συγκλίσεων, έως τη στάθμη των 550UTC, στην περιοχή ανατολικά των Σποράδων στις 06.00UTC, καθώς παίρνει αρκετά υψηλές τιμές. Πρόκειται για την περιοχή με την εντονότερη σύγκλιση καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του MCS. Αποτέλεσμα, επίσης, μια βασική αιτία ενίσχυσης των ανοδικών κινήσεων που συντέλεσαν στην ραγδαιότητα των καταιγίδων σε εκείνη την περιοχή. Η σύγκλιση και κατ' επέκταση οι ανοδικές κινήσεις αποτέλεσαν απόρροια της ανολίσθησης των θερμών αέριων μαζών, που πήγαζαν από την περιοχή της νότιας Τουρκίας, πάνω στην μετωπική επιφάνεια, δίνοντας ένα εκτεταμένο νεφικό στρώμα από τα παρεδάρια στρώματα έως την τροπόπαυση στα 250hPa στο βορειοδυτικό Αιγαίο. Η απόκλιση υψηλά αποτέλεσε ασθενέστερη σε σχέση με την ένταση της επιφανειακής σύγκλισης.

Τέλος, έχοντας εξασθενήσει και υποχωρήσει χαμηλότερα στα 750hPa η ζώνη σύγκλισης εντοπίζεται να έχει μετατοπιστεί ανατολικότερα, πάνω από το βορειοανατολικό Αιγαίο, στις 12.00UTC. Πάνω από τα 500hPa ως αντισταθμιστικός παράγοντας λειτουργεί η απόκλιση. Οι παραπάνω συνθήκες, σε συνδυασμό με την χαμηλωμένη τροπόπαυση ανατολικά αυτών, δικαιολογούν τους εξασθενημένους πυρήνες καταιγίδων, πάνω από την περιοχή της Λήμνου, του υπό διάλυση συστήματος.





Σχ. 16. Απεικόνιση των περιοχών σύγκλισης και απόκλισης του ανέμου σε κατακόρυφες τομές

3.4 Τεφίγραμμα

Στο παρακάτω κεφάλαιο αναλύονται τα διαθέσιμα τεφιγράμματα από ραδιοβολίσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κοντά στις περιοχές όπου δημιουργήθηκε, αναπτύχθηκε και διαλύθηκε το MSC, ώστε να υπάρχει μια γενικότερη εικόνα της δομής της ατμόσφαιρας για τις χρονικές στιγμές ενδιαφέροντος. Επιπρόσθετα, εξετάζονται δείκτες αστάθειας της ατμόσφαιρας, για τους οποίους οι τιμές και τα χαρακτηριστικά ερμηνεύονται παρακάτω. Τόσο τα τεφιγράμματα όσο και οι δείκτες αστάθειας υπολογίστηκαν και διατέθηκαν από το πανεπιστήμιο του Wyoming.

Η χρήση και ανάλυση ενός τεφιγράμματος επιτρέπει την αξιολόγηση της ευστάθειας - αστάθειας στα διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας, την αναγνώριση διαφορετικών αέριων μαζών, την υγρασία του κάθε στρώματος και κατ' επέκταση την ύπαρξη ή μη νεφών και του ύψους μέχρι το οποίο εκτείνονται.

- **Δείκτης Showalter (SI)**

Ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη στάθμη των 500hPa και της θερμοκρασίας δείγματος αέρα που ανυψώνεται από τη στάθμη των 850hPa μέχρι τη στάθμη των 500hPa. Το δείγμα ανυψώνεται από τα 850 hPa με την ξηρή αδιαβατική διαδικασία μέχρι το LCL και στη συνέχεια με την υγρή αδιαβατική διαδικασία μέχρι τα 500hPa.

SHOWALTER INDEX	Εκδήλωση Καταιγίδας
$SI \geq +3$	Ευστάθεια
$0 \leq SI \leq +3$	Πιθανοί όμβροι
$-3 \leq SI \leq 0$	Πιθανές καταιγίδες
$-6 \leq SI \leq -3$	Πιθανότητα ισχυρών καταιγίδων
$SI < -6$	Πιθανότητα σίφωνα

Πίν. 2. Κρίσιμες τιμές του δείκτη SI για την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Πηγή: Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)

- **Δείκτης K (KI) (George, 1960)**

Ο Δείκτης K (George, 1960) αποτελείται από τρεις όρους: ο πρώτος όρος συνδυάζει την καθ' ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας, ο δεύτερος την περιεκτικότητα σε υγρασία της

κατώτερης τροπόσφαιρας και ο τρίτος την καθ' ύψος επέκταση του υγρού στρώματος. Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης καταιγίδων.

K INDEX	Εκδήλωση Καταιγίδας
$KI \leq 15$	0% Πιθανότητα
$15 < KI \leq 20$	10% - 20% Πιθανότητα - σχεδόν καμία καταιγίδα
$20 < KI \leq 25$	20% - 40% Πιθανότητα - μεμονωμένες καταιγίδες
$25 < KI \leq 30$	40% - 60% Πιθανότητα - λίγες καταιγίδες
$25 < KI \leq 30$	60% - 80% Πιθανότητα - διάσπαρτες καταιγίδες
$35 < KI \leq 40$	80% - 90% Πιθανότητα - πολυάριθμες καταιγίδες

Πίν. 3. Κρίσιμες τιμές του δείκτη KI για την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Πηγή: Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)

- **Lifted Index (LI)**

Υπολογίζεται όπως ο δείκτης (SI), με τη διαφορά ότι το δείγμα αέρα ανυψώνεται από την επιφάνεια έχοντας αποκτήσει τα χαρακτηριστικά θερμοκρασίας και υγρασίας της επιφάνειας, μέχρι τη στάθμη των 500hPa. Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης καταιγίδων.

LIFTED INDEX	Εκδήλωση Καταιγίδας
$LI \geq +2$	Ευστάθεια
$0 \leq LI < +2$	Οριακά ασταθής – Πιθανοί όμβροι
$-2 \leq LI < 0$	Αστάθεια - Πιθανές καταιγίδες
$-4 \leq LI < -2$	Αστάθεια - Πιθανότητα ισχυρών καταιγίδων
$LI < -4$	Πολύ ασταθής - Πιθανότητα σίφωνα

Πίν. 4. Κρίσιμες τιμές του δείκτη LI για την ευστάθεια της ατμόσφαιρας και την πιθανότητα εκδήλωσης καταιγίδας (Πηγή: Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)

- **Δείκτης CAPE (Convective Available Potential Energy)**

Πρόκειται για μια θερμοδυναμική παράμετρο που παρέχει ένα μέτρο για τη μέγιστη δυνατή δυναμική ενέργεια που μπορεί να αποκτήσει ένα ασταθές δείγμα αέρα κινούμενο κατακόρυφα από το LCL έως το EL. Ο CAPE είναι ανάλογος με το θετικό εμβαδόν που περιβάλλεται από την καμπύλη της θερμοκρασίας και την παράλληλη προς τις υγρές

αδιαβατικές καμπύλη. Είναι ο καταλληλότερος δείκτης της ευστάθειας ή αστάθειας της ατμόσφαιρας, γιατί δεν εξετάζει απλώς δεδομένα σε συγκεκριμένες στάθμες αλλά αναφέρεται σε όλη την ατμόσφαιρα.

CAPE	Εκδήλωση Καταιγίδας
CAPE = 0	Ευστάθεια
$0 < \text{CAPE} \leq 1000$	Οριακά ασταθής
$1000 < \text{CAPE} \leq 2500$	Μέτρια Ασταθής
$2500 < \text{CAPE} \leq 3500$	Πολύ ασταθής
CAPE > 3500	Εξαιρετικά ασταθής

Πίν. 5. Κρίσιμες τιμές της παραμέτρου CAPE για την ευστάθεια της ατμόσφαιρας (Πηγή: Βλάχου και Χριστοδούλου, 2010)

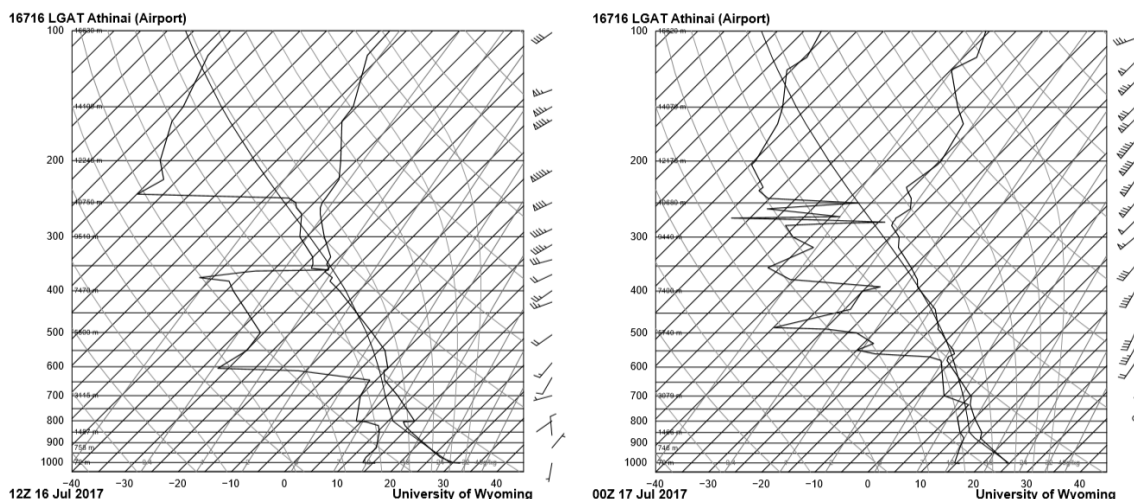
α. Αθήνα

Στο τεφίγραμμα των 12Z 16 Jul. 2017 του αεροδρομίου της Αθήνας (Σχ.17), είναι εμφανής η δυναμική αστάθεια που επικρατεί στην ατμόσφαιρα, με τη θ_e να μειώνεται καθ' ύψος μέχρι περίπου τα 600hPa. Στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα (650hPa έως 350hPa) φαίνεται πως υπάρχει ξηρός, ευσταθής αέρας. Αντίθετα, τα χαμηλότερα τμήματα της τροπόσφαιρας είναι πιο θερμά και υγρά. Η δομή μιας τέτοιας ατμόσφαιρας ορίζει τη δυναμική αστάθεια. Η θερμοϋγρομετρική αυτή διαφορά στα στρώματα της ατμόσφαιρας αποτελεί, λοιπόν, την κινητήρια δύναμη για την εκκίνηση καταιγίδων. Όσο πιο ξηρός ο άνεμος στη μέση τροπόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη η αστάθεια και τόσο εντονότερα τα φαινόμενα που έπονται.

Σε αυτό το τεφίγραμμα, χαρακτηριστική είναι η αναστροφή στα 610hPa, καθώς και η απότομη πτώση του σημείου δρόσου (dew point depression) σε εκείνο το επίπεδο της τροπόσφαιρας (600hPa με 650hPa). Η αναστροφή αυτή χωρίζει τον ξηρό αέρα ψηλά, από τον θερμό υγρό αέρα κοντά στην επιφάνεια. Είναι σημαντική γιατί θέρμανση, υγρασία και αστάθεια μπορούν να τροφοδοτηθούν και να ενταθούν κάτω από αυτό το 'καπάκι' αναστροφής ('Capping' inversion) κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μόλις αυτό το 'καπάκι' σπάσει, τότε το αποτέλεσμα θα είναι έντονη ανωμεταφορά (explosive convection) και εκδήλωση ισχυρότερης του αναμενόμενου καταιγίδας αργότερα.

Τέλος, ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας φαίνεται να υπάρχει μέχρι τα 250hPa, το οποίο είναι περισσότερο εμφανές στο τεφίγραμμα του αεροδρομίου Bridizi της Ιταλίας, που θα αναλυθεί παρακάτω. Ο άνεμος παρουσιάζει χαμηλές εντάσεις από την επιφάνεια μέχρι την ανώτερη τροπόσφαιρα (350hPa), γεγονός που ενισχύει την αστάθεια αυτή.

Παρόμοια κατάσταση, ελαφρώς πιο ενισχυμένη, διαπιστώνεται και στο τεφίγραμμα στις 00Z 17 Jul. 2017. Η υγρασία στα χαμηλότερα στρώματα, κάτω των 570hPa, φτάνει σε υψηλότερα επίπεδα, καθώς η καμπύλη θερμοκρασίας είναι πλέον πολύ κοντά στην καμπύλη του σημείου δρόσου. Χαρακτηριστικό είναι και το ύψος της τροπόπαυσης, η οποία έχει κατέλθει στα 290hPa, όταν οι κανονικές τιμές για τη θερμή περίοδο είναι το ύψος των 210mb. (Βαφειάδης Ι., 2000) Παρ'ολ'αυτά, σε καμιά από τις δυο χρονικές στιγμές δεν έχουν καταμετρηθεί υψηλές τιμές CAPE.



Σχ. 17. Τεφίγράμματα από την περιοχή του Αεροδρομίου της Αθήνας για τις 16 Ιουλίου, 12Z και 17 Ιουλίου, 00Z

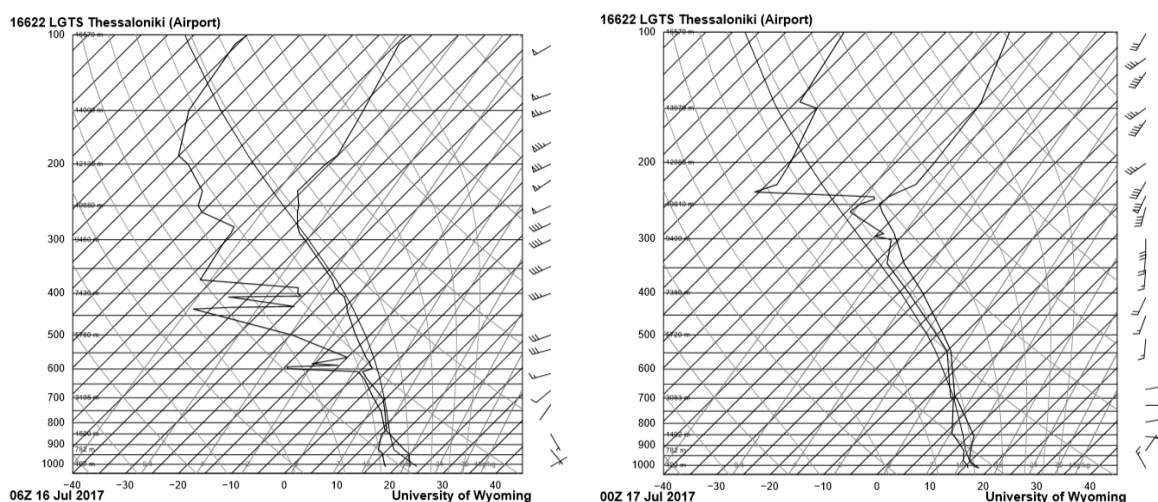
β. Θεσσαλονίκη

Στο τεφίγραμμα των 06Z 16 Jul. 2017 του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης (Σχ. 18), παρατηρούνται πολύ υψηλά επίπεδα υγρασίας κάτω από τα 600hPa, εφόσον η καμπύλη θερμοκρασίας και σημείου δρόσου σχεδόν συμπίπτουν. Αντιθέτως, πάνω από αυτό το υγρό στρώμα, επικρατεί στα υψηλότερα επίπεδα ξηρός ευσταθής αέρας. Τέτοιο περιβάλλον είναι ιδανικό για να υποδεχτεί και να τροφοδοτήσει καταιγίδες. Άλλες πληροφορίες που παρέχει το τεφίγραμμα που αξίζει να σχολιαστούν, είναι το LCL (Lifting Condensation Level), το οποίο αντιπροσωπεύει τη στάθμη στην οποία αρχίζει να συμπυκνώνεται δείγμα αέρα που εξαναγκάζεται να ανυψωθεί μηχανικά (λόγω σύγκλισης, ορογραφίας, μετώπου κτλ.) και ουσιαστικά σηματοδοτεί τη βάση των νεφών, καθώς επίσης και το EL (Equilibrium Level), το οποίο αποτελεί τη στάθμη ελεύθερης ισορροπίας, δηλαδή το επίπεδο εξίσωσης της θερμοκρασίας του δείγματος με αυτή του περιβάλλοντος, το οποίο δείγμα σε αυτό το ύψος παύει να είναι ασταθές. Το LCL εντοπίζεται στα 915hPa, ενώ το EL αρκετά ψηλά, στα 277hPa. Ένα υψηλό EL επιτρέπει τα καταιγιδοφόρα νέφη να αναπτυχθούν υψηλότερα μέσα στην τροπόσφαιρα

(deep convection), ιδιαίτερα εάν οι τιμές του CAPE, κάτω από αυτό το σημείο, είναι μεγάλη. Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή το CAPE φτάνει τα 339J/kg. Τέλος, η τροπόπαυση εκείνη τη χρονική στιγμή βρίσκεται στα 230hPa.

Η πτώση της τροπόπαυσης συνεχίζεται, έως το ύψος των 250hPa, βάση του τεφιγράμματος στις 00Z 17 Jul. 2017. Στο συγκεκριμένο τεφιγράμμα παρατηρείται πως οριακά πάνω από την τροπόπαυση εντοπίζεται υγρασία έως και σχεδόν τα 240hPa. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη λίστα καταγραφής των δεδομένων του πανεπιστημίου Wyoming, η σχετική υγρασία (Relative Humidity - RH) στο επίπεδο αυτό είναι 45%, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη υπερυψωμένων κορυφών νεφών (Overshooting Tops). Μελετώντας τα υπόλοιπα επίπεδα της τροπόσφαιρας, από την επιφάνεια έως και τα 250mb, η θερμοκρασία είναι κοντά στο σημείο δρόσου και ο αέρας είναι σχεδόν κορεσμένος, όπως ήταν αναμενόμενο εφόσον η συγκεκριμένη ραδιοβόλιση πραγματοποιήθηκε στην περιοχή και τη χρονική στιγμή που εξελίσσεται το MSC. Συνεπώς, βάση όλων αυτών, διαπιστώνεται πως τα νέφη έχουν πάχος σχεδόν 10km, ενώ τοπικά η κορυφή τους ξεπερνά την τροπόπαυση. Τέλος, είναι χαρακτηριστική η έντονη διάτμηση του ανέμου καθ' ύψος, όσον αφορά τη διεύθυνση και την ταχύτητα του, καθώς η ένταση του αυξάνει καθ' ύψος. Η διάτμηση του ανέμου που υφίσταται στα μεσαία και χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας μπορεί να προκαλέσει ανοδικά ρεύματα (Μπαλάμη, 2001). Πράγματι, στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα επικρατούν ανοδικά ρεύματα. Όλα αυτά συνδυαστικά συνηγορούν στο ότι η ατμόσφαιρα αποτέλεσε ιδανική για να υποδεχτεί καταιγίδες.

Συνοψίζοντας, (α) μεταφορά υγρασίας στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, (β) μεταφορά ξηρού αέρα στα μέσα στρώματα της τροπόσφαιρας και (γ) άνεμοι που στρέφονται καθ' ύψος και ενισχύονται αποτελούν ευνοϊκές συνθήκες για την εκδήλωση ισχυρών καταιγίδων. (HNMS_MeteorologistBook)

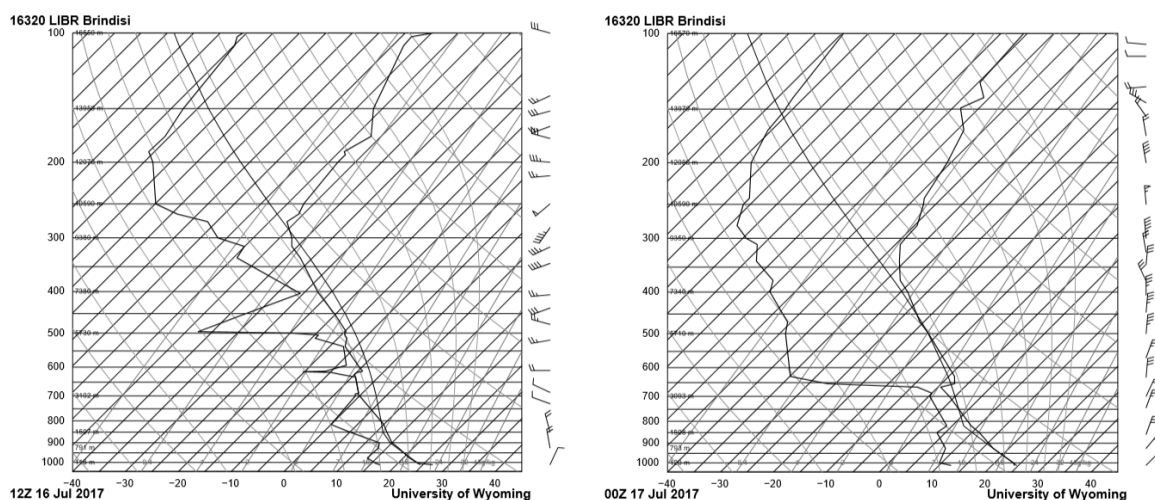


Σχ. 18. Τεφιγράμματα από την περιοχή του Αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης για τις 16 Ιουλίου, 06Z και 17 Ιουλίου, 00Z

γ. *Bridizi, Ιταλία*

Στο τεφίγραμμα των 12Z 16 Jul. 2017 του αεροδρομίου Bridizi της Ιταλίας (Σχ. 19), αξίζει να σχολιαστεί το ύψος στο οποίο χαμηλώνει η τροπόπαυση, που είναι τα 275hPa. Τα ποσά της διαθέσιμης δυναμικής ενέργειας στην ατμόσφαιρα είναι σχετικά μεγάλα, εφόσον το CAPE φτάνει τα 620J/kg, το οποίο διευκολύνει τα νέφη να αναπτυχθούν αρκετά κατακόρυφα στην ατμόσφαιρα. Μια επιπλέον πληροφορία που δίνει το τεφίγραμμα είναι ο έντονα διατμητικός σε ταχύτητα και κατεύθυνση άνεμος το οποίο σύμφωνα με το ηλεκτρονικό βιβλίο της E.M.Y. (HNMS_MeteorologistBook) αποτελεί σημαντική συνθήκη για την εκδήλωση καταιγίδων. Έτσι, το ατμοσφαιρικό περιβάλλον πάνω από την πόλη Bridizi είναι αρκετά ασταθές, την οποία αστάθεια ευνοεί η διαθέσιμη δυναμική ενέργεια της ατμόσφαιρας, καθώς και ο έντονος διατμητικός άνεμος.

Το πρώτο που παρατηρείται στο τεφίγραμμα των 00Z 17 Jul. 2017 είναι ο ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας, ο οποίος φτάνει μέχρι τα 680hPa, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στην κατακόρυφη τομή της κατανομής της υγρασίας καθ' ύψος στην ατμόσφαιρα. Μια τόσο ξηρή μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα είναι αποτρεπτική για την ύπαρξη καταιγιδοφόρων συστημάτων. Επιπρόσθετα, η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης αποτυπώνεται με τον καλύτερο τρόπο στο συγκεκριμένο τεφίγραμμα, εφόσον η τροπόπαυση έχει κατέλθει στα 380hPa. Τέλος, η κατεύθυνση του ανέμου δείχνει την ύπαρξη καθοδικών ρευμάτων, το οποίο δικαιολογείται από τη θέση του αεροχειμάρρου, καθώς πάνω από την πόλη βρίσκεται εκείνη τη χρονική στιγμή η αριστερή είσοδος του. Όπως είναι γνωστό, η αριστερή είσοδος και η δεξιά έξοδος του αεροχειμάρρου αποτελούν περιοχές με έντονες καθοδικές κινήσεις. Όλα αυτά πιστοποιούν ότι το σύστημα δεν επηρεάζει πλέον την ευρύτερη περιοχή της νότιας Ιταλίας, γεγονός το οποίο ισχύει, εφόσον εκείνη τη στιγμή το καταιγιδοφόρο σύστημα παρουσιάζεται μετατοπισμένο ανατολικότερα.



Σχ. 19. Τεφιγράμματα από την περιοχή του Αεροδρομίου της πόλης Bridizi για τις 16 Ιουλίου, 12Z και 17 Ιουλίου, 00Z

δ. Δείκτες Αστάθειας

Θεσσαλονίκη			Αθήνα	
K Index (KI)				
00Z 16	06Z 16	00Z 17	12Z 16	00Z 17
35,6	34,3	30,3	29,5	31,2
Showalter Index (SI)				
00Z 16	06Z 16	00Z 17	12Z 16	00Z 17
0,41	-0,31	3,52	0,88	0,07
Lifted Index (LI)				
00Z 16	06Z 16	00Z 17	12Z 16	00Z 17
0,15	-1,87	3,06	0,98	-0,29
CAPE				
00Z 16	06Z 16	00Z 17	12Z 16	00Z 17
6,77	339,68	0	77,47	31,07

Πίν. 6. Δείκτες αστάθειας για την περιοχή της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας

Όσον αφορά τους δείκτες αστάθειας (Πιν. 6), ο δείκτης *K* για τη Θεσσαλονίκη σημειώνει σταδιακή πτώση μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Αρχικά, η τιμή του δείκτη στις 00Z 16 Jul. 2017 είναι αρκετά υψηλή, ξεπερνώντας το 35 και υποδηλώνοντας πολύ μεγάλη πιθανότητα να εκδηλωθούν πολυάριθμες καταιγίδες, αγγίζοντας ποσοστό 80% - 90%. Είναι ολοφάνερο ότι η ατμόσφαιρα ήταν η ιδανική για να υποδεχτεί πολυάριθμα κύτταρα καταιγίδων στη βόρεια Ελλάδα, τις πρώτες πρωινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου. Σταδιακά μέσα στη μέρα και μέχρι τις 17 Ιουλίου η τιμή πέφτει, το ίδιο και το ποσοστό πιθανότητας εμφάνισης καταιγίδων, διατηρώντας όμως πάντα υψηλό αριθμό ποσοστού πάνω από 60% πιθανότητα καταιγίδας.

Ο δείκτης *Showalter* για τη Θεσσαλονίκη αρχικά εμφανίζει θετικές τιμές, λίγο πιο πάνω από το 0 και έπειτα από έξι ώρες πέφτει κάτω από το μηδέν, έχοντας τιμές 0,41 και -0,31 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές δείχνουν πως τις πρώτες πρωινές ώρες της 16^{ης} υπάρχει πιθανότητα για όμβρους που αργότερα μπορούν να ενταθούν σε καταιγίδες. Όμως αυτό που είναι αξιοσημείωτο είναι η απότομη αύξηση του δείκτη στο 3,52 στις 00Z 17 Jul. 2017, τιμή που υπονοεί ευστάθεια στην ατμόσφαιρα.

Αντίστοιχη πορεία με το δείκτη *Showalter* είχε και ο δείκτης *Lifted* για τη Θεσσαλονίκη. Το πρώτο δωδεκάωρο της 16^{ης} Ιουλίου η ατμόσφαιρα παρουσιάζεται, βάση του δείκτη, οριακά ασταθής με πιθανή εκδήλωση όμβρων και μεμονωμένων καταιγίδων, ενώ και πάλι το βράδυ της 17ης Ιουλίου ο δείκτης αυξάνεται αισθητά, καθώς αποκτά τιμή 3,06, υπονοώντας μια ευσταθή ατμόσφαιρα.

Τέλος, ο δείκτης *CAPE* δείχνει ότι στη Θεσσαλονίκη υπήρχαν διαθέσιμα ποσά δυναμικής ενέργειας ώστε να μπορέσει ένα ασταθές αέριο δείγμα να ανέλθει στην ατμόσφαιρα μόνο

στις 06Z 16 Jul. 2017, δηλαδή λίγο μετά τη στιγμή δημιουργίας του MCS, εφόσον σύμφωνα με το δείκτη εκείνη τη χρονική στιγμή και μόνο η διαθέσιμη ενέργεια έφτανε τα 339 J/kg. Τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης} Ιουλίου, στην περιοχή επικρατούσε ένα ευσταθές ατμοσφαιρικό περιβάλλον με μηδενική διαθέσιμη δυναμική ενέργεια. Να σημειωθεί ότι η δυναμική ενέργεια της ατμόσφαιρας ιδανικά παρουσιάζει αυξημένη τιμή πριν την εκδήλωση του συστήματος, ώστε η ατμόσφαιρα να είναι ευνοϊκή για να δώσει το έναυσμα στο σύστημα να αναπτυχθεί, χωρίς φυσικά αυτό να σημαίνει ότι απαγορεύεται να υπάρχει ενέργεια στην ατμόσφαιρα και κατά τη διάρκεια εξέλιξης ενός νεφικού συστήματος.

Το γενικότερο συμπέρασμα, λοιπόν, που προκύπτει από τους δείκτες K, Showalter και Lifted για τη βόρεια Ελλάδα, είναι πως οι συνθήκες στην ατμόσφαιρα αποτέλεσαν ευνοϊκές από άποψη αστάθειας μέχρι τις μεσημβρινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, δηλαδή τις ώρες της δημιουργίας του συστήματος και προηγουμένως, ενώ έπειτα στην ατμόσφαιρα άρχισε να επέρχεται ευστάθεια, μέχρι που τα μεσάνυχτα της 17^{ης} η ατμόσφαιρα είχε μετατραπεί σε ευσταθή. Το ίδιο επιβεβαιώνουν και οι τιμές του δείκτη CAPE, σύμφωνα με τον οποίο την περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια την έχει αποκτήσει το ατμοσφαιρικό περιβάλλον την ώρα που δημιουργείται το MCS. Φαίνεται, λοιπόν, κρίνοντας από τις τελευταίες τιμές των δεικτών και από τα φαινόμενα που εξελίχθηκαν στην περιοχή, ότι οι καταιγίδες έλαβαν χώρα όταν οι δείκτες απέκτησαν τιμές που υποδείκνυαν ευστάθεια. Πιθανόν αυτό να οφείλεται στην ομοιομορφία της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια έως την τροπόπαυση, η οποία ήταν κορεσμένη.

Αντιθέτως με τη Θεσσαλονίκη, στην Αθήνα ο δείκτης K παραμένει σχεδόν σταθερός με τιμές γύρω από το 30 για τις 12Z 16 Jul. 2017 και τις 00Z 17 Jul. 2017, τιμή η οποία σύμφωνα με τον πίν.6 δηλώνει αρκετά μεγάλο ποσοστό πιθανότητας εκδήλωσης διάσπαρτων καταιγίδων, ποσοστό 60% - 80%. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή παρουσιάζει ελαφρώς αύξηση από το 29,5 στο 31 σε διάστημα δώδεκα ωρών, δηλαδή δεν παρατηρείται καμιά ακραία αλλαγή στην τιμή του δείκτη. Αυτή όμως η αύξηση παραπέμπει σε μια αντίστοιχη αύξηση της αστάθειας. Όπως διαπιστώθηκε και από τα τεφίγραμματα, η ατμόσφαιρα μεταβάλλεται σε ασταθέστερη στα νότια τμήματα της χώρας κατά τη διάρκεια της 16^{ης} Ιουλίου έως και τις βραδινές ώρες αυτής.

Σύμφωνα με το δείκτη Showalter, ο οποίος στο τεφίγραμμα της Αθήνας παρουσιάζει μόνο θετικές τιμές για τις 16 και 17 Ιουλίου, υπάρχουν πιθανότητες για όμβρους. Παρ'ολ'αυτά, να σημειωθεί πως λόγω του ότι η τιμή του δείκτη παρουσιάζει πτωτική πορεία κατά τη μετάβαση από τις 16 στις 17 του μηνός, προσεγγίζοντας αρκετά την τιμή 0, δίνει την αίσθηση ότι το περιβάλλον της ατμόσφαιρας της Αθήνας γίνεται ευνοϊκότερο ώστε να ενισχυθεί η βροχόπτωση. Όντως, το σύστημα μέσα στη μέρα κινείται νοτιότερα, κάνοντας το πέραςμα του από την περιοχή της Αττικής το διάστημα 22.30UTC με 00.30UTC της επομένης.

Ο δείκτης *Lifted* τις μεσημβρινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου έχει θετική τιμή, πολύ κοντά στο μηδέν, χαρακτηρίζοντας την ατμόσφαιρα οριακά ασταθή, με πιθανότητες για όμβρους ή μεμονωμένες καταιγίδες. Αργότερα, συμφωνώντας με την εξέλιξη και πορεία του συστήματος το οποίο διέρχεται από την περιοχή κατά τις απογευματινές-βραδινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, ο δείκτης παρουσιάζει πτώση, αποκτώντας αρνητική τιμή και αυξάνοντας τις πιθανότητες για εκδήλωση καταιγίδων στην περιοχή εκείνες τις ώρες.

Τέλος, ο δείκτης *CAPE* δε δίνει σημαντικά ποσά δυναμικής ενέργειας στην ατμόσφαιρα της Αθήνας, τόσο για τις 12Z 16 Jul. 2017 όσο και για τις 00Z 17 Jul. 2017. Αυτό προκύπτει λόγω της αναστροφής που υπάρχει στην μέση τροπόσφαιρα, που εμποδίζει ένα δείγμα αέρα να ανυψωθεί κατακόρυφα, δηλαδή εμποδίζονται οι ανοδικές κινήσεις στην τροπόσφαιρα πάνω από την περιοχή της Αττικής.

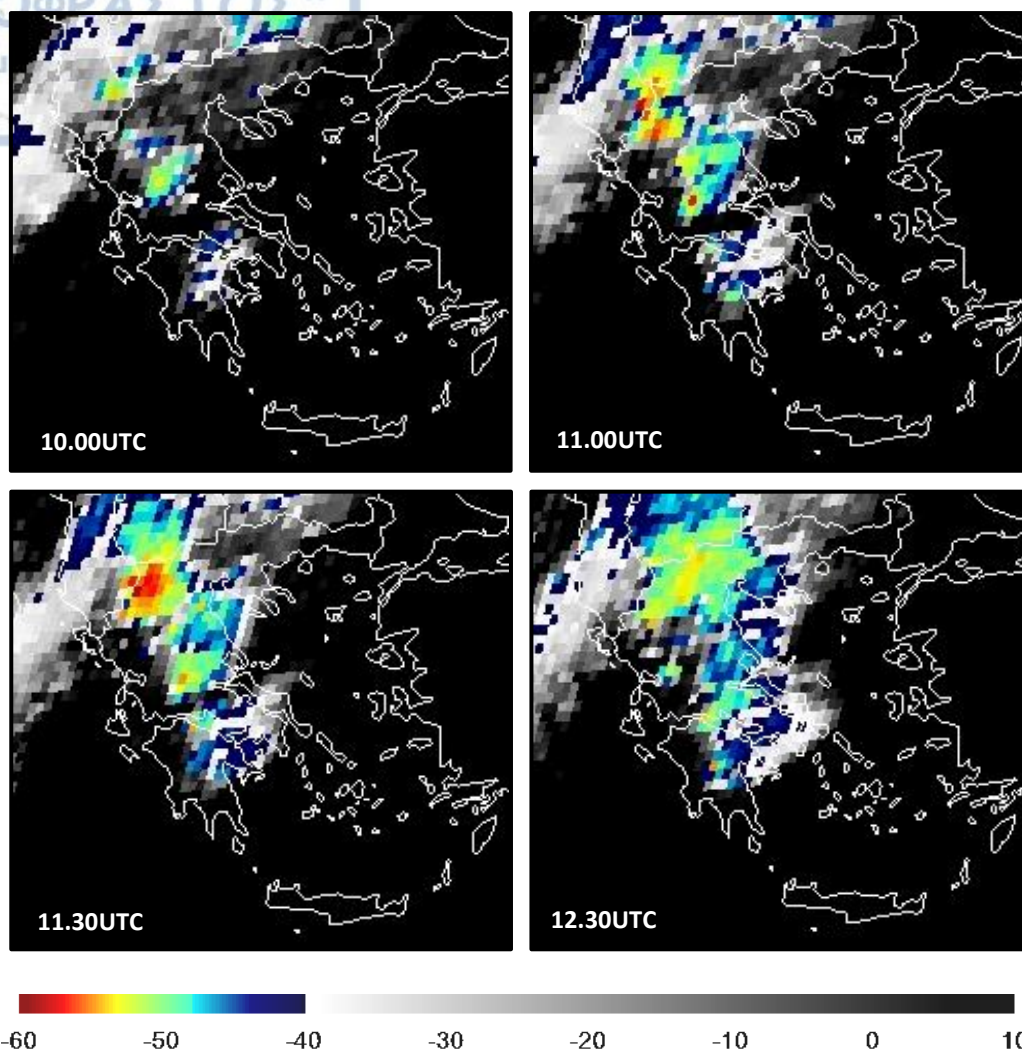
Συνοψίζοντας, όλοι οι δείκτες αστάθειας αποδεικνύουν ότι το ευρύτερο ατμοσφαιρικό περιβάλλον της νότιας Ελλάδας αρχικά παρουσιάζει οριακή αστάθεια που κατά τη διάρκεια της ημέρας αυξάνει και η ατμόσφαιρα μεταβάλλεται σε ασταθής μέχρι τις νυχτερινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου. Οι δείκτες συμφωνούν με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την περιγραφή των τεφιγραμμάτων του αεροδρομίου της Αθήνας.

4. Αποτελέσματα Ανάλυσης Δορυφορικών Εικόνων

α. Ανάλυση εικόνων στο κανάλι 9 του υπερύθρου - IR10.8

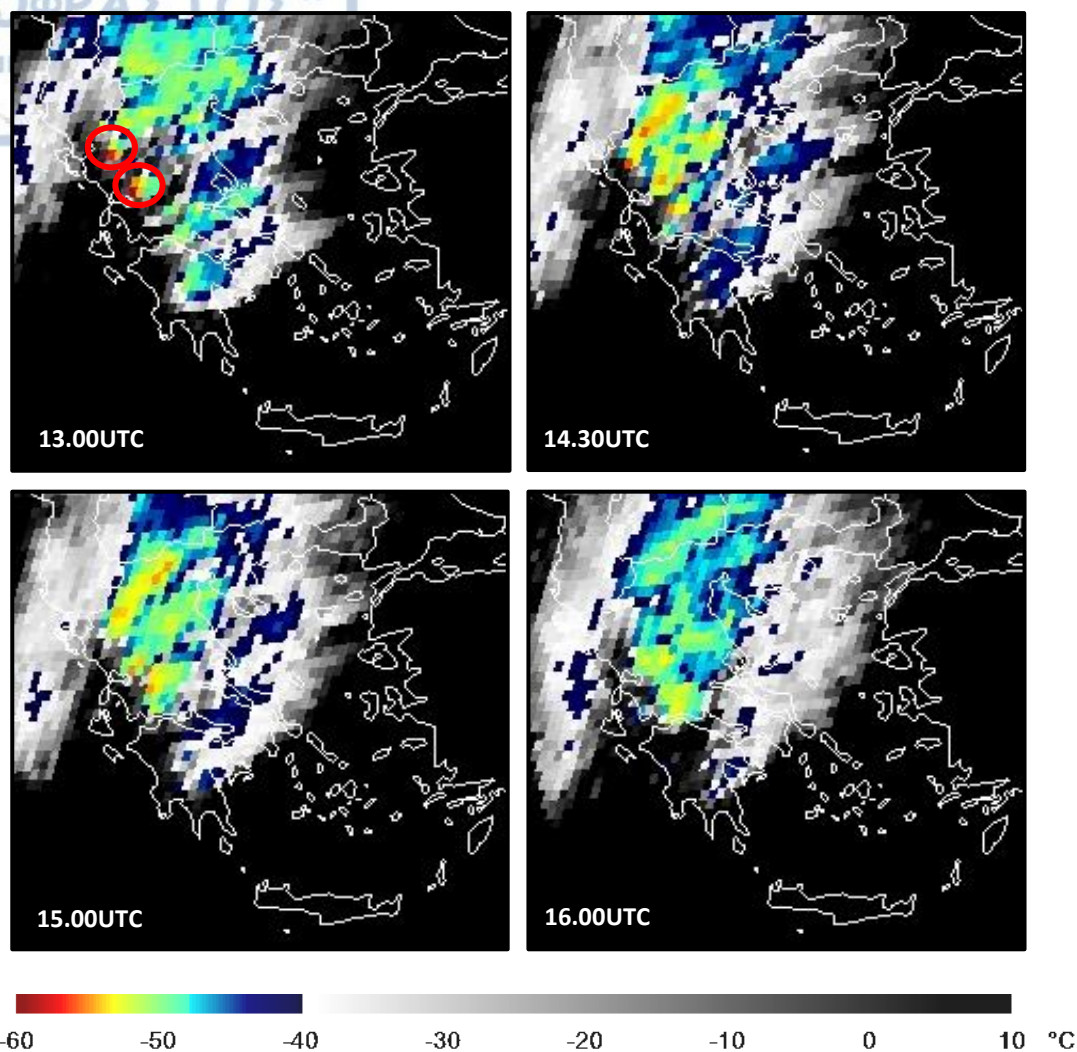
Το κανάλι 9 του υπερύθρου των 10,8μm αποδίδει τη θερμοκρασία λαμπρότητας των κορυφών των νεφών, που αποτελεί μια καλή εκτίμηση του ύψους τους. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες λαμπρότητας αποτυπώνονται με διαφορετικές αποχρώσεις του γκρι στις εικόνες του υπερύθρου. Οι σκούρες αποχρώσεις, που αντιστοιχούν σε υψηλές θερμοκρασίες, ανήκουν σε νέφη μεσαίου και χαμηλού ύψους, ενώ οι ανοιχτόχρωμες σε πιο ψηλά νέφη, δηλαδή σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες. Το κανάλι κυρίως χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών που αφορούν τα υψηλότερα νέφη. Επειδή δεν είναι εύκολη η διάκριση ανάμεσα στα υψηλή νέφη, εάν πρόκειται για παχιά νέφη cirrus που ανήκουν σε νεφική ασπίδα ή για κάποια υπερυψωμένη κορυφή, έχει εφαρμοστεί χρωματική διαβάθμιση σε θερμοκρασίες κάτω των -40°C. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν τα κυριότερα συστήματα που εξελίχθηκαν τις ημέρες 16 και 17 Ιουλίου, βάση της απεικόνισης των υψηλότερων νεφών, των διαφόρων χαρακτηριστικών τους, της κίνησης και του σχήματος που αποκτούν.

Στις 16 Ιουλίου στις 10.00UTC εμφανίζονται οι πρώτοι μεμονωμένοι νεφικοί πυρήνες, δυτικά της οροσειράς της Πίνδου στο νομό Άρτας και στην περιοχή των Πρεσπών. Στην πορεία και ενώ αυτοί αναπτύσσονται, νέα κύτταρα γεννιούνται κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου. Τα αρχικά, λοιπόν, κύτταρα ενώνονται με άλλα που εντοπίζονται κοντά τους, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν μεγαλύτεροι νεφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι εμφανίζονται στις δορυφορικές εικόνες με ομοιόμορφο κυκλικό σχήμα. Έτσι, κρίνοντας από την έκταση και τη θερμοκρασία των κορυφών των νεφών, μπορεί το σύστημα να αρχίσει να χαρακτηρίζεται ως καταιγιδοφόρο σύστημα μέσης κλίμακας (MCS), το οποίο σχετίζεται με έντονα καιρικά φαινόμενα. Στις 11.30UTC, μάλιστα, καταγράφεται και η χαμηλότερη θερμοκρασία κορυφής που απέκτησε το σύστημα καθ'όλη τη διάρκεια ζωής του. Οι πρώτες αυτές νεφικές αναπτύξεις δεν παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς στις 12.30UTC αρχίζουν να εξασθενούν καθώς μετατοπίζονται προς τα βορειοανατολικά.



Σχ. 20. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπέρυθρου IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις 13.00UTC του Σχ. 21, δυο νέοι πυρήνες με πολύ ψυχρές κορυφές εμφανίζονται ταυτόχρονα στην Ήπειρο, δυτικά της Πίνδου. Νοτιότερα, άλλα διάσπαρτα κύτταρα πιο θερμών κορυφών, πάνω από Στερεά Ελλάδα και Πελοπόννησο, παρουσιάζουν πιο σύντομο χρόνο ζωής καθώς πολύ γρήγορα θα εξασθενίσουν. Λίγο αργότερα, νέα κύτταρα γεννιούνται στην περιοχή των ανοδικών ρευμάτων, στην κεντρική Μακεδονία, την Ήπειρο και τη Θεσσαλία, βορειανατολικά των ήδη προϋπάρχουσων κύτταρων. Σημαντικό ρόλο στην κατακόρυφη ανάπτυξη τους παίζει και η ορογραφία, καθώς γεννιούνται πάνω από τα βουνά της Πίνδου. Τα νέα αυτά κύτταρα οφείλουν όμως την εμφάνιση και ανάπτυξη τους στον θερμό και υγρό άνεμο που ολισθαίνει πάνω στη μετωπική επιφάνεια, η οποία τις μεσημβρινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου εντοπίζεται στα βορειοδυτικά τους.

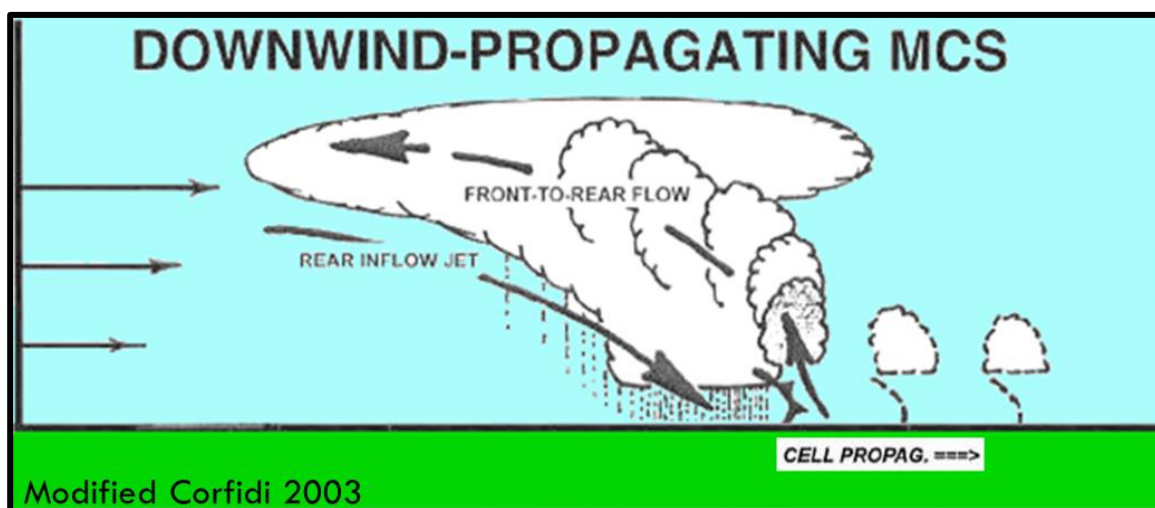


Σχ. 21. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπερύθρου IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις 15.00UTC, λοιπόν, έχουν σχηματιστεί δυο καλά οργανωμένες νεφικές μάζες, οι οποίες αποτελούνται από κύτταρα που βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο του κύκλου ζωής του. Οι άκμονες που συντίθενται από το συνδυασμό των επιμέρους καταιγιδοφόρων κυττάρων και καλύπτουν τα διαφορετικά κύτταρα, είναι σε σχήμα ευθείας γραμμής, παράλληλων μεταξύ τους και παράλληλων και στην μετωπική επιφάνεια. Υπερυψωμένες κορυφές, που αποτελούν ένδειξη για ανοδικά ρεύματα και ανήκουν στα ώριμα νέφη, φαίνονται να προεξέχουν από την ψυχρή νεφική ασπίδα. Προκύπτει, λοιπόν, ότι πρόκειται για καταιγιδοφόρο σύστημα μέσης κλίμακας που αποτελείται από σύμπλεγμα πολυκύτταρων καταιγίδων (Multicell Cluster Storm), το οποίο διαδίδεται και μετακινείται σαν μια μονάδα προς τα βορειοανατολικά. Η διάδοση της καταιγίδας εξαρτάται από τη διεύθυνση μετακίνησης του συστήματος Multicell Cluster Storm και τη διεύθυνση κίνησης των νέων κυττάρων. Τα νέα κύτταρα σχηματίζονται συστηματικά στο άκρο που έχει το προβάδισμα (leading-edge) μπροστά-ανατολικά του συστήματος, τα οποία πυροδοτούνται από τα έντονα ανοδικά

ρεύματα που εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια και οφείλουν την ύπαρξη τους στη μετωπική επιφάνεια. Τα κύτταρα αυτά αργότερα πρόκειται να γίνουν τα κύρια-ώριμα κύτταρα προτού τα ήδη ώριμα, πίσω από αυτά, αρχίσουν να διαλύονται (Browning, 1985). Σύμφωνα με τον Feidas (2017) τα ώριμα κύτταρα τείνουν να επικρατούν στο κέντρο του συστήματος, ενώ αυτά που πρόκειται να διαλυθούν εντοπίζονται πίσω-δυτικά από αυτά, στην περιοχή που επικρατούν καθοδικές κινήσεις. Ο ψυχρός αέρας, ο οποίος προέρχεται από τα μεσαία επίπεδα της ατμόσφαιρας, τείνει να παράγει καθοδικά ρεύματα στην περιοχή των υπό διάλυση-κυττάρων, επιταχύνοντας τη διαδικασία διάλυσης τους. Τέλος, τα μεγαλύτερα ποσά βροχής καταγράφονται στην περιοχή όπου δρουν τα ώριμα κύτταρα. Αυτή η πορεία εξέλιξης είναι χαρακτηριστική για τα συμπλέγματα πολυκύτταρων καταιγίδων. Το σύστημα συνεχίζει να διατηρείται με την ίδια ένταση, όσο γεννιούνται νέοι πυρήνες που το τροφοδοτούν, το ίδιο και οι ισχυρές βροχοπτώσεις, οι οποίες μετατοπίζονται βορειοανατολικότερα, κατά τη κίνηση του συστήματος.

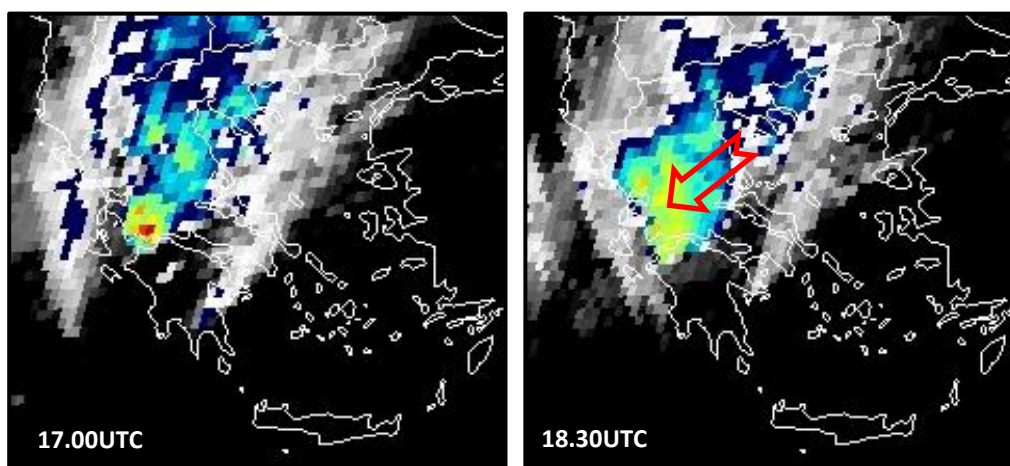
Το εννοιολογικό Σχ. 22 δείχνει όσα περιγράφηκαν παραπάνω.

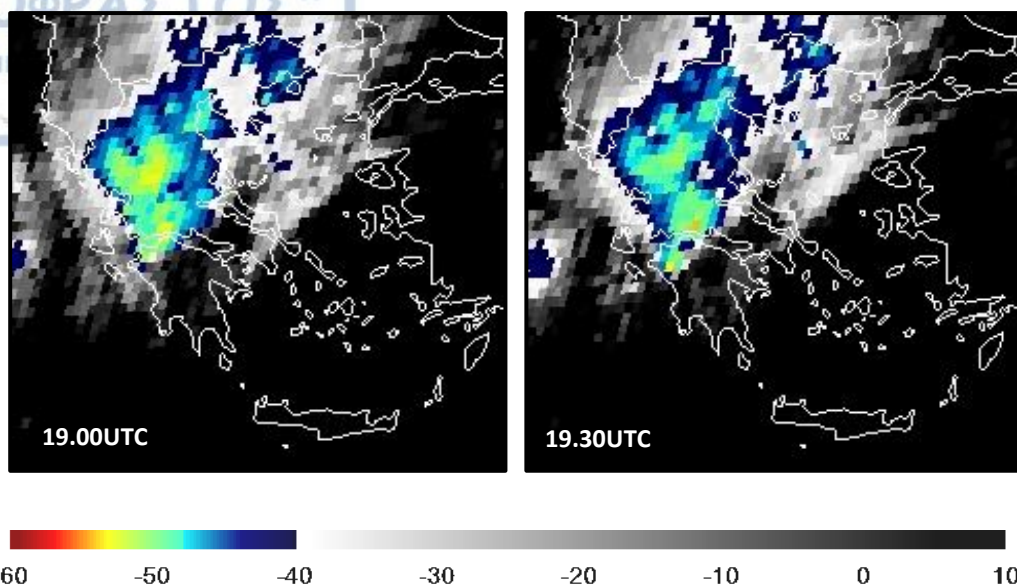


Σχ. 22. Σχηματικό μοντέλο της διάδοσης του MCS, σύμφωνα με το οποίο εάν τα νέα κύτταρα γεννιούνται στην περιοχή των ανοδικών ρευμάτων, τότε και η καταιγίδα θα διαδοθεί προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή των νέων κυττάρων (Feidas, 2017)

Παράλληλα, στις 15.00UTC γεννιούνται νέα κύτταρα και στη Στερεά Ελλάδα, μικρότερης έκτασης και διάρκειας ζωής σε σχέση με αυτά που έχουν εμφανιστεί στον ηπειρωτικό κορμό. Το σκηνικό αυτό συνεχίζει έως τις 16.00UTC, οπότε και ολόκληρος ο ηπειρωτικός κορμός της χώρας είναι καλυμμένος από τη νεφική ασπίδα, αποτελούμενη από νέφη θερμοκρασιών κορυφής γύρω στους -50°C . Το σύστημα έχει ήδη αρχίσει να μετατοπίζεται νοτιοδυτικά, όπου και θα εξελιχθεί τις επόμενες ώρες.

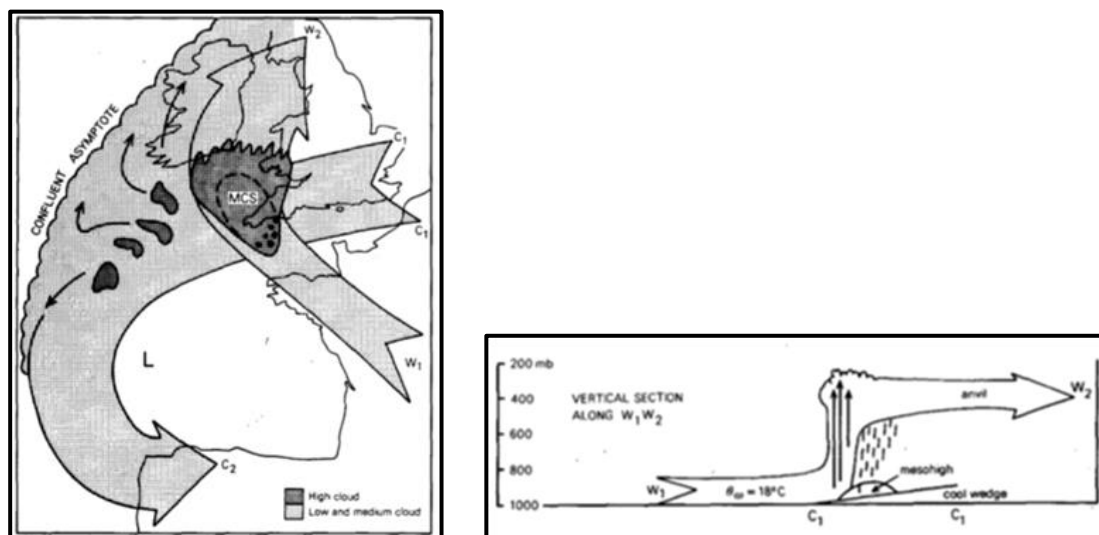
Μια νέα πολύ ψυχρή κορυφή κυττάρου, σε σχήμα δαχτυλιδιού, εμφανίζεται στις 17.00UTC στη βορειοδυτική Πελοπόννησο, στο νοτιοδυτικό, δηλαδή, άκρο της νεφικής ασπίδας, που αποτελεί αφετηρία για ένα καινούριο σύστημα καταιγίδων. Σε διάστημα μιάμισης ώρας το σύστημα που αποτελείται από ένα σύμπλεγμα καταιγιδοφόρων κυττάρων έχει επεκταθεί, ενώ η νεφική του ασπίδα έχει αποκτήσει σχήμα-V (V-Shape), η γωνία της οποίας φαίνεται να δείχνει προς τα νοτιοδυτικά, προς την κατεύθυνση που προέρχεται ο άνεμος στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας. Η κορυφή της νεφικής ασπίδας βρίσκεται στα ψηλότερα επίπεδα της τροπόσφαιρας, εφόσον, σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα της δορυφορικής εικόνας των 18.30UTC (Σχ. 23), χαρακτηρίζεται από αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, μεταξύ -50°C και -55°C . Παρόλο που η κορυφή της ασπίδας μπορεί γρήγορα να επεκτείνεται οριζόντια, δε συμβαίνει το ίδιο και με τις ψυχρές κορυφές των κυττάρων, τα οποία γεννιούνται στην περιοχή των ανοδικών ρευμάτων (Scotfield, 1987) (κόκκινο βέλος). Στα cumulonimbus αυτά οφείλεται η ένταση του συστήματος, οπότε όσο παραμένουν σε μεγάλα ύψη οι κορυφές τους, τόσο πιο έντονη παρουσιάζεται η βροχόπτωση και τόσο μεγαλύτερα τα ποσά βροχής που φτάνουν στο έδαφος. Όταν αργότερα σταματήσουν να επεκτείνονται κατακόρυφα είτε γίνουν πιο θερμές, τότε το σύστημα θα γίνει πιο αδύναμο.





Σχ. 23. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπερύθρου IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

Φαίνεται να ταιριάζει απόλυτα με το “σφηνοειδή τύπο καταιγιδοφόρου συστήματος μεγάλης κλίμακας” ταξινόμησης του Scotfield(1985) για συστήματα που παράγουν ισχυρή βροχόπτωση (large-scale wedge type of Scotfield’s classification), καθώς και με το ενισχυμένο σχήμα-V όπως περιγράφηκε από τον McCann (1983) (enchanced-V pattern). Το σχηματικό μοντέλο του Σχ. 24 (Browning and Hill, 1984) απεικονίζει ένα καταιγιδοφόρο σύστημα μέσης κλίμακας σχήματος-V που βρίσκεται σε ώριμο στάδιο ζωής.

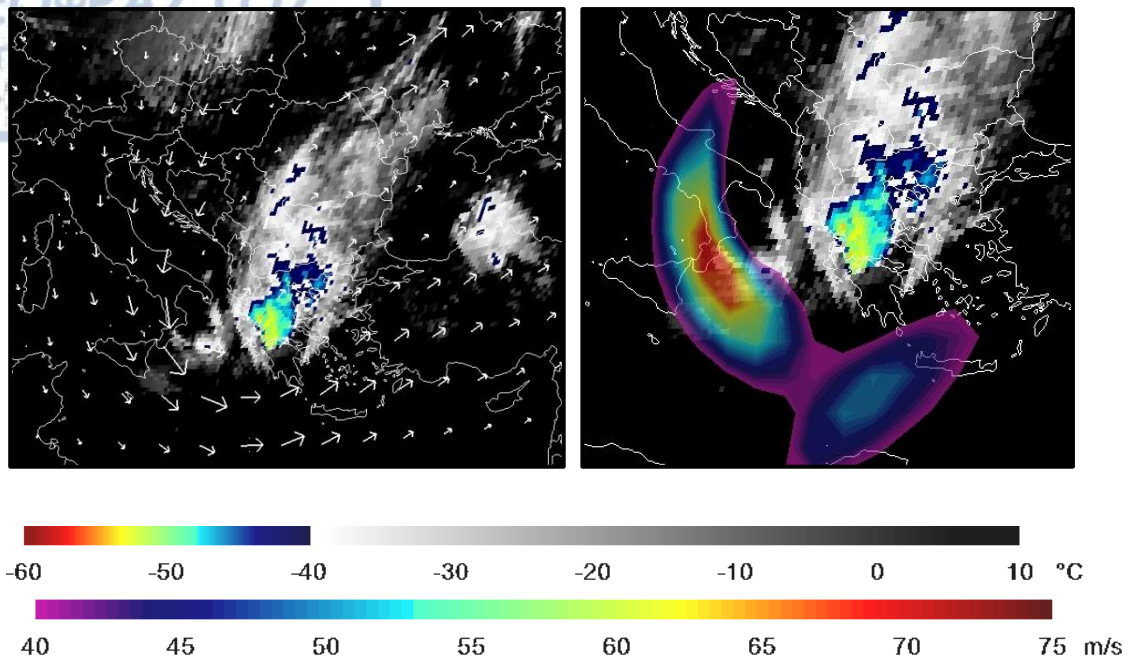


Σχ. 24. Αριστερά: καταιγιδοφόρο σύστημα μέσης κλίμακας σχήματος-V σε ώριμο στάδιο ζωής. Δεξιά: κατακόρυφη τομή του συστήματος (Browning and Hill, 1984)

Τα οπτικά χαρακτηριστικά του παραπάνω μοντέλου (Σχ.24) είναι μια συμμετρική νεφική ασπίδα στα ανώτερα στρώματα, της οποίας ο άκμονας συντίθεται από το συνδυασμό των ακμών των επιμέρους καταιγιδοφόρων κυττάρων. Η κορυφή της νεφικής ασπίδας βρίσκεται αρκετά ψηλά στην ατμόσφαιρα, χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και αιχμηρές άκρες, ενώ το σχήμα της είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτο στις δορυφορικές εικόνες. Η δεξιά εικόνα απεικονίζει την διάδοση της βροχόπτωσης που σχετίζεται με το χαρακτηριστικό νεφικό τύπο της αριστερής εικόνας. Βροχόπτωση δημιουργείται και εξαπλώνεται τόσο στην περιοχή δράσης των έντονων ανοδικών ρευμάτων, όσο και κάτω από τα στρατόμορφα νέφη.

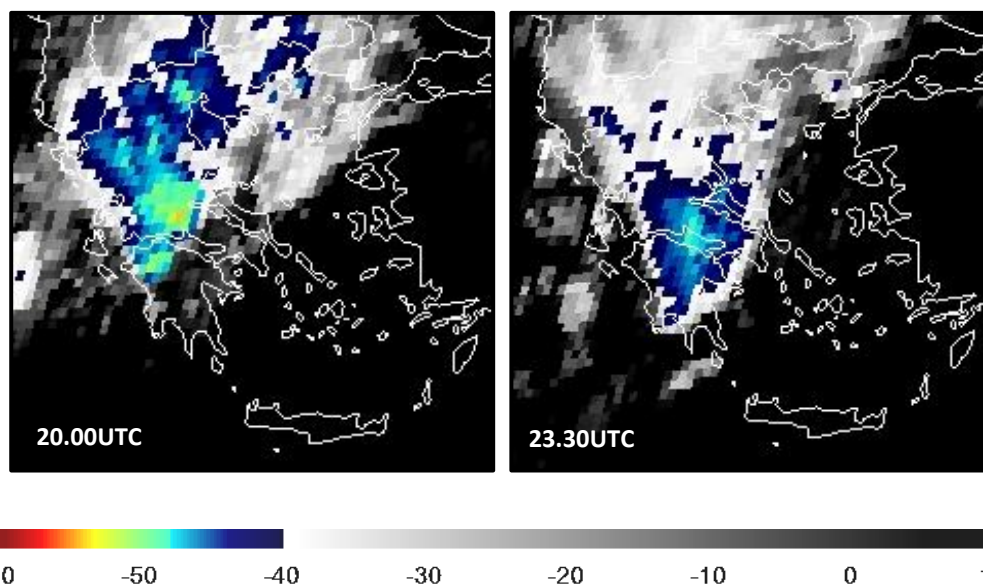
Ένα τέτοιο σύστημα που απεικονίζεται στην πρώτη εικόνα του Σχ. 24 και παρατηρήθηκε να εξελίσσεται πάνω από τον ελλαδικό χώρο τις απογευματινές-βραδινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, αναπτύσσεται σε τοπικά έντονη βαροκλινική ζώνη (Browning and Hill, 1984), όπως και επικρατούσε στην ευρύτερη περιοχή της Πελοποννήσου εκείνο το χρονικό διάστημα, καθώς επίσης τροφοδοτείται από τη ροή αέρα χαρακτηριζόμενου από υψηλές θερμοκρασίες (W1W2: Σχ. 24, Αριστερά) προερχόμενου από τα χαμηλότερα στρώματα, ακριβώς μπροστά από ένα επιφανειακό ψυχρό μέτωπο. Το καταιγιδοφόρο σύστημα, λοιπόν, προκύπτει όταν ο θερμός αέρας ολισθαίνει πάνω στη σφήνα ψυχρού αέρα (C1C2: Σχ. 24, Αριστερά). Ο θερμός υγρός αέρας πηγάζει από τα νότια της Τουρκίας, ενώ ο ψυχρός κατερχόμενος αέρας προέρχεται από τις βόρειες χώρες της Ευρώπης και εκείνες τις ώρες καλύπτει τη βόρεια-κεντρική Ελλάδα.

Το σχήμα του οφείλεται στους δυνατούς ανέμους που επικρατούν στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, καθώς συμβάλλουν στη γρήγορη οριζόντια εξάπλωση των νεφών cirrus της νεφικής ασπίδας. Οι έντονες ανοδικές κινήσεις, περάν του ότι οδηγούν τα νέα κύτταρα να φτάνουν σε μεγάλο ύψος στην τροπόσφαιρα, έχουν και ως αποτέλεσμα έντονη απόκλιση ψηλά στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Η έντονη απόκλιση των ανέμων οδηγεί τα καταιγιδοφόρα συμπλέγματα που έχουν ενωθεί κατά μήκος των ανοδικών να σχηματίσουν μια μεγάλη γωνία, συνήθως 50° έως 90°, προς την κατεύθυνση του ανέμου (Scolfield, 1987). Επιπλέον, σύμφωνα με τον Fujita (1981), η καλοσχηματισμένη γωνία δημιουργείται στο σημείο όπου ενώνεται ο υποτροπικός με τον πολικό αεροχειμάρρο. Οι δυο αυτοί αεροχειμάρροι στο ύψος των 250hPa - 300hPa ορίζουν τα δυο άκρα του γρήγορα αναπτυσσόμενου καταιγιδοφόρου νέφους, ενώ οι ίδιες οι υπερυψωμένες κορυφές λειτουργούν ως εμπόδιο στον άνεμο, στα ανώτερα στρώματα, ώστε να εκτρέπουν τη ροή του ανέμου περιμετρικά αυτών (Fujita, 1978). Στην παρακάτω αριστερή εικόνα (Σχ. 25) απεικονίζεται το διάνυσμα του ανέμου. Η απόκλιση του στην περιοχή που αναπτύσσεται το V-Shape σύστημα είναι εμφανής. Επίσης, στη δεξιά εικόνα του Σχ. 25 αποτυπώνεται η τομή του πολικού και υποτροπικού αεροχειμάρρου σε ευνοϊκή θέση ώστε το σύστημα να αποκτήσει το σχήμα-V.



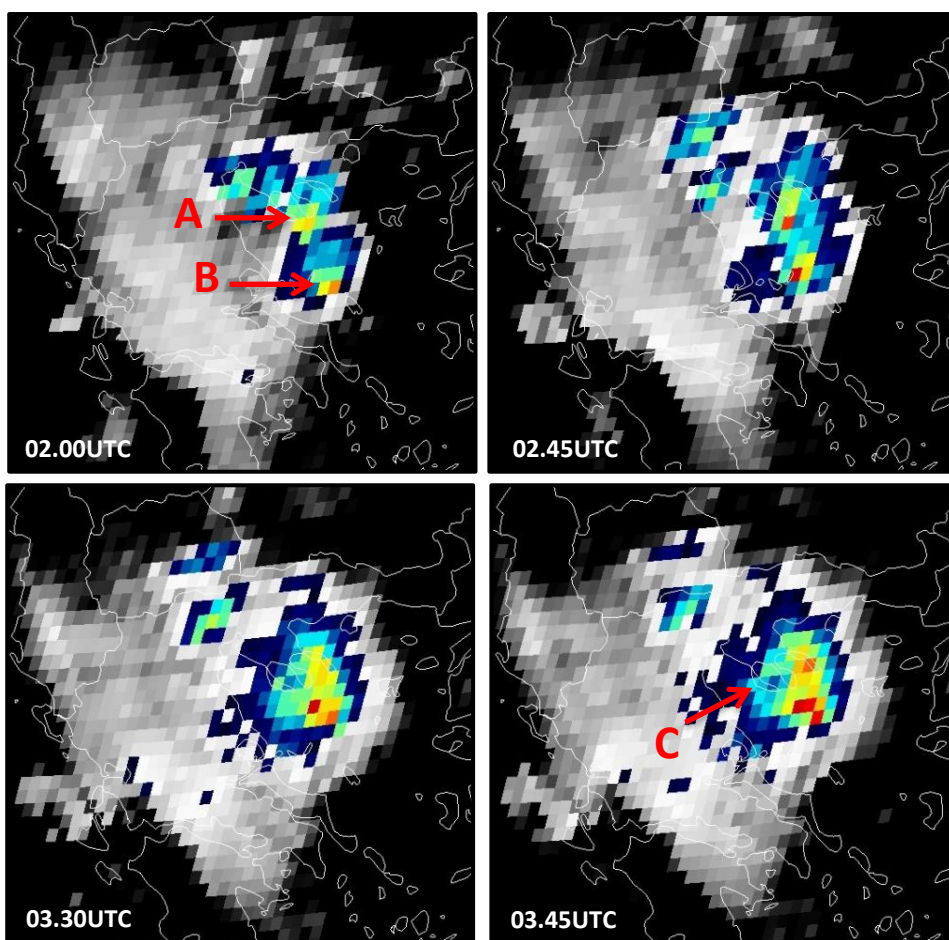
Σχ. 25. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπέρυθρου IR10,8 για τις 18.30UTC της 16^{ης} Ιουλίου. Αριστερά: με υπέρθεση το διάνυσμα του ανέμου. Δεξιά: με υπέρθεση τις μέγιστες τιμές του ανέμου στο επίπεδο των 300hPa (jet streak). Πολικός και υποτροπικός αεροχείμαρρος

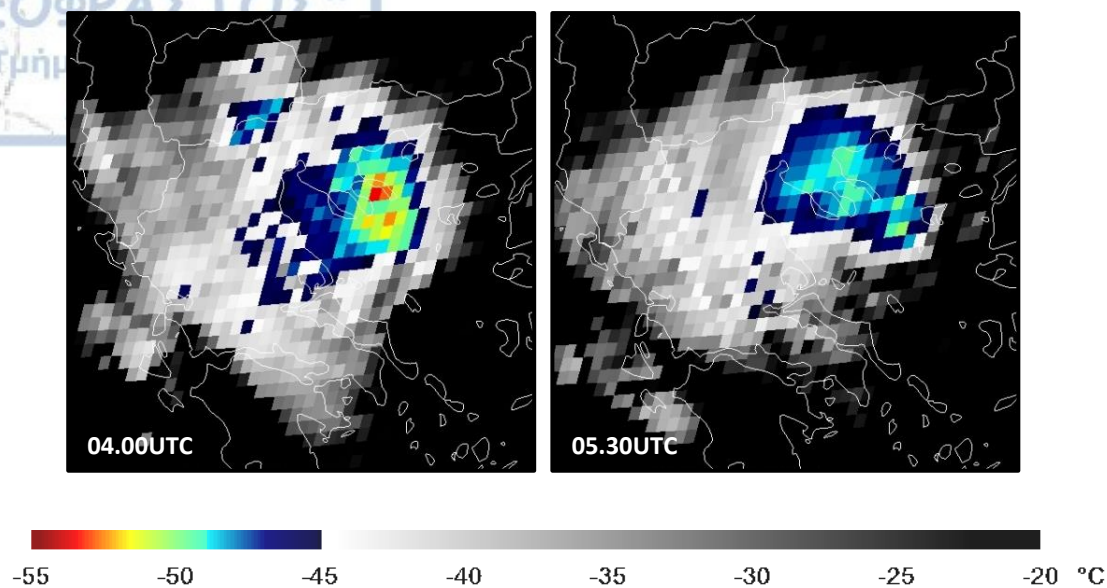
Το καταιγιδοφόρο σύστημα σχήματος-V παρέμεινε σχεδόν στάσιμο μέχρι τις 20.00UTC, ενώ έπειτα παρουσίασε μετατόπιση με γρήγορο ρυθμό προς τα νότια μέχρι τις 23.30UTC, οπότε και σταδιακά άρχισε να χάνει το ομοιόμορφο σχήμα του, σημειώνοντας το τέλος των έντονων βροχοπτώσεων για την περιοχή.



Σχ. 26. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπέρυθρου IR10,8, με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από -40°C έως -60°C για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις 02.00UTC της 17^{ης} Ιουλίου διακρίνονται δυο νέα κύτταρα, λόγω της διαφορετικής απόχρωσης των υπερυψωμένων κορυφών τους στην εικόνα του υπερύθρου, τα οποία γεννιούνται ταυτόχρονα, νότια της Χαλκιδικής και στις Σποράδες. Διαδοχικές δορυφορικές εικόνες μεταξύ 02.00UTC και 03.30UTC (Σχ. 27) δείχνουν πως, τα δυο νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης είναι χωρισμένα καθώς βρίσκονται στη φάση ανάπτυξης τους, περιβάλλονται όμως από την ίδια ψυχρή νεφική ασπίδα. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται πως το ένα νεφικό κύτταρο (A) αναπτύσσεται όντας στάσιμο, ενώ το δεύτερο (B) το προσεγγίζει παρασυρόμενο από τη βορειοανατολική ροή των χαμηλότερων στρωμάτων. Σε διάστημα μιάμισης ώρας ενώνονται για να δώσουν έναν μεγάλο νεφικό σύστημα. Σύμφωνα με τους Simpson και Woodley (1971) και Woodley και Sax (1976), όταν καταιγιδοφόρα νεφικά κύτταρα ενώνονται, αυξάνεται δραματικά η ένταση, η περιοχή και ο χρόνος ζωής της καταιγίδας, ενώ τα ποσοστά βροχής είναι πολύ περισσότερα απ' όσα θα έδιναν τα δυο καταιγιδοφόρα νέφη ξεχωριστά.





Σχ. 27. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι του υπερύθρου IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από -45°C έως -55°C, για τις 17 Ιουλίου 2017

Λίγη ώρα μετά την ένωση τους (Σχ. 27, 3.45UTC) και ενώ η πιο ψυχρή κορυφή αγγίζει σχεδόν τους -54°C, στα δυτικά των υπερυψωμένων κορυφών εμφανίζεται ενσωματωμένη στην ψυχρή νεφική ασπίδα μια θερμή περιοχή (C), θερμοκρασίας γύρω στους -47°C. Σύμφωνα με τον Setvak (2010) τέτοιες χαρακτηριστικές νεφικές περιοχές είναι σύνηθες να εμφανίζονται κατά την εξέλιξη μιας καταιγίδας, καθώς η εμφάνισή τους συνδέονται άμεσα με την ύπαρξη των υπερυψωμένων κορυφών. Ονομάζονται warm spots (ή Embedded Warm Area EWA), γεννιούνται όταν κυριαρχούν νέφη ιδιαίτερα μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης και εμφανίζονται στην περιοχή όπου επικρατούν μέσα στο νέφος οι καθοδικές κινήσεις. Πιθανότατα να οφείλονται και στη θερμοκρασιακή αναστροφή που επικρατεί στο επίπεδο της τροπόπαυσης. Πρόκειται για ένα παροδικό φαινόμενο, με μικρή διάρκεια ζωής, που συνδέεται άμεσα με την εντατικοποίηση της καταιγίδας και δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι εμφανίστηκε την χρονική περίοδο που η καταιγίδα βρισκόταν στο μέγιστο της.

Μετά την ένωση, λοιπόν, των δυο κυττάρων, το νεφικό σύστημα παραμένει σχεδόν στάσιμο επηρεάζοντας την περιοχή του βορειοανατολικού Αιγαίου. Η νεφική ασπίδα η οποία περιέβαλε τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης διατήρησε θερμοκρασία κάτω των -50°C για πάνω από τρεις ώρες, από τις 02.30UTC έως και λίγο μετά τις 05.30UTC, ευρισκόμενη σε μεγάλο ύψος στην τροπόσφαιρα, ενώ αγγίζει τη μέγιστη έκταση στις 04.00UTC. Γι' αυτό το χρονικό διάστημα, το μέγεθος της ψυχρής νεφικής ασπίδας ξεπερνούσε τα 30.000km², ενώ διατηρούσε σχήμα σχεδόν κυκλικό με εκκεντρότητα μεγαλύτερη του 0,7. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά πιστοποιούν, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των MCS κατά Jirak (2003) πρόκειται για ένα κυκλικό καταιγιδοφόρο σύστημα μέσο-β κλίμακας (Meso-β Circular Convective System, M-βCCS). Πιο αναλυτικά, ένα M-βCCS πρέπει να έχει νεφική ασπίδα,

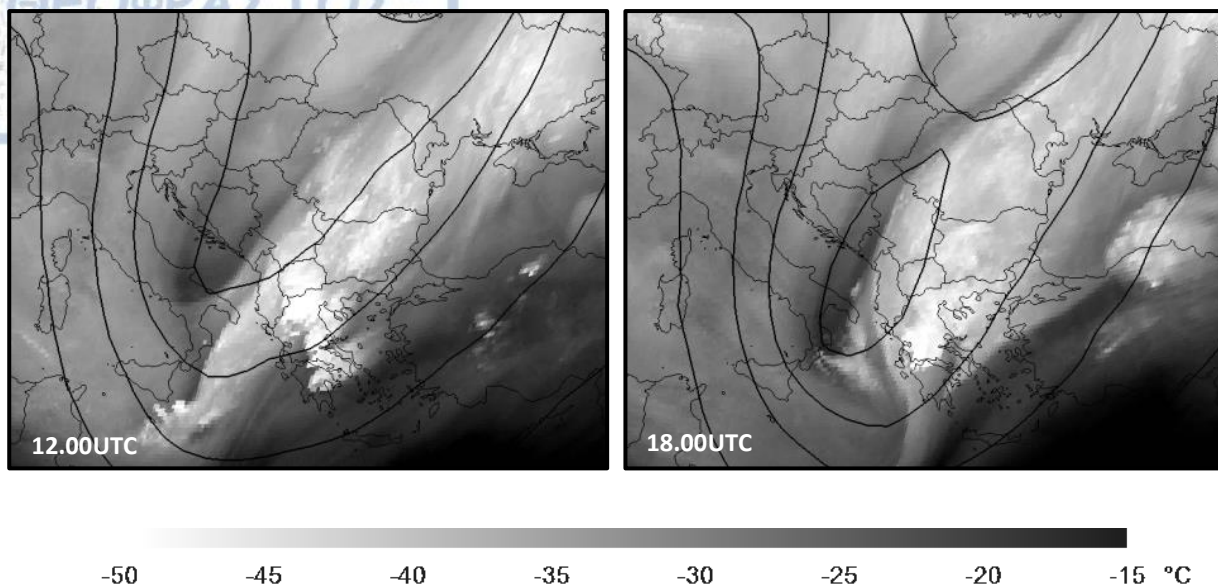
θερμοκρασίας κάτω των -52°C , της οποίας το μέγεθος ξεπερνά τα 30.000km^2 για τρεις ή και παραπάνω ώρες και έχει εκκεντρότητα ίση ή πάνω από 0,7 τη στιγμή της μέγιστης ανάπτυξης. Τέλος, όπως όλα τα καταιγιδοφόρα συστήματα μέσης κλίμακας, έτσι και αυτό χαρακτηρίζεται από τρία στάδια κύκλου ζωής: το πρώτο στάδιο γέννησης και ανάπτυξης, που πρόκειται για τη στιγμή που αρχίζουν να ικανοποιούνται τα κριτήρια μεγέθους του συστήματος για πρώτη φορά (02.00UTC-03.30UTC), το δεύτερο στάδιο ωριμότητας και μέγιστης έκτασης, οπότε η ψυχρή νεφική ασπίδα αγγίζει το μέγιστο μέγεθος (03.30UTC-05.30UTC) και το τρίτο στάδιο διάσπασης και τερματισμού, όταν πλέον το σύστημα δεν ικανοποιεί τα προαναφερόμενα κριτήρια μεγέθους (05.30UTC-06.00UTC). Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω, το σύστημα αυτό διήρκησε συνολικά 4 ώρες παραμένοντας σχεδόν στάσιμο.

Επιπρόσθετα, τα μικρότερα αυτά κυκλικά συστήματα έχουν το κοινό χαρακτηριστικό να εμφανίζονται στο τέλος Ιουλίου, σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα συστήματα μέσης κλίμακας, όπως τα MCC, που παρουσιάζουν μέγιστο συχνότητας εμφάνισης το Μάιο. Τέλος, ο Jirak κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα M-βCCS αγγίζουν το μέγιστο μέγεθος τις ώρες 02.00UTC-09.00UTC. Όλα αυτά τα συμπεράσματα ταιριάζουν απόλυτα με το σύστημα που μελετάται σε αυτή την παράγραφο.

β. Ανάλυση εικόνων στο κανάλι 5 των υδρατμών - WV 6.2μm

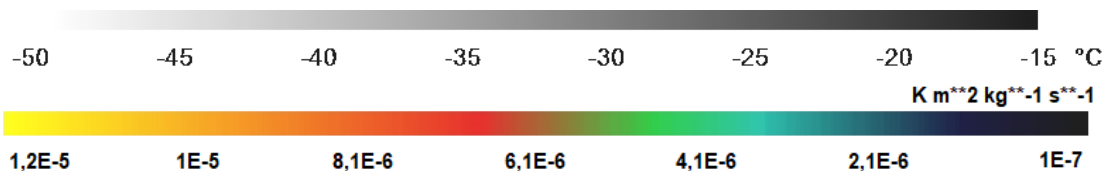
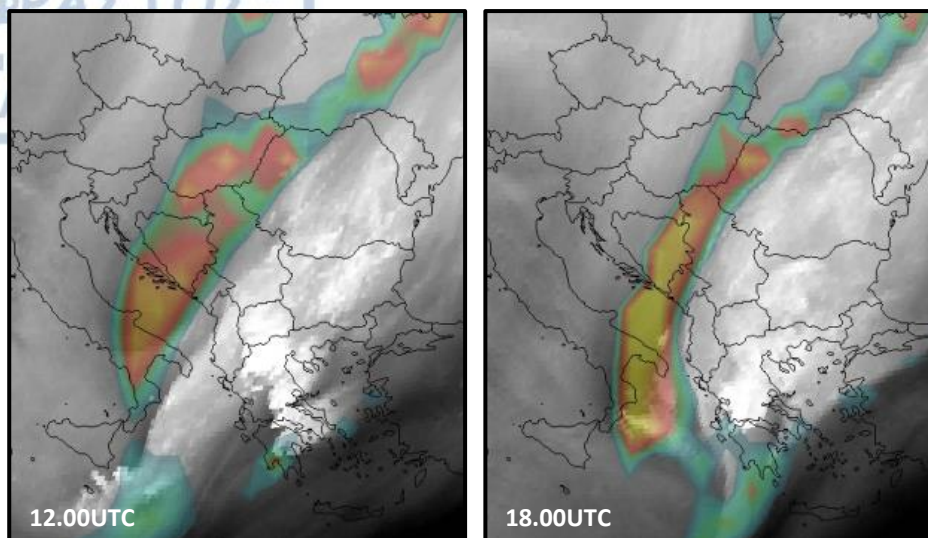
Το κανάλι 5 των υδρατμών είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρατήρηση της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Οι εικόνες των 6.2μm δίνουν μια σαφή εικόνα των δυναμικών συνθηκών και των ανέμων που επικρατούν στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας, δηλαδή γύρω στα 300hPa. Η βάση για τις συνοπτικές κλίμακας εφαρμογές των εικόνων των υδρατμών είναι οι υγρές - φωτεινές και ξηρές - σκούρες περιοχές, καθώς και τα όρια αυτών, οι οποίες σχετίζονται με σημαντικές ροές στην ανώτερη ατμόσφαιρα, όπως αυλώνες (troughs), ράχες (ridges), αεροχειμάρρους, στροβιλισμούς ή αποκομμένα συστήματα.

Στις 12.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου μια σκούρα-γκρι περιοχή εντοπίζεται πάνω από τις βορειοδυτικές χώρες της Βαλκανικής χερσονήσου και εκτείνεται μέχρι τη νότια Ιταλία. Η περιοχή αυτή συμπίπτει με τη θέση του αυλώνα της μέσης τροπόσφαιρας, ο οποίος έχει κατέλθει στην περιοχή λόγω της μετακίνησης του αζορικού αντικυκλώνα βορειοανατολικότερα. Έντονη ανωμεταφορά (Deep Convection) αναπτύσσεται στην εμπρόσθια πλευρά του ταχέως αναπτυσσόμενου αυλώνα, το οποίο επιβεβαιώνουν οι πολύ φωτεινές αποχρώσεις στην περιοχή όπου εντοπίζεται ο ανατολικός κλάδος του, δηλαδή στην γραμμή του μετώπου και πάνω από τον ελλαδικό χώρο.



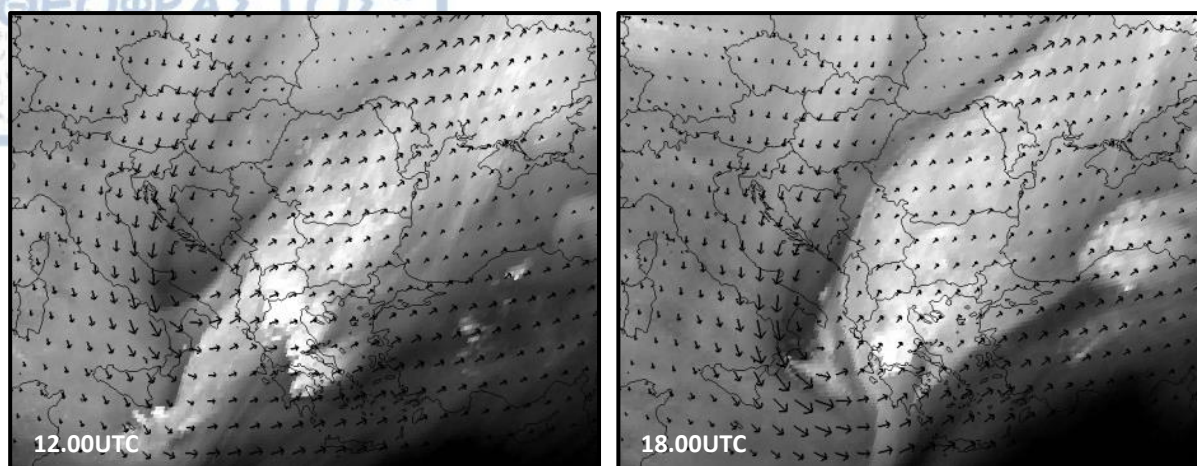
Σχ. 28. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών WV6.2 με υπέρθεση γεωδυναμικά ύψη στο επίπεδο των 500hPa, για τις 12.00UTC και 18.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου 2017

Επιπλέον, η σκούρα αυτή απόχρωση υποδηλώνει την απουσία υδρατμών στο επίπεδο αυτό, το οποίο συσχετίζεται με την εισβολή ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα στην ανώτερη τροπόσφαιρα, επακόλουθο της ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης. Πράγματι, οι παρακάτω εικόνες του Σχ. 29, στις οποίες έχει γίνει υπέρθεση των μέγιστων τιμών του δυναμικού στροβιλισμού στο ισοβαρικό επίπεδο των 300hPa, αποτυπώνουν την ‘μετακινούμενη’ ξηρή ζώνη της εικόνας των υδρατμών, η οποία σχετίζεται με την εξελισσόμενη ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης (12.00UTC και 18.00UTC). Όσο μεγαλύτερη η τιμή του δυναμικού στροβιλισμού στο επίπεδο των 300hPa, τόσο πιο χαμηλά εντοπίζεται η δυναμική τροπόπαυση των 2PVU στην περιοχή αυτή. Γι’ αυτό το λόγο οι σκούρες ζώνες στην εικόνα των υδρατμών, που σχετίζονται με χαμηλά ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης, συμπίπτουν με τις μεγαλύτερες τιμές του δυναμικού στροβιλισμού στα 300hPa. Αντίθετα, ανοιχτόχρωμες περιοχές της εικόνας σχετίζονται με μεγάλα ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης, και αυτό συμβαίνει επειδή, όταν η τροπόπαυση εντοπίζεται υψηλότερα, επιτρέπει τα νέφη να αναπτυχθούν αρκετά, φτάνοντας το ύψος του στρώματος που συνεισφέρει μέγιστα στην καταγραφόμενη από το κανάλι 5 ακτινοβολία, την οποία και θα αποδώσει με ανοιχτές αποχρώσεις στην δορυφορική εικόνα. Όπως έχει αποτυπωθεί και στη σχετική κατακόρυφη τομή, τα μεγαλύτερα ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης βρίσκονται μπροστά από την ανωμαλία και αποτελούν περιοχές με έντονα ανοδικά ρεύματα, τα οποία στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα επικρατούν πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας, όπου και επικρατούν έντονες βροχοπτώσεις που προέρχονται από νέφη που εκτείνονται μέχρι και την ανώτερη τροπόσφαιρα.



Σχ. 29. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών WV6.2 με υπέρθεση τις μέγιστες τιμές του δυναμικού στροβιλισμού στο επίπεδο των 300hPa, για τις 12.00UTC και 18.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου 2017. Οι μικρότερες τιμές του δυναμικού στροβιλισμού στα 300hPa έχουν αποκοπεί

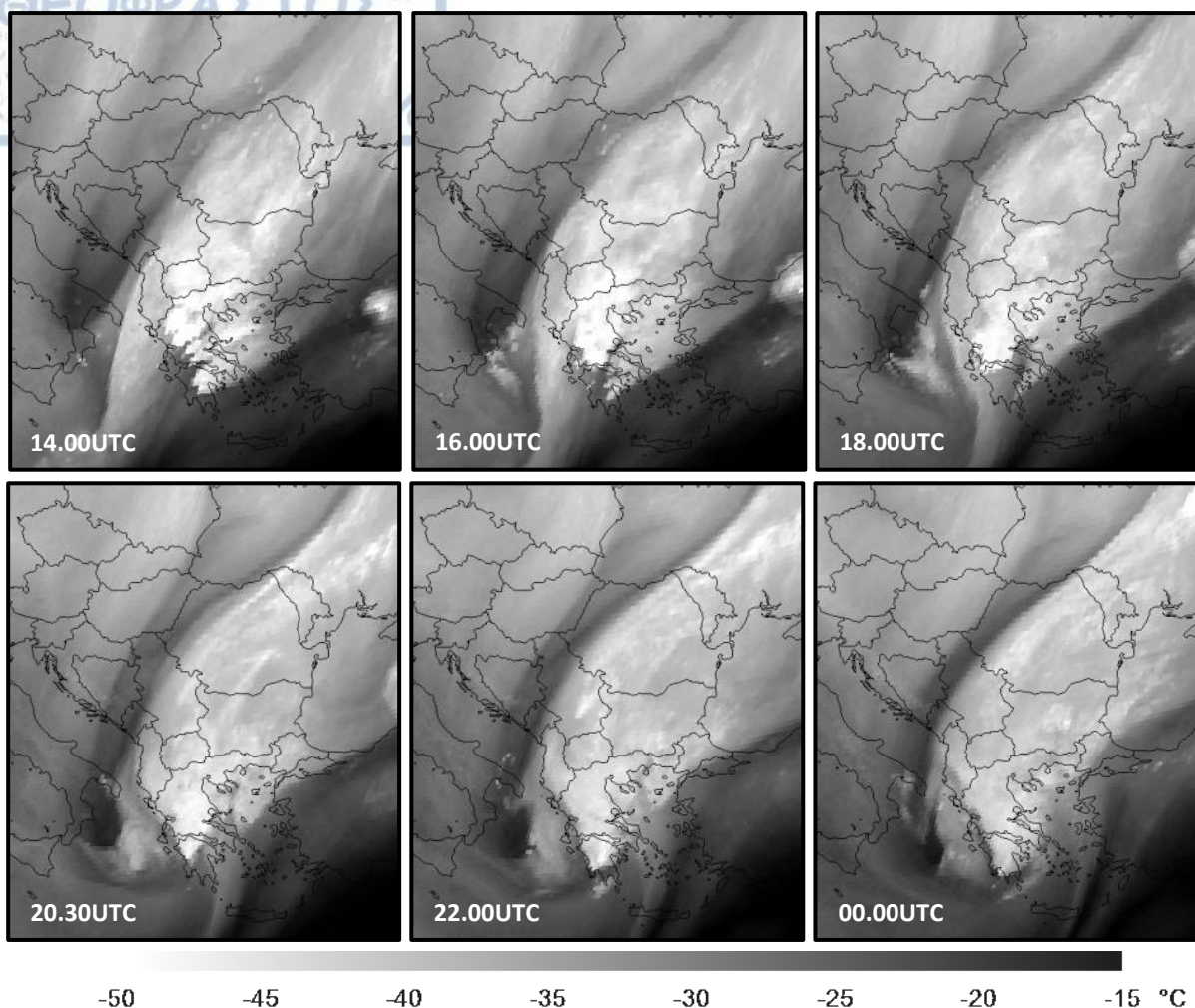
Τέλος, τα όρια ανάμεσα στις σκούρες και φωτεινές γκρι αποχρώσεις συνδέονται με ισχυρή βαθμίδα των υψών της δυναμικής τροπόπαυσης, το οποίο συνεπάγεται έντονη κλίση της τροπόπαυσης, καθώς επίσης αποτελούν και μεταβατικές ζώνες ανάμεσα σε διαφορετικά καθεστώτα ανέμου των ανώτερων επιπέδων της ατμόσφαιρας (Santurette and Georgiev, 2009). Περιοχές, λοιπόν, με απότομη αντίθεση στα επίπεδα του γκρι αποτελούν τις περιοχές με τις μεγάλες ταχύτητες ανέμου στην ανώτερη τροπόσφαιρα, το οποίο είναι ένδειξη της ύπαρξης αεροχειμάρρου. Σύμφωνα με τα παραπάνω και όπως επιβεβαιώνει και το διάγραμμα του ανέμου στην εικόνα των 12.00UTC (Σχ. 30), μέγιστες ταχύτητες ανέμου επικρατούν στον ανατολικό και δυτικό τομέα του αυλώνα, που αποτελούν και τους δυο κλάδους του αεροχειμάρρου. Ο δυτικός κλάδος του αεροχειμάρρου καθοδηγείται από την μετακίνηση της ράχης, που εντοπίζεται δυτικά του αυλώνα. Οι άξονες, λοιπόν, της μέγιστης ταχύτητας των δυο κλάδων του αεροχειμάρρου εκτείνονται κατά μήκος των νεφικών ορίων ή ορίων υγρασίας (Φείδας, 2017).



-50 -45 -40 -35 -30 -25 -20 -15 °C

Σχ. 30. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών WV6.2 με υπέρθεση την ένταση και διεύθυνση του ανέμου στο επίπεδο των 300hPa, για τις 12.00UTC και 18.00UTC της 16^{ης} Ιουλίου 2017

Στις επόμενες διαδοχικές δορυφορικές εικόνες (Σχ.31) παρατηρείται ότι η σκοτεινή γκρι ζώνη, που συνδέεται με την ξηρή στρατοσφαιρική εισβολή και την ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, πλησιάζει μια πιο ανοιχτόχρωμη περιοχή, η οποία χαρακτηρίζεται και από ανοδικά ρεύματα, εφόσον τοποθετείται μπροστά από την ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης. Παράλληλα, τα όρια της νεφικής αυτής περιοχής είναι ιδιαίτερα καλοσχηματισμένα από τα δυτικά της και δημιουργούν έναν κυματισμό, ο οποίος οφείλεται στον αεροχείμαρρο που διασχίζει το νεφικό σύστημα σε εκείνο το σημείο από τα δυτικά. Πρόκειται για την περιοχή που εξελίσσεται το MCS το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το έντονο φωτεινό χρώμα πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας σχετίζεται με το μεγάλο ύψος της τροπόπαυσης. Συγκεκριμένα, τις απογευματινές - βραδινές ώρες της 16^{ης} η τροπόπαυση εκτείνεται έως και τα 250hPa κατά μήκος του ηπειρωτικού κορμού. Στις 20.30UTC, μάλιστα, είναι εμφανές το σφηνοειδές σχήμα του συστήματος.

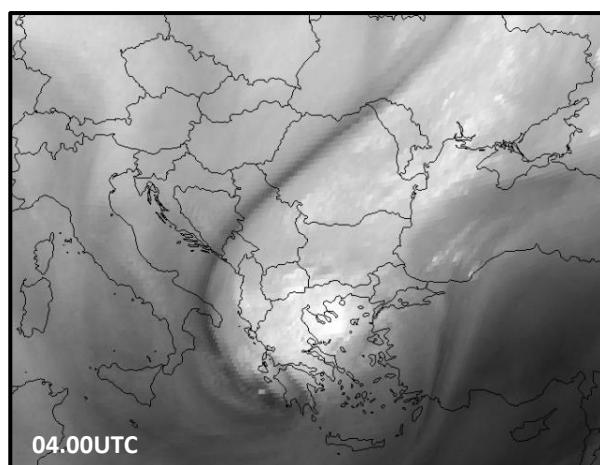


Σχ. 31. Διαδοχικές δορυφορικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών WV6.2, για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις εικόνες, λοιπόν, του Σχ. 31 διαπιστώνεται πως, με το πέρασμα της ώρας και καθώς η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης έχει κατέλθει μέχρι το Ιόνιο, η δυναμική τροπόπαυση έχει βαθύνει ακόμα περισσότερο στα δυτικά του συστήματος παρασέρνοντας ξηρό αέρα από τη στρατόσφαιρα ακόμα πιο χαμηλά στην τροπόσφαιρα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει η σκούρη απόχρωση στις παραπάνω WV εικόνες στα νοτιοανατολικά της Ιταλίας. Η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης και η ευνοϊκή διάταξη του αεροχειμάρρου, που διαταράσσουν την ανώτερη ατμόσφαιρα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη μιας βαροκλινικής ζώνης στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας, αποτελούν πρόδρομοι κυκλογένεσης (Georgiev and Santurette, 2009). Πράγματι, τις βραδινές ώρες της 16^{ης} η ατμόσφαιρα καθίσταται βαροκλινική στα κατώτερα στρώματα της στην περιοχή του Ιονίου. Η κυκλογένεση, λοιπόν, προκύπτει ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης και της βαροκλινικής ζώνης.

Έτσι, γύρω στις 00.00UTC το σύστημα αποκόπτεται από την κυκλοφορία, με κέντρο των χαμηλών πιέσεων το Ιόνιο. Καθώς το χαμηλό βαθαίνει, πάνω από το νότιο Ιόνιο και την

Πελοπόννησο οργανώνεται βορειοανατολική ροή με κατεύθυνση αντίθετη από τη ροή της ανώτερης ατμόσφαιρας. Η ροή των κατώτερων στρωμάτων σε συνδυασμό με τα ανοδικά ρεύματα παρασέρνουν τα νέφη που εντοπίζονται στη νότια Ελλάδα, προς τα βορειοανατολικά του κέντρου του χαμηλού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εκτεταμένου νεφικού συστήματος στην ευρύτερη περιοχή του βορειοδυτικού Αιγαίου, όπως αποτυπώνεται με έντονο φωτεινό χρώμα στην εικόνα των υδρατμών, στις 04.00UTC (Σχ. 32).

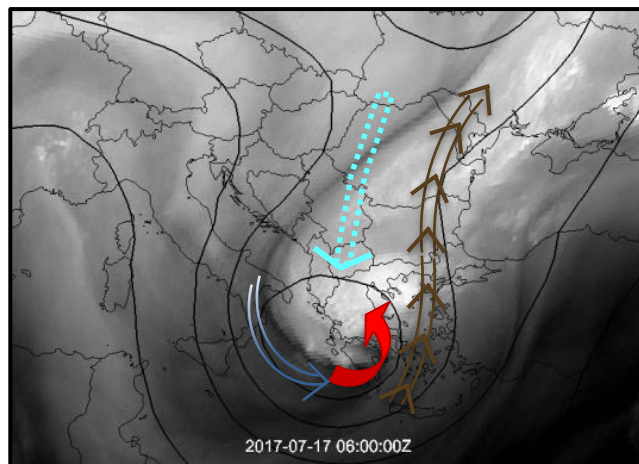
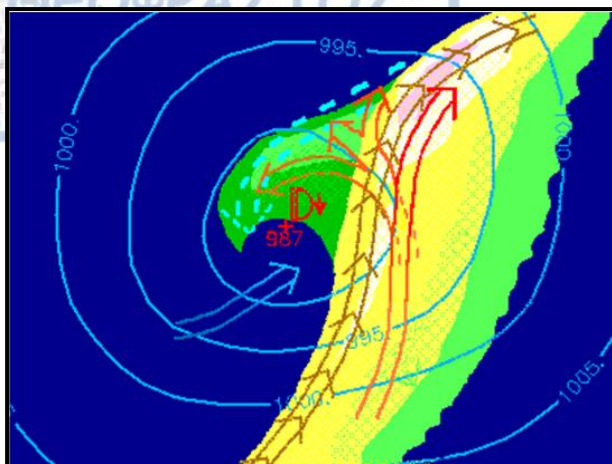


-50 -45 -40 -35 -30 -25 -20 -15 °C

Σχ. 32. Δορυφορική εικόνα στο κανάλι των υδρατμών WV6.2, για τις 04.00UTC της 17^{ης} Ιουλίου 2017

Το παρακάτω εννοιολογικό σχήμα (Σχ.33), στο οποίο αποτυπώνεται η κυκλογέννηση σε ανεπτυγμένη φάση, αποδίδει σχηματικά όσα έχουν περιγραφεί παραπάνω. Με πορτοκαλί και κόκκινο βέλος σημειώνεται η ροή των χαμηλότερων στρωμάτων που οργανώνεται από το βαρομετρικό χαμηλό, ενώ το καφέ βέλος δείχνει τη ροή της ανώτερης ατμόσφαιρας. Η βορειοανατολική ροή συγκεντρώνει τα νέφη βορειοανατολικά του χαμηλού, τα οποία αποκτούν μεγάλο ύψος λόγω των ανοδικών ρευμάτων και λόγω του ευνοϊκού ύψους της τροπόπαυσης (λευκή περιοχή στο Σχ. 33). Παράλληλα, το μπλε βέλος δείχνει ότι ο ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας εισχωρεί στη νότια μεριά του χαμηλού, ενώ το μπλε διακεκομμένο βέλος υποδεικνύει τον ψυχρό αέρα που έχει κατέλθει από τις βόρειες χώρες της Ευρώπης, παρασυρόμενος από τον αυλώνα, ο οποίος εισέρχεται στη βόρεια πλευρά του χαμηλού.

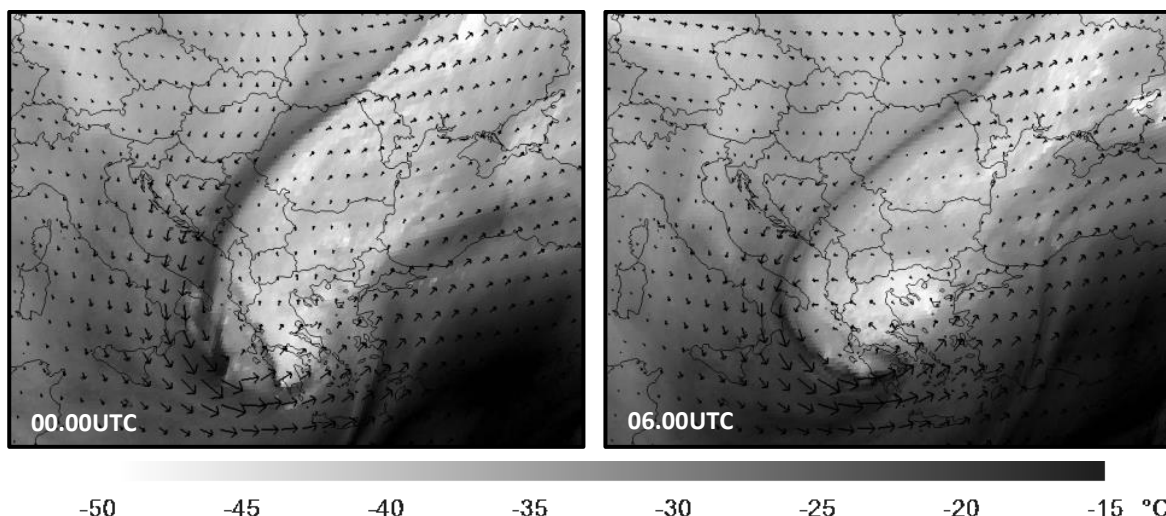
Στη δορυφορική εικόνα του Σχ. 33 σημειώνονται με τα αντίστοιχα χρώματα οι ροές της κατώτερης και ανώτερης ατμόσφαιρας, καθώς και οι ψυχρές ροές ανέμων σκανδιναβικής και στρατοσφαιρικής προέλευσης.



Σχ. 33. (Αριστερά) Εννοιολογικό σχήμα απεικόνισης της κυκλογένεσης σε ανεπτυγμένη φάση. (Δεξιά) Δορυφορική εικόνα στο κανάλι των υδρατμών WV6.2 με υπέρθεση τα γεωδυναμικά ύψη στο επίπεδο των 500hPa και απεικόνιση των ροών της ατμόσφαιρας, για τις 06.00UTC της 17^{ης} Ιουλίου 2017

Από τα παραπάνω, επιπλέον, προκύπτει πως, όσον αφορά στην κατώτερη τροπόσφαιρα, ψυχρές αέριες μάζες εντοπίζονται στην περιοχή του ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδας, όμως οι ψυχρότερες μάζες καθ' ύψος βρίσκονται στην περιοχή νοτιοανατολικά της Ιταλίας, οι οποίες προέρχονται από την ξηρή στρατοσφαιρική εισβολή. Έτσι, το μέτωπο που βρίσκεται στην περιοχή του Αιγαίου έχει χαρακτηριστικά ανά-μετώπου.

Τέλος, στις WV εικόνες των 00.00UTC και 06.00UTC σε παράθεση με τον άνεμο στα 300hPa, αποτυπώνεται χαρακτηριστικά η βαθμίδα της υγρασίας στην κεντρική και ανατολική Μεσόγειο, η οποία και υποδηλώνει την ύπαρξη κλάδου του αεροχειμάρρου στη συγκεκριμένη περιοχή και που όντως είναι σε συμφωνία με την αποτυπωμένη ζώνη ενισχυμένων ανεμών.



Σχ. 34. Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι των υδρατμών WV6.2 με υπέρθεση την ένταση και διεύθυνση του ανέμου στο επίπεδο των 300hPa, για τις 00.00UTC και 06.00UTC

γ. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch5-Ch6 ($T_{6.2}-T_{7.3}$)

Οι εικόνες είναι αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας μεταξύ των καναλιών WV6.2 και WV7.3 (5-6).

Στις εικόνες υποδεικνύεται το ύψος της κορυφής των νεφών. Συγκεκριμένα, ανιχνεύονται οι κορυφές πολύ υψηλών νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (convective cloud tops) που φτάνουν στο ύψος της τροπόπαυσης ή την ξεπερνούν.

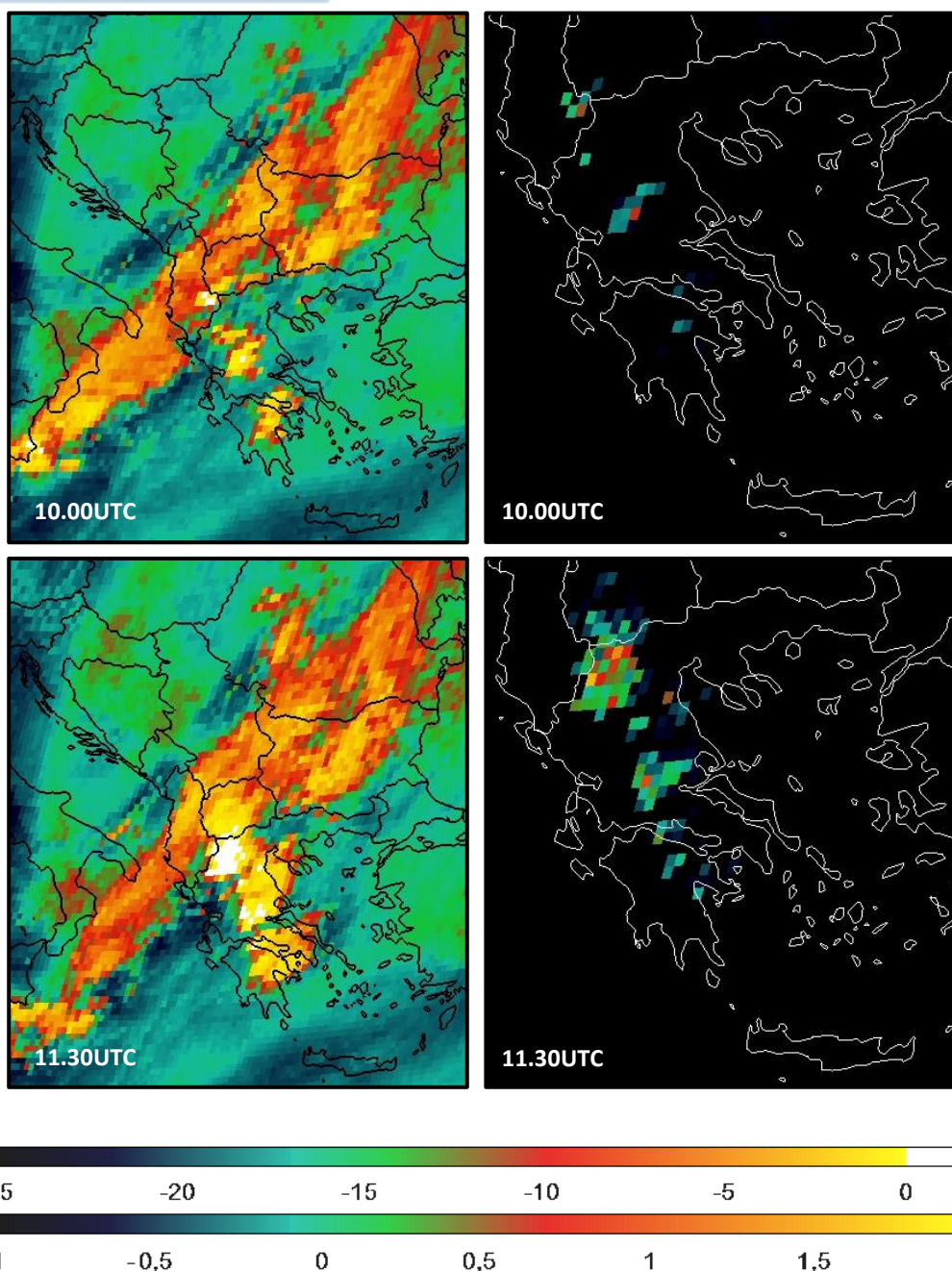
Τιμές BTDs κοντά στο μηδέν ή θετικές υποδεικνύουν την ύπαρξη κορυφών νεφών που εισβάλουν στην τροπόπαυση. Αρνητικές τιμές BTDs αποτελούν ένδειξη για χαμηλότερα νέφη.

$$T_{6.2} - T_{7.3} \approx 0 \text{ ή } >0 \rightarrow \text{υψηλά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης}$$
$$T_{6.2} - T_{7.3} < 0 \rightarrow \text{χαμηλά νέφη}$$

Οι εικόνες της διαφοράς θερμοκρασίας των δυο καναλιών έχουν δημιουργηθεί με χρωματική διαβάθμιση, ούτως ώστε να οπτικοποιούνται οι περιοχές με χαμηλή ή υψηλή νέφωση. Η κλίμακα κυμαίνεται μεταξύ των -25°C και 2°C . Το κατώφλι που χρησιμοποιείται στις εικόνες με κυρίαρχο το μαύρο φόντο είναι από -1°C έως 2°C , με σκοπό να εστιαστούν οι κορυφές των νεφών με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη. Επίσης, παρατίθενται εικόνες IR10.8, με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από τους -40°C και κάτω.

Στις 10.00UTC η θέση του μετώπου που εκτείνεται από τα δυτικά παράλια της Μαύρης Θάλασσας έως τη νότια Ιταλία είναι εμφανής στις εικόνες της διαφοράς των καναλιών των υδρατμών (Σχ.35), κατά μήκος των κίτρινων αποχρώσεων. Σε δυο περιοχές, στα σύνορα με Αλβανία και Βόρεια Μακεδονία (στην περιοχή των Πρεσπών) και στα νοτιότερα όρη της Πίνδου, εντοπίζονται οι πρώτες υψηλές κορυφές νεφών έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης, με θερμοκρασίες κάτω των -50°C . Οι εικόνες με το κατώφλι των -1°C έως 2°C αποδεικνύουν την ύπαρξη τους. Τα νέφη, αυτά, ενώνονται αργότερα με νέα νεφικά κύτταρα τα οποία έχουν γεννηθεί κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου, με αποτέλεσμα στις 11.30UTC η νεφική μάζα, αποτελούμενη από πολύ υψηλά νέφη, να καλύπτει τη δυτική Μακεδονία και κεντρική Στερεά Ελλάδα. Οι ψυχρές κορυφές των νεφών αυτών φαίνεται να έχουν ξεπεράσει την τροπόπαυση, όπως είναι ξεκάθαρο στη δεξιά εικόνα, αγγίζοντας την ελάχιστη θερμοκρασία των $-58,3^{\circ}\text{C}$. Χάρη σε αυτή την εικόνα είναι δυνατή η παρακολούθηση της κίνησης και επέκτασης των προεξέχουσων κορυφών (Overshooting Tops). Παρατηρείται, επίσης, ότι κατά μήκος του μετώπου, τα νέφη που επικρατούν πλέον είναι χαμηλότερου ύψους (πορτοκαλί απόχρωση στην αριστερή εικόνα), φτάνοντας θερμοκρασίες κορυφών από -40°C έως -45°C , ενώ η οριζόντια έκταση τους καλύπτει μεγάλο μέρος της Βαλκανικής χερσονήσου και το

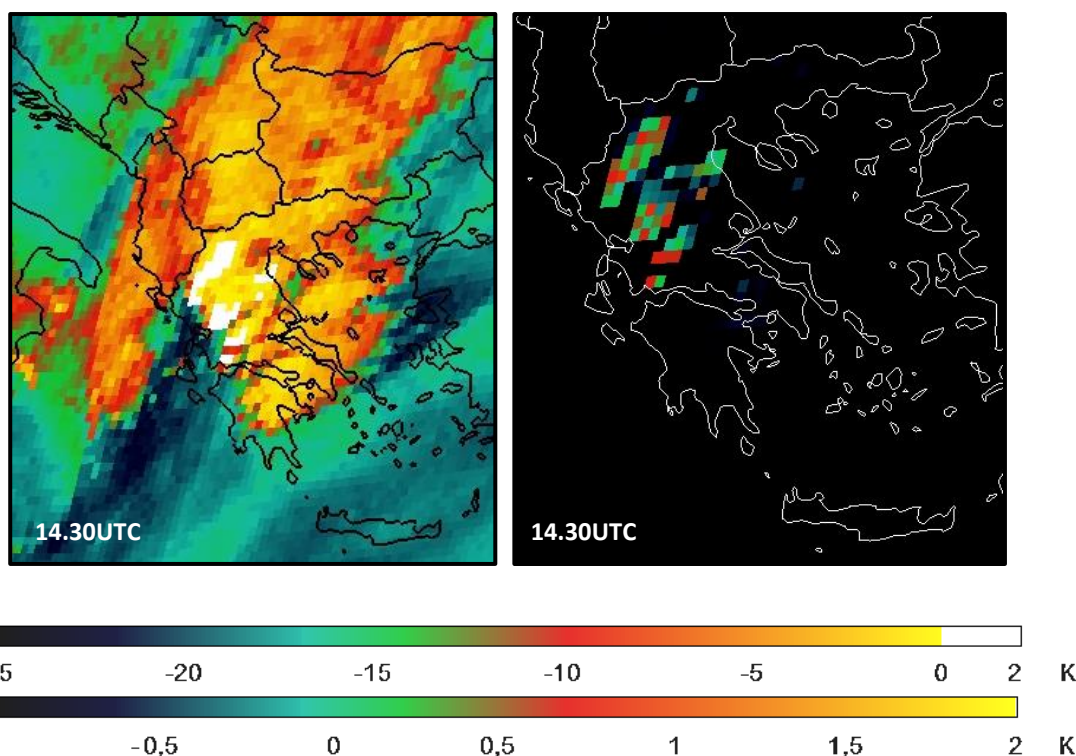
βόρειο Ιόνιο. Στη δεξιά εικόνα (Σχ.35) τα νέφη αυτά έχουν αποκοπεί λόγω του φίλτρου που έχει εφαρμοστεί.



Σχ. 35. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch6 με κατώφλι από -25°C έως 2°C (αριστερά) και από -1°C έως 2°C (δεξιά), για τις 16 Ιουλίου 2017

Μέσα στις επόμενες ώρες (13.00UTC έως 16.00UTC) νέοι πυρήνες γεννιούνται αρχικά δυτικά της οροσειράς της Πίνδου και έπειτα πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό, συνθέτοντας ένα σύμπλεγμα πολυκύτταρων καταιγίδων, με κορυφές που φτάνουν το ύψος της τροπόπαυσης, γεγονός που προκύπτει από τις θετικές ή πολύ κοντά στο μηδέν τιμές της διαφοράς των δυο καναλιών στις εικόνες των 14.30UTC (Σχ.36). Χαρακτηριστικά, στις εικόνες του Σχ.36

αποτυπώνονται οι δυο οργανωμένες νεφικές μάζες που έχουν αναπτυχθεί παράλληλα στη γραμμή του μετώπου. Από τη διαφορετική χρωματική διαβάθμιση των ψυχρών κορυφών στη δεξιά εικόνα (Σχ.36) γίνεται αντιληπτό το διαφορετικό ύψος στο οποίο εκτείνονται τα διαφορετικά cumulonimbus που συνθέτουν το σύμπλεγμα, που όμως όλα προσεγγίζουν την τροπόπαυση. Στην απότομη κατακόρυφη ανύψωση οφείλεται η ύπαρξη των ορεινών όγκων της Πίνδου, καθώς η ορογραφία αποτελεί ένα από τα μηχανικά αίτια ανύψωσης δείγματος αέρα και συμπύκνωσης αυτού, κυρίως όμως η μετωπική επιφάνεια πάνω στην οποία ανέρχεται ο θερμός υγρός αέρας. Μεσαία και χαμηλά νέφη καλύπτουν πλέον τις νότιες χώρες των Βαλκανίων και το Αιγαίο. Το νεφικό στρώμα που καλύπτει το Αιγαίο οφείλεται στο επιφανειακό χαμηλό της Τουρκίας, το οποίο διατηρεί ένα βορειοανατολικό ρεύμα θερμού αέρα, ο οποίος εμπλουτίζεται με υγρασία πάνω από το Αιγαίο. Μετά τις 16.00UTC το καταιγιδοφόρο σύστημα αρχίζει να περιορίζεται στα βόρεια και κεντρικά της χώρας και να μετατοπίζεται νοτιότερα.

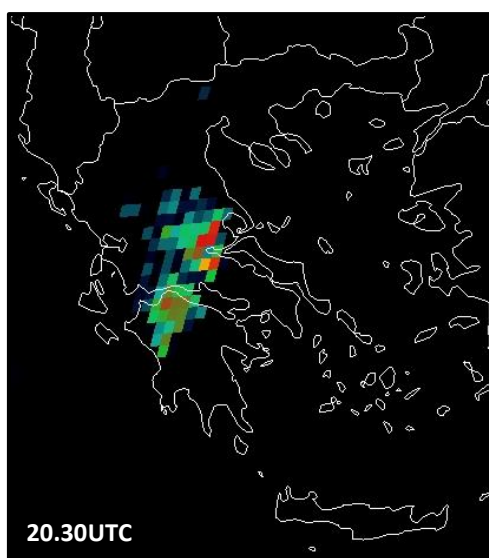
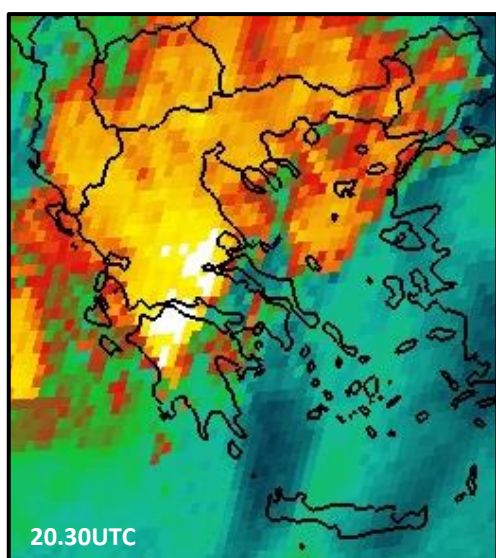
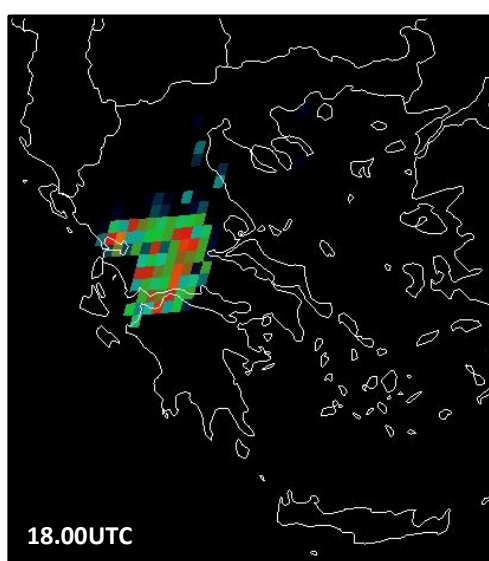
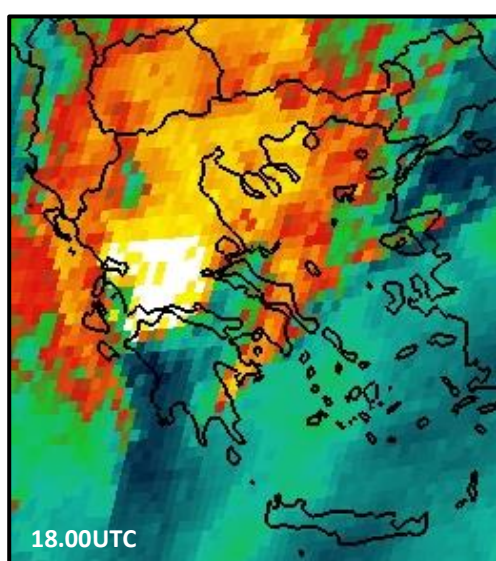


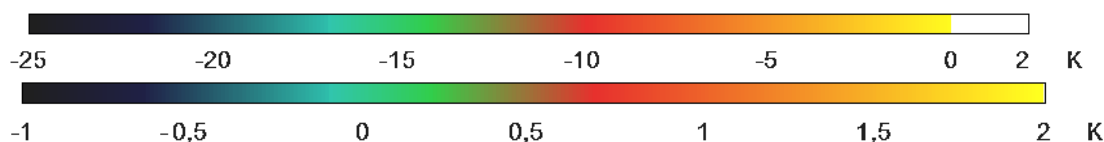
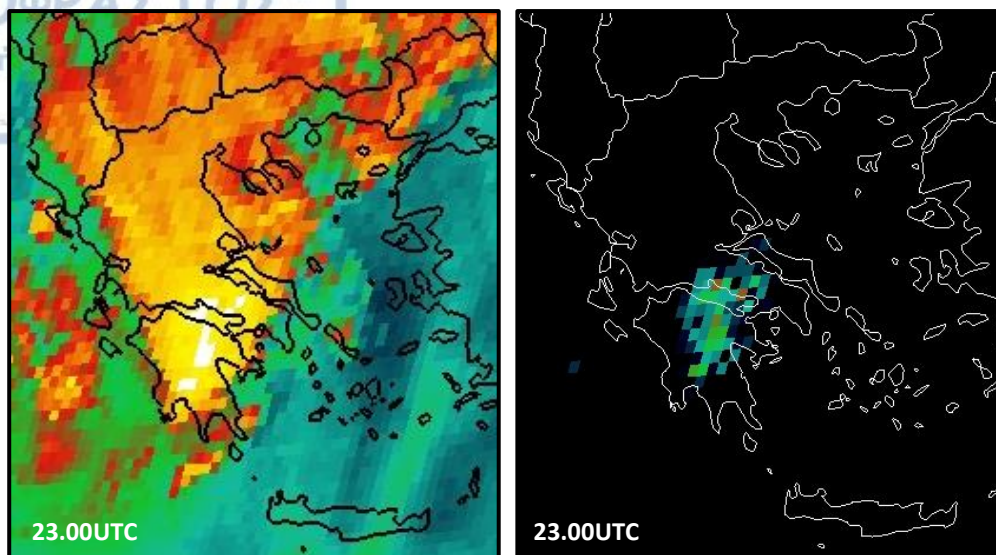
Σχ. 36. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch6 με κατώφλι από -25°C έως 2°C (αριστερά) και από -1°C έως 2°C (δεξιά), για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις 18.00UTC, ανατολικά του κέντρου του χαμηλού, το οποίο εντοπίζεται νοτιοανατολικά της Ιταλίας, μια αρκετά εκτεταμένη περιοχή στα νότια ηπειρωτικά καλύπτεται από σημαντικά ανεπτυγμένα καθ' ύψος νέφη, όπως φαίνεται από τις θετικές τιμές διαφοράς των εικόνων στη δεξιά εικόνα, τα οποία έδωσαν αρκετά έντονα φαινόμενα και μεγάλα ύψη υετού στη δυτική Στερεά Ελλάδα και ευρύτερα τις απογευματινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου. Ο νεφικός

σηματισμός αρχίζει σταδιακά να διαμορφώνεται, ώστε λίγο αργότερα θα αποκτήσει ενισχυμένο σχήμα-V. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτή έπαιξε η ευνοϊκή θέση των υπερυψωμένων κορυφών, οι οποίες στις εικόνες των 20.30UTC (Σχ. 37) εντοπίζονται στην περιοχή των ανοδικών ρευμάτων.

Καθώς η ψυχρή μεταφορά από τις βόρειες χώρες της Ευρώπης έχει μετατοπίσει το μέτωπο νοτιοανατολικότερα, παρασύρει και το καταιγιδοφόρο σύστημα το οποίο έχει επεκταθεί μέχρι την Πελοπόννησο. Μέχρι τις 23.00UTC, οπότε και συνεχίζονται τα έντονα καιρικά φαινόμενα στην περιοχή, ολόκληρη σχεδόν η Πελοπόννησος ήταν καλυμμένη από νέφη μεσαίας και κατά τόπους μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης με κορυφές που έφταναν έως την τροπόπαυση.

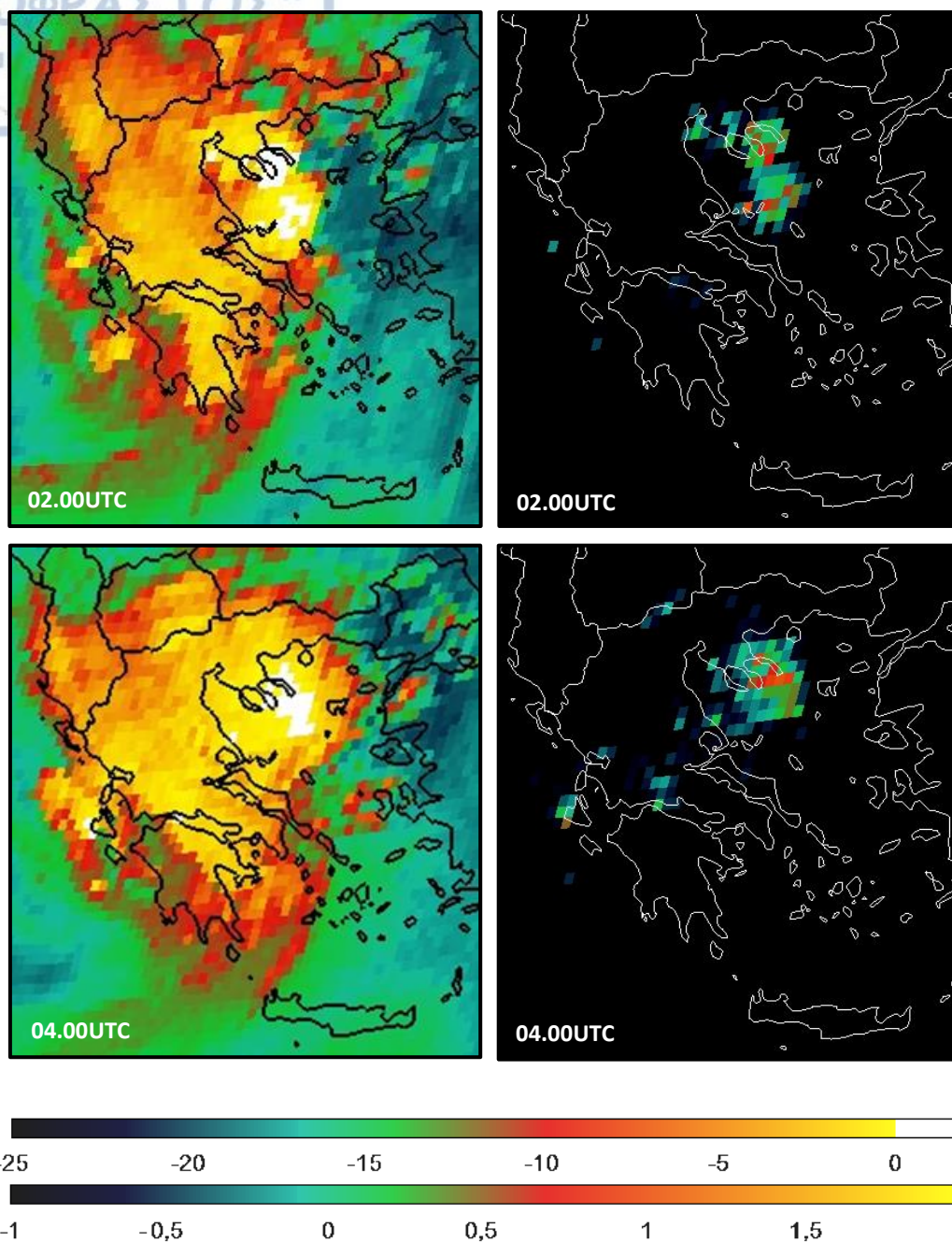




Σχ. 37. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch6 με κατώφλι από -25°C έως 2°C (αριστερά) και από -1°C έως 2°C (δεξιά), για τις 16 Ιουλίου 2017

Στο επόμενο διάστημα (01.00UTC έως 05.00UTC) το MCS έχει μετατοπιστεί και οργανωθεί πάνω από την περιοχή των Σποράδων και νότια της Χαλκιδικής. Παρ'ολ'αυτά σε ολόκληρο τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας συνεχίζουν να εντοπίζονται μικρές αρνητικές τιμές στη διαφορά των καναλιών, το οποίο υποδηλώνει νεφοκάλυψη. Στις εικόνες των 02.00UTC (Σχ. 38) είναι φανερό πως, κατά την εκκίνηση του τελευταίου ισχυρού καταιγιδόφρου συστήματος διακρίνονται δυο ξεχωριστοί πυρήνες οι οποίοι καθώς επεκτείνονται, ενώνονται δίνοντας μια εκτεταμένη περιοχή με θετικές τιμές διαφοράς. Η εκτεταμένη αυτή νεφική περιοχή, με τις κορυφές των νεφών που φτάνουν μέχρι την τροπόπαυση, θα παραμείνει για αρκετές ώρες πάνω από την περιοχή των Σποράδων και της Χαλκιδικής, η οποία τελικά θα καταλήξει στις 05.00UTC να βρίσκεται πάνω από τη Χαλκιδική, λίγο πριν αρχίσει το σύστημα να διαλύεται.

Τέλος, τις πρωινές ώρες τις 17^{ης} Ιούλη και ενώ το σύστημα είχε εξασθενήσει, στο βόρειο Αιγαίο αναπτύχθηκε πυρήνας μικρότερης έκτασης σε σχέση με όσους προηγήθηκαν, που όμως έφτανε σε σημαντικό ύψος στην τροπόσφαιρα.



Σχ. 38. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch6 με κατώφλι από -25°C έως 2°C (αριστερά) και από -1°C έως 2°C (δεξιά), για τις 17 Ιουλίου 2017

δ. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch5-Ch9 ($T_{6.2}-T_{10.8}$)

Οι εικόνες είναι αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας μεταξύ των καναλιών WV6.2 και IR10.8 (5-9).

Οι εικόνες αυτής της διαφοράς δίνουν κοινές πληροφορίες με αυτές της διαφοράς Ch5-Ch6 όσον αφορά το ύψος των νεφών στην ατμόσφαιρα. Δύναται, δηλαδή, ο εντοπισμός των

κορυφών νεφών που φτάνουν στο ύψος της τροπόπαυσης ή την ξεπερνούν. Θετικές τιμές BTDs αποκαλύπτουν την ύπαρξη υγρασίας πάνω από την τροπόπαυση, που ουσιαστικά πρόκειται για καταιγιδοφόρα νέφη τα οποία έχουν ξεπεράσει την τροπόπαυση και έχουν εισβάλει στη στρατόσφαιρα (προεξέχουσες κορυφές-Overshooting Tops). Η διάφορα BT παίρνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν πάνω από υψηλά νέφη που όμως δεν ξεπερνούν την τροπόπαυση και αρνητικές πάνω από χαμηλή ή μεσαία νέφη:

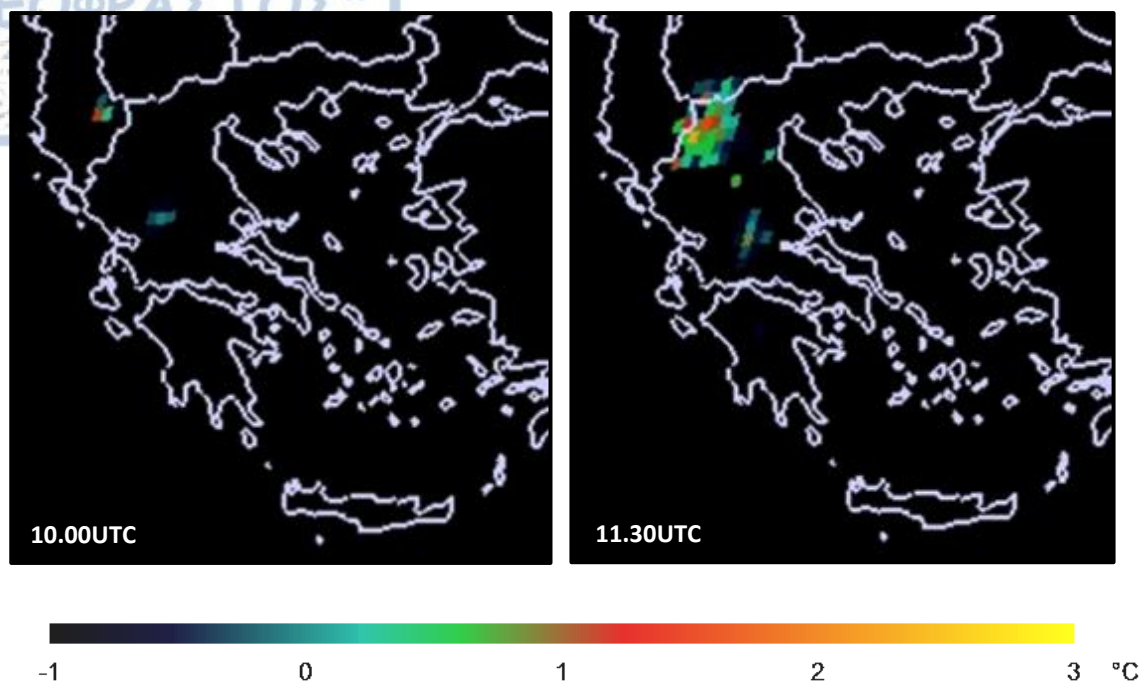
$T_{6.2} - T_{10.8} > 0 \rightarrow$ υψηλά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με προεξέχουσες κορυφές

$T_{6.2} - T_{10.8} \approx 0 \rightarrow$ υψηλά νέφη

$T_{6.2} - T_{10.8} < 0 \rightarrow$ χαμηλά και μεσαία νέφη

Για το σκοπό αυτό έχει εφαρμοστεί κατώφλι θερμοκρασιών στη χρωματική κλίμακα από -1°C διάφορα θερμοκρασίας λαμπρότητας και πάνω, ούτως ώστε να αναγνωριστούν υψηλά νέφη, με τιμές από -1°C έως 0°C , καθώς επίσης και οι προεξέχουσες κορυφές υψηλών νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης, με θετικές τιμές. Τα χρώματα της κλίμακας αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της κλίμακας και άρα σε διαφορετικά ύψη των κορυφών των νεφών στην ατμόσφαιρα.

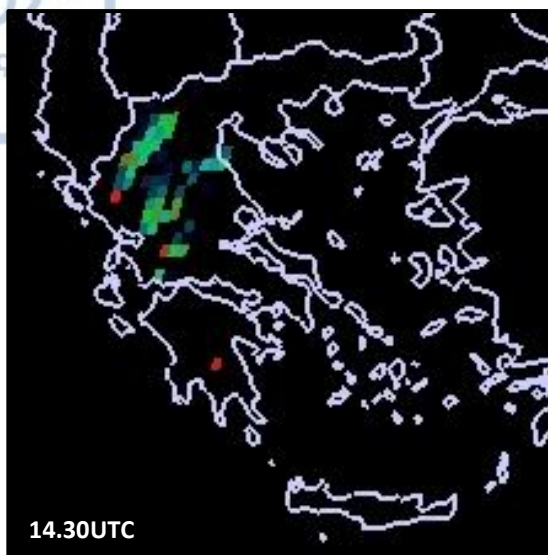
Οι πρώτες ανεπτυγμένες κορυφές νεφών εμφανίζονται στις 10.00UTC. Το νεφικό στρώμα που εντοπίζεται στη βορειοδυτική Μακεδονία, αναπτύσσεται μπροστά από τη μετωπική επιφάνεια, που ως γνωστόν αυτή είναι η περιοχή έντονων ανοδικών κινήσεων. Γι' αυτό και στη διάρκεια των επόμενων τριών ωρών το νεφικό στρώμα παρουσιάζει τόσο κατακόρυφη όσο και οριζόντια ανάπτυξη. Μάλιστα, στις 11.30UTC εντοπίζεται προεξέχουσα κορυφή (πορτοκαλί απόχρωση) πάνω από την ψυχρή νεφική ασπίδα, η οποία ξεπερνά την τροπόπαυση φτάνοντας σε σημαντικό ύψος, όπως φαίνεται από τις θετικές τιμές διαφοράς που έχει αποκτήσει η εικόνα Ch5-Ch9 του Σχ. 39 (τιμή διαφοράς γύρω στο $+1^{\circ}\text{C}$). Η προεξέχουσα κορυφή αγγίζει την ελάχιστη θερμοκρασία που πρόκειται να καταγραφεί καθ' όλη τη χρονική εξέλιξη του MCS, που είναι οι $-58,3^{\circ}\text{C}$. Η συγκεκριμένη νεφική μάζα οφείλει την κατακόρυφη ανάπτυξη της στη θέση της, η οποία εντοπίζεται στην περιοχή όπου επικρατούν ανοδικά ρεύματα λόγω της ολίσθησης των θερμών αέριων μαζών πάνω στις ψυχρές, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η ορογραφία της περιοχής. Επιπλέον, πέρα από την κατακόρυφη, σημαντικά μεγάλη είναι και η οριζόντια έκταση που καταλαμβάνει η ψυχρή νεφική ασπίδα, σύμφωνα με τη έκταση της πράσινης και κόκκινης περιοχής στην εικόνα, που απεικονίζουν νέφος που διαπερνά την τροπόπαυση. Όσον αφορά τη διάρκεια, η καλά σχηματισμένη προεξέχουσα κορυφή παραμένει στο κατώτερο επίπεδο της στρατόσφαιρας για περίπου 40 λεπτά.



Σχ. 39. Διαφορά καναλιών Ch5- Ch9 με κατώφλι από -1°C έως 3°C , για τις 16 Ιουλίου 2017

Μέχρι τις 13.00UTC ο νεφικός σχηματισμός έχει εξαπλωθεί προς τα κεντρικά της χώρας καλύπτοντας ολόκληρο τον ηπειρωτικό κορμό μέχρι τα δυτικά παράλια του Αιγαίου, ενώ το ύψος των νεφών έχει μειωθεί, έχοντας αποκτήσει τη θερμοκρασία των -52°C .

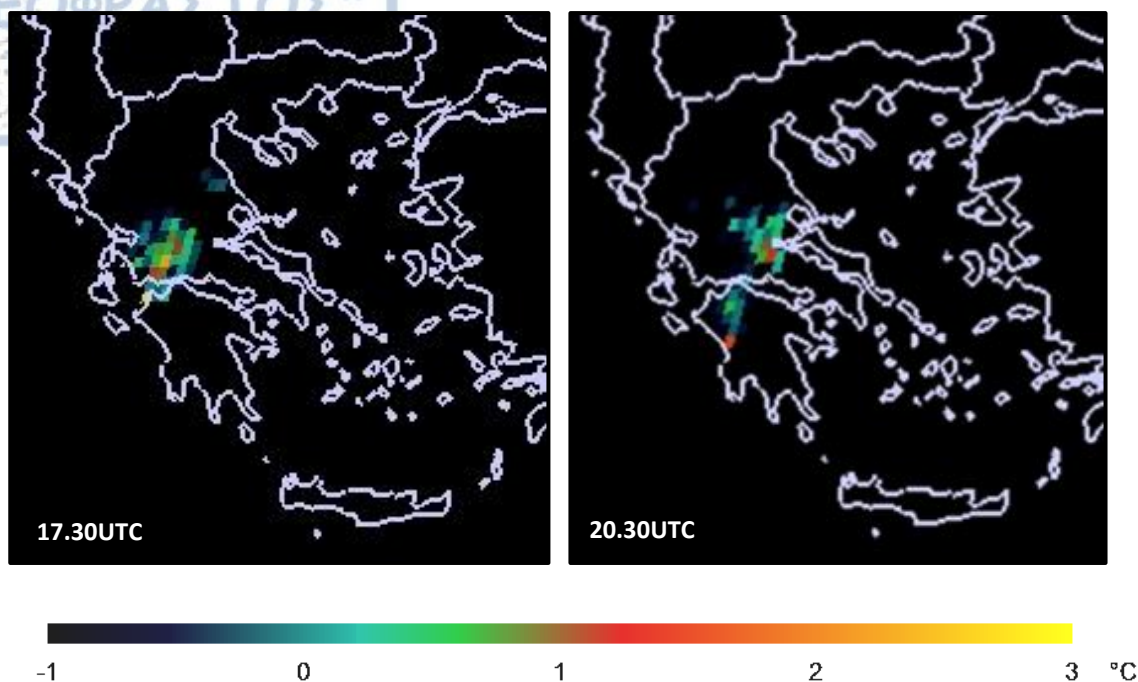
Μέσα στις επόμενες τρεις ώρες, κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου γεννιούνται νέα κύτταρα, τα οποία συνθέτουν ένα σύμπλεγμα πολυκύτταρων καταιγίδων. Η δορυφορική εικόνα διαφοράς των Ch5-Ch9 (Σχ. 40) για τις 14.30UTC υποδεικνύει με τις θετικές τιμές την ανάπτυξη των νεφικών κυττάρων πάνω από το ύψος της τροπόπαυσης. Σύμφωνα με την ανάλυση στις εικόνες του υπερύθρου, το καταιγιδοφόρο, αυτό, σύμπλεγμα αποτελείται από νεφικά κύτταρα που βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο ζωής, με τα περισσότερα ώριμα να εντοπίζονται στο κέντρο του συστήματος. Η εικόνα των 14.30UTC (Σχ. 40) και συγκεκριμένα η διαφορετική απόχρωση των κορυφών των νεφών επιβεβαιώνει τα παραπάνω.



Σχ. 40. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch9 με κατώφλι από -1°C έως 3°C , για τις 16 Ιουλίου 2017

Τις απογευματινές ώρες και καθώς το MCS έχει κινηθεί και επεκταθεί νοτιότερα στη χώρα λόγω της αντίστοιχης μετακίνησης του ψυχρού μετώπου, γεννιέται ένα νέο νεφικό κύτταρο σημαντικού ύψους και έκτασης, το οποίο οφείλεται στο χαμηλό, δυτικά της διαταραχής, σε συνδυασμό με τη διάταξη του αεροχειμάρρου, τα οποία σχολιάζονται εκτενέστερα στις εικόνες RGB Airmass. Χαρακτηριστική είναι η Ο.Τ. που εμφανίζεται στις 17.30UTC, στο Σχ. 41, με κίτρινη απόχρωση τη στιγμή δημιουργίας του νέου συστήματος, λαμβάνοντας τιμή διαφοράς λίγο πάνω από $+1^{\circ}\text{C}$ και έχοντας θερμοκρασία κορυφής $-57,7^{\circ}\text{C}$. Συνεχίζοντας τη μελέτη των εικόνων Ch5-Ch9, διαπιστώνεται πως, έως τις 20.30UTC και καθώς το σύστημα σχήματος-V συνεχίζει να είναι σε εξέλιξη, εκτεταμένες περιοχές των νεφών με ελάχιστες θερμοκρασίες γύρω στους -53°C εντοπίζονται να εκτείνονται πάνω από το ύψος της τροπόπαυσης, εφόσον οι τιμές διαφοράς που λαμβάνουν είναι μεταξύ 0°C και $+1^{\circ}\text{C}$. Τα νέφη αυτά, που εκτείνονται σε τόσο μεγάλο ύψος, πυροδοτούνται από τα ανοδικά ρεύματα που επικρατούν στην περιοχή

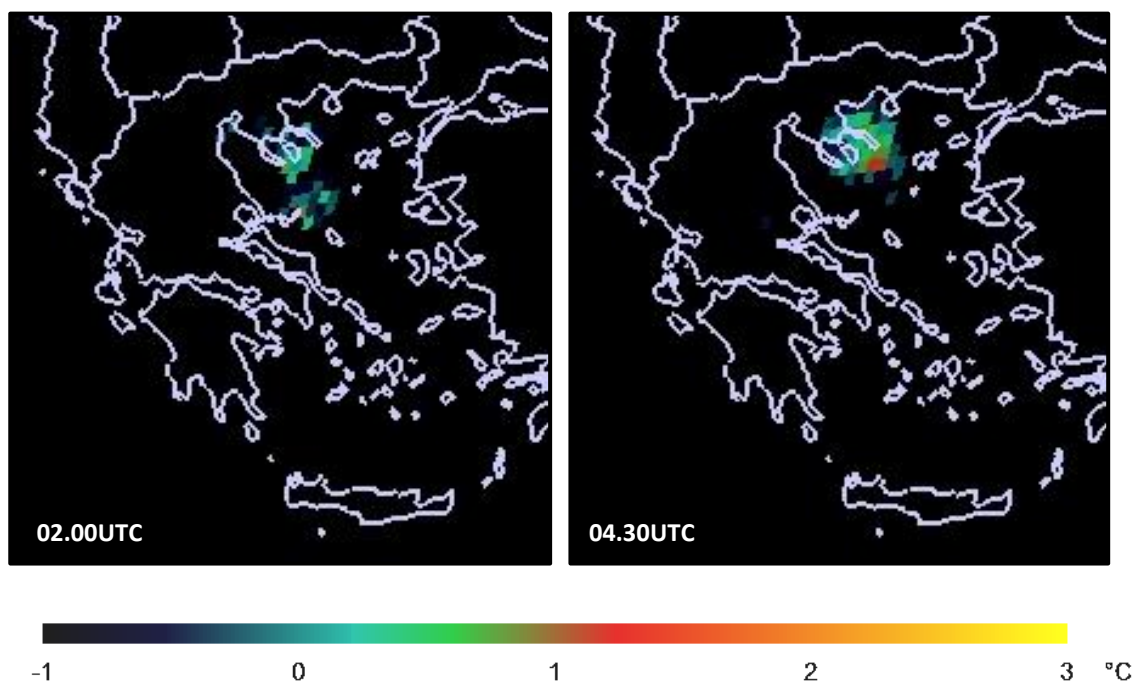
Τις βραδινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου οι κορυφές των νεφών θα συνεχίσουν να διατηρούνται σε μεγάλο ύψος πάνω από την Πελοπόννησο, όμως χωρίς να ξεπερνούν το ύψος της τροπόπαυσης. Παρ'όλ'αυτά, τα νέφη είναι αρκετά αναπτυγμένα ώστε να συνεχιστούν οι βροχοπτώσεις στην περιοχή.



Σχ. 41. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch9 με κατώφλι από -1°C έως 3°C , για τις 16 Ιουλίου 2017

Αργότερα, μετά τις 02.00UTC, οπότε το σύστημα έχει μετακινηθεί βορειοανατολικά και εντοπίζεται στην ευρύτερη περιοχή του βόρειου-βορειοδυτικού Αιγαίου, αρχίζει να δημιουργείται ένα νέο εκτεταμένο νεφικό σύστημα, το οποίο προέκυψε από την ένωση δυο ξεχωριστών νεφικών κυττάρων. Ένα γενικότερο συμπέρασμα είναι πως συγκρίνοντας με τις αναπτύξεις της προηγούμενης ημέρας, ο συγκεκριμένος νεφικός σχηματισμός παρουσίασε μεγαλύτερη διάρκεια, καθώς παρέμεινε να επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή με ισχυρές βροχοπτώσεις για πάνω από τέσσερις ώρες (02.00UTC έως 06.00UTC). Όμως, φαίνεται πως δεν φτάνει σε τόσο μεγάλο ύψος στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το ύψος των κορυφών των νεφών της 16^{ης} Ιουλίου, όπως προκύπτει από τα χρώματα των εικόνων του Σχ. 42, που μαρτυρούν ότι οι κορυφές αποκτούν τιμές διαφοράς γύρω από το 0°C καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης της συγκεκριμένης ανάπτυξης και μονό το διάστημα 04.00UTC έως 04.30UTC η κορυφή του cb ξεπέρασε οριακά την τροπόπαυση, εμφανίζοντας θετικές τιμές διαφοράς. Επίσης, αξίζει να γίνει μια αναφορά στο ότι οι ελάχιστες θερμοκρασίες κορυφών νεφών δεν ξεπέρασαν τους -53°C στις 17 Ιουλίου. Το γεγονός ότι το μέγιστο ύψος των κορυφών έφτασε οριακά πάνω από το ύψος της τροπόπαυσης και όχι σε ιδιαίτερα μεγάλο ύψος, οφείλεται στην έλλειψη ορογραφίας, καθώς εξελίσσεται, κατά κύριο λόγο, πάνω από θάλασσα. Όμως, η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, η οποία εντοπίστηκε χαμηλότερα στην τροπόσφαιρα τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης} αποτέλεσε το σημαντικότερο αίτιο που δεν ευνόησε τις κορυφές των νεφών να αναπτυχθούν σε μεγάλο ύψος, παρόλο που η περιοχή χαρακτηριζόταν από έντονη σύγκλιση χαμηλά και ισχυρά ανοδικά ρεύματα.

Αυτό που είναι επίσης ξεκάθαρο, είναι οι δυο ξεχωριστές προεξέχουσες κορυφές (διακρίνονται καθαρά στο Σχ. 42 για τις 02.30UTC) οι οποίες ενώνονται στις 03.30UTC για να δώσουν την εκτεταμένη κορυφή η οποία οριακά προσέγγιζε το ύψος της τροπόπαυσης. Συνεπώς, από τη μελέτη των εικόνων διαφοράς καναλιών 5-9, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο καλά σχηματισμένος κυκλικός νεφικός σχηματισμός, που έδωσε αρκετά χιλιοστά βροχής στη Χαλκιδική και την περιοχή του βορειοδυτικού Αιγαίου, είχε μεγάλη διάρκεια ζωής, όμως παρ'ολ'αυτά οι κορυφές των cb κυμαίνονταν στο χαμηλό ύψος της τροπόπαυσης, ενώ την ξεπέρασαν οριακά μόνο το διάστημα 04.00UTC έως 04.30UTC. Η κλίμακα του ύψους κορυφής προκύπτει αναλογικά με τη χρωματική διαβάθμιση.



Σχ. 42. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch9 με κατώφλι από -1°C έως 3°C , για τις 17 Ιουλίου 2017

Τέλος, η τελευταία φορά που εμφανίζονται οριακές θετικές τιμές της διαφοράς είναι στις 11.30UTC (Σχ. 43), όποτε και το καταιγισμοφόρο σύστημα έχει καταστεί εξασθενημένο. Η κορυφή του τελευταίου νεφικού κυττάρου, που τοποθετείται βόρεια της Λήμνου, ξεπέρασε το ύψος της τροπόπαυσης για χρονικό διάστημα λίγων λεπτών, καθώς και το ίδιο το κύτταρο είχε μικρό χρόνο ζωής.



Σχ. 43. Διαφορά καναλιών Ch5-Ch9 με κατώφλι από -1°C έως 3°C , για τις 17 Ιουλίου 2017

ε. Διαφορά θερμοκρασίας λαμπρότητας καναλιών Ch9-Ch10 ($T_{10.8}-T_{12.0}$)

Οι εικόνες είναι αποτέλεσμα της διαφοράς των θερμοκρασιών λαμπρότητας μεταξύ των καναλιών IR10.8 και IR12.0 (9-10).

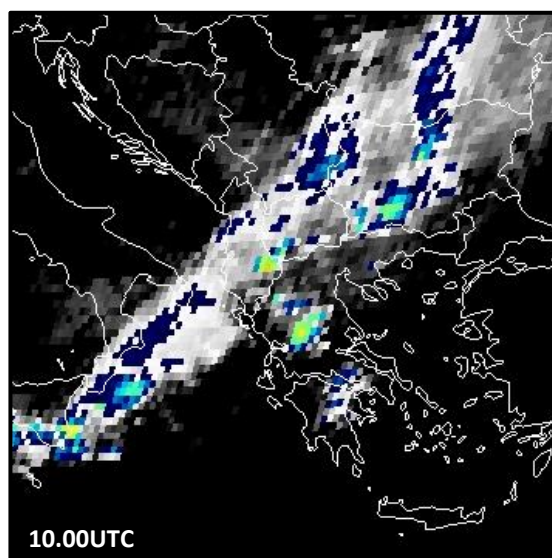
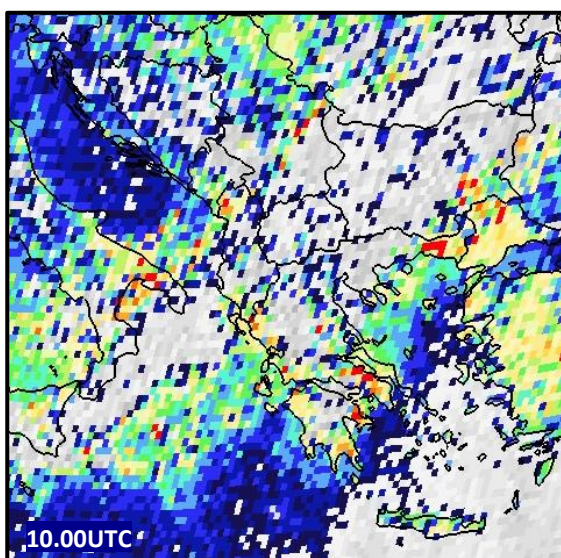
Στις εικόνες υποδεικνύεται το οπτικό πάχος των νεφών. Συγκεκριμένα, γίνεται διάκριση των οπτικώς παχίων νεφών τύπου cumulus (cumuliform clouds – σωρειτόμορφα νέφη) από τα οπτικώς λεπτά νέφη τύπου cirrus. Οι τιμές της κλίμακας των εικόνων κυμαίνονται από λίγους βαθμούς κάτω έως λίγους βαθμούς πάνω από το μηδέν. Μικρές θετικές τιμές BTDs υποδεικνύουν ένα οπτικά παχύ και πυκνό νέφος, ενώ μεγάλες θετικές τιμές BTDs υποδεικνύουν ένα οπτικά λεπτό νέφος :

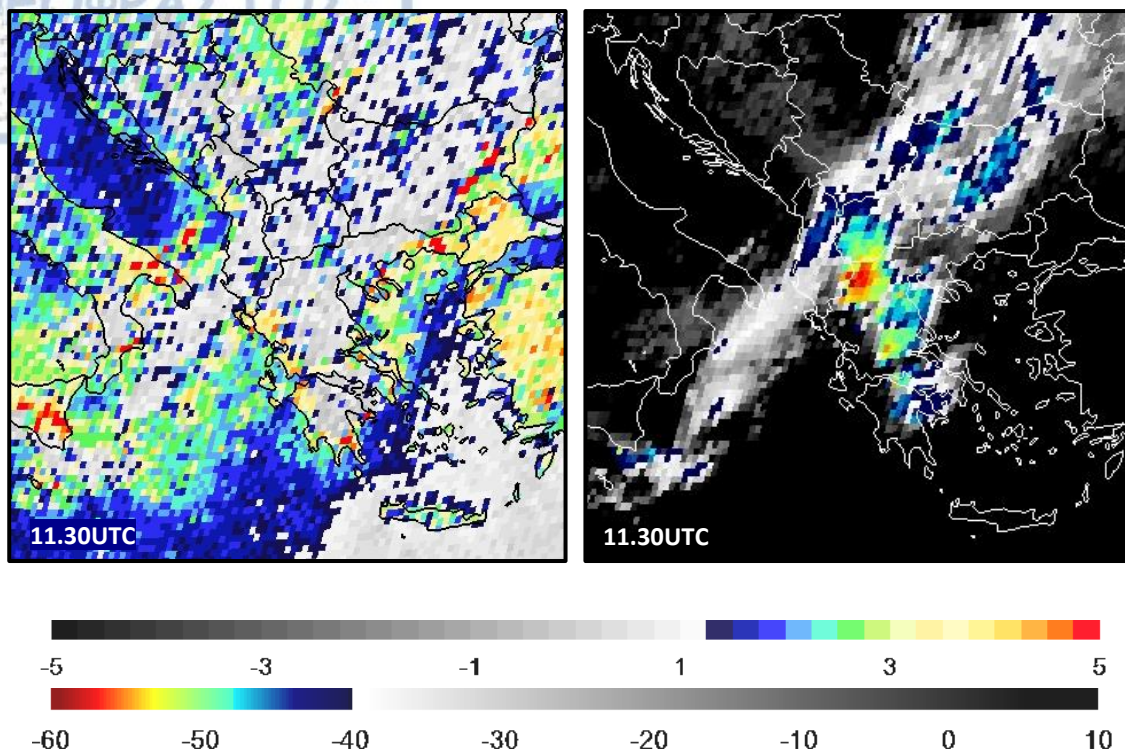
$T_{10.8} - T_{12.0} < 1 \rightarrow$ σωρειτόμορφα νέφη ή νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης
 $T_{10.8} - T_{12.0} > 1 \rightarrow$ λεπτά νέφη ή cirrus

Στις εικόνες διαφοράς θερμοκρασίας λαμπρότητας των καναλιών 9-10 έχει εφαρμοστεί η εξής χρωματική διαβάθμιση: από την τιμή -5 έως 1 η κλίμακα κυμαίνεται από μαύρο έως λευκό αντίστοιχα. Συνεπώς, με ανοιχτές γκρι αποχρώσεις οπτικοποιούνται τα πυκνά νέφη, για

τα οποία μπορεί να διαπιστωθεί εάν είναι πυκνά και μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης, εάν πραγματοποιηθεί παράλληλη σύγκριση με εικόνες IR10.8. Τιμές πάνω από 1 αποδίδονται με διάφορους χρωματισμούς και αναδεικνύουν λεπτά νέφη.

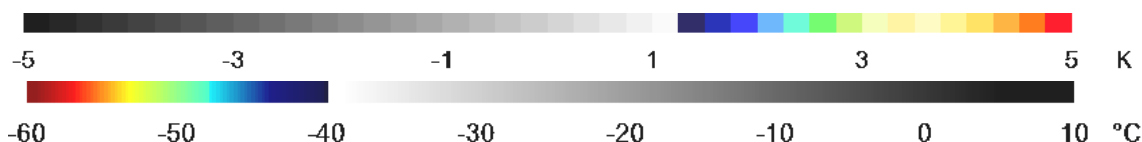
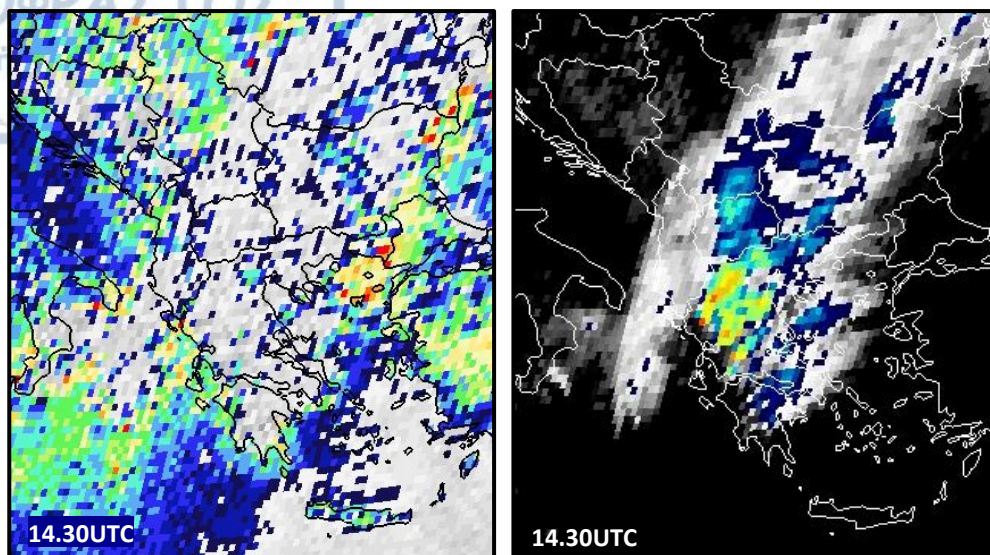
Από την γκρι απόχρωση της εικόνας της διαφοράς των δυο καναλιών σε συνδυασμό με την εικόνα στο κανάλι του υπερύθρου (Σχ.44), για τις 10.00UTC, φαίνεται πως κατά μήκος του μετώπου τα νέφη είναι σωρειτόμορφα, όμως δεν φτάνουν σε μεγάλο ύψος στην ατμόσφαιρα, συμπεράσμα που προκύπτει από τη θερμοκρασία των κορυφών αυτού του νεφικού στρώματος, η οποία κυμαίνεται, σύμφωνα με την εικόνα στο κανάλι 9, γύρω στους -40°C . Επιπλέον, τόσο κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου όσο και πάνω από την Πελοπόννησο έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται παχιά νέφη, όπως αποδεικνύει η χρωματική διαβάθμιση της δορυφορικής εικόνας. Έχει αρχίσει, λοιπόν, τοπικά η συμπύκνωση του θερμών και υγρών αέριων μαζών που παρασύρονται από το βορειοανατολικό ρεύμα το οποίο πηγάζει από το χαμηλό στην Τουρκία. Όσο συνεχίζουν να γεννιούνται νέα καταιγιδοφόρα κύτταρα, τόσο τροφοδοτούνται τα ήδη προϋπάρχοντα παχιά νέφη, το οποία στη δυτική Μακεδονία προσεγγίζουν το ύψος της τροπόπαυσης.





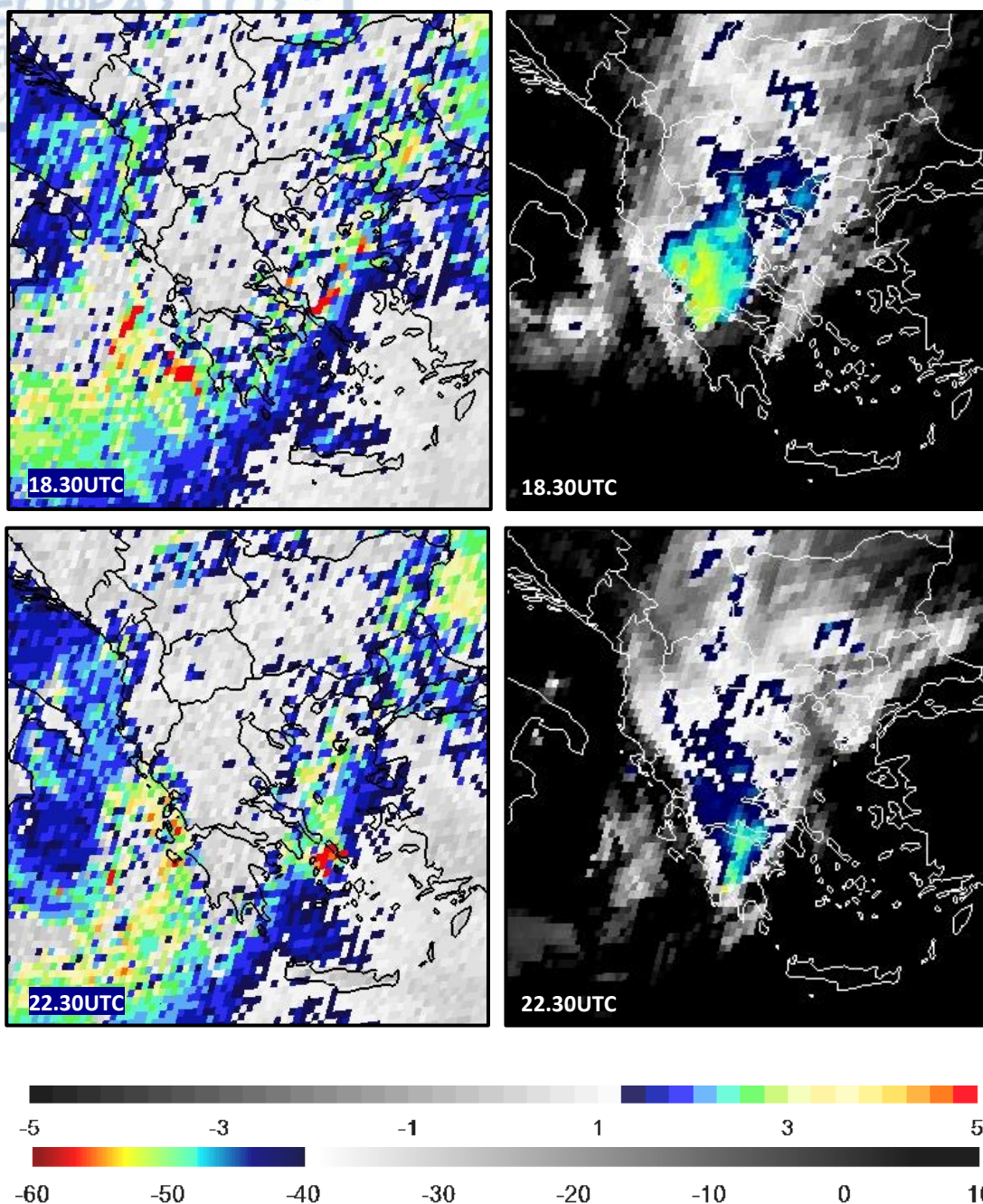
Σχ. 44. (Αριστερά) Διαφορά καναλιών Ch9-Ch10 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από 1°C έως 5°C, (Δεξιά) Εικόνες IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από τους -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

Από τις πρώτες μεσημβρινές ώρες μέχρι και τις 17.00UTC, καθώς το καταιγιδοφόρο σύστημα αναπτύσσεται και εξελίσσεται, τη Βαλκανική χερσόνησο καθώς και το νότιο Ιόνιο καλύπτουν λεπτά χαμηλά νέφη, ενώ τα βόρεια και κεντρικά τμήματα της χώρας, όπου το σύστημα έχει αποκτήσει τη μορφή ενός μέσης κλίμακας συμπλέγματος πολυκύτταρων καταιγίδων, καλύπτουν νέφη πυκνά, παχιά και σημαντικού ύψους, που φέρουν μεγάλες ποσότητες νερού. Δε πρέπει να παραληφθεί ότι το σύστημα βρισκόταν πάνω από τις ορεινές περιοχές της Πίνδου τις θερμές ώρες της μέρας, γεγονός το οποίο συνέβαλε στο σχηματισμό αυτών των νεφών μεγάλου οπτικού πάχους. Τέλος, μια παράλληλη μελέτη των εικόνων αυτής της διαφοράς με τις εικόνες IR10,8 του Σχ. 45, επιβεβαιώνει ότι τα βροχοφόρα νέφη τα οποία κάλυπταν τις περιοχές όπου εκείνο το χρονικό διάστημα εξελίχθηκαν τα εντονότερα φαινόμενα, πέρα από το ότι απεικονίζονται να είναι ιδιαίτερα πυκνά, έφτασαν και σε σημαντικό ύψος στην τροπόσφαιρα, με θερμοκρασίες κορυφών κάτω των -50°C.



Σχ. 45. (Αριστερά) Διαφορά καναλιών Ch9-Ch10 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από 1°C έως 5°C, (Δεξιά) Εικόνες IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από τους -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

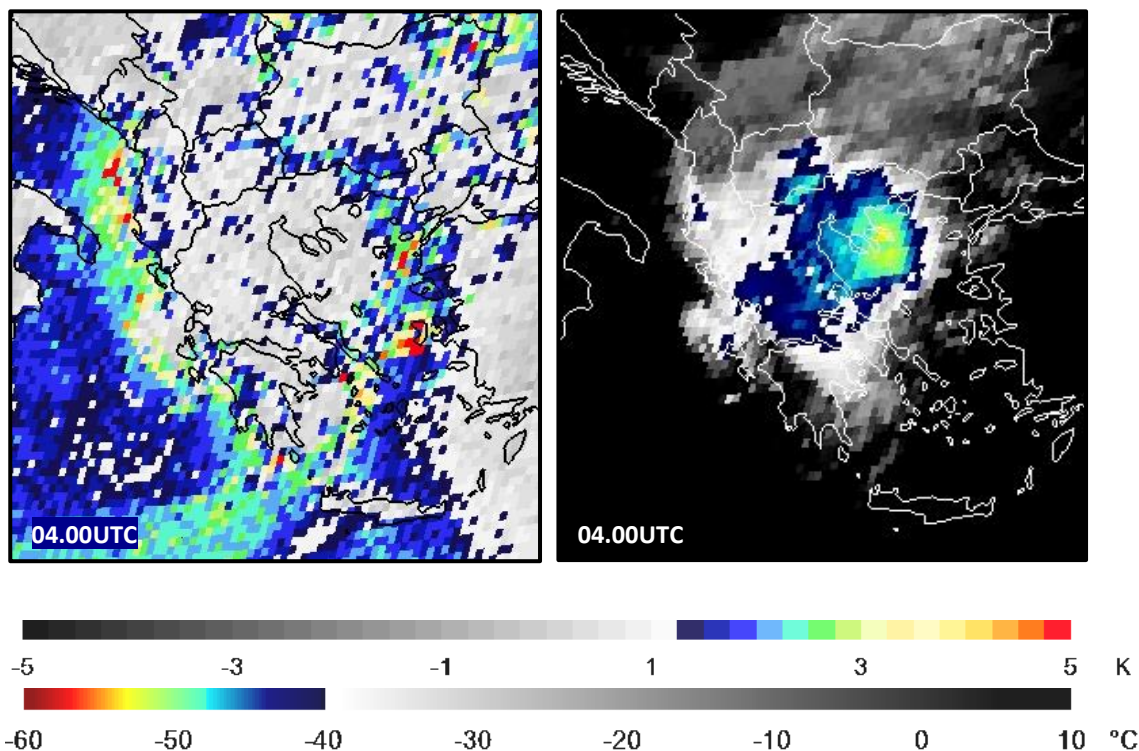
Από τις 18.00UTC και έπειτα, οπότε και το ψυχρό μέτωπο έχει αρχίσει να διαλύεται, εμφανίζεται ο αεροχειμάρρος βορειοδυτικά του συστήματος, ο οποίος δημιουργεί μια λωρίδα ανέφελης περιοχής από τις βόρειες χώρες των Βαλκανίων έως τη νότια Ιταλία. Αντίθετα, ανεπτυγμένα σωρειτόμορφα νέφη μεγάλου οπτικού πάχους καλύπτουν ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο, έχοντας μεγαλύτερο ύψος αυτά που καλύπτουν τη δυτική Στερεά Ελλάδα και βόρεια Πελοπόννησο. Πρόκειται, έξαλλου για την περιοχή όπου τα ανοδικά ρεύματα εκείνη τη χρονική στιγμή είναι έντονα λόγω της ευνοϊκής διάταξης του αεροχειμάρρου. Στις συγκεκριμένες δορυφορικές εικόνες (Σχ. 46) δε δύναται να παρατηρηθεί το σφηνοειδές σχήμα του συστήματος. Τέλος, η 'ουρά' αυτής της νεφικής ζώνης, που εκτείνεται πάνω από τις Βαλκανικές χώρες που συνορεύουν βόρεια με την Ελλάδα, συνοδεύεται από αρκετά χαμηλότερα, ωστόσο παχιά, νέφη. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο Σχ. 46 για τις 22.30UTC.



Σχ. 46. (Αριστερά) Διαφορά καναλιών Ch9-Ch10 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από 1°C έως 5°C, (Δεξιά) Εικόνες IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από τους -40°C έως -60°C, για τις 16 Ιουλίου 2017

Τέλος, λόγω της κυκλωνικής κυκλοφορίας και της έντονης επιφανειακής σύγκλισης που συνέβαλε στην ενίσχυση των ανοδικών κινήσεων, τις πρώτες ώρες της 17^{ης} Ιουλίου (Σχ. 47) τα νέφη μεγάλου οπτικού πάχους και ύψους συγκεντρώνονται κυρίως πάνω από το βορειοδυτικό Αιγαίο. Η αντίστοιχη κατακόρυφη τομή με πεδίο την υγρασία επιβεβαιώνει πως στην περιοχή παρουσιάστηκαν τα μεγαλύτερα ποσά υγρασίας, από την επιφάνεια μέχρι κι το ύψος της τροπόπαυσης, καθώς τα ανοδικά ρεύματα εξελίσσονταν πάνω από θάλασσα.

Ωστόσο, πάνω από τη Μακεδονία, την Θεσσαλία, την Ήπειρο μέχρι και τη Στερεά Ελλάδα, το νεφικό στρώμα παρόλο που παρουσιάζεται να είναι παχύ στη συγκεκριμένη διαφορά καναλιών, η κορυφή του βρίσκεται σε χαμηλό ύψος στην τροπόσφαιρα, πιθανόν να εκτείνεται μέχρι το επίπεδο των 400hPa, ύψος στο οποίο έχει κατέλθει η τροπόπαυση.



Σχ. 47. (Αριστερά) Διαφορά καναλιών Ch9-Ch10 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από 1°C έως 5°C, (Δεξιά) Εικόνες IR10,8 με ενισχυμένη χρωματική κλίμακα από τους -40°C έως -60°C, για τις 17 Ιουλίου 2017

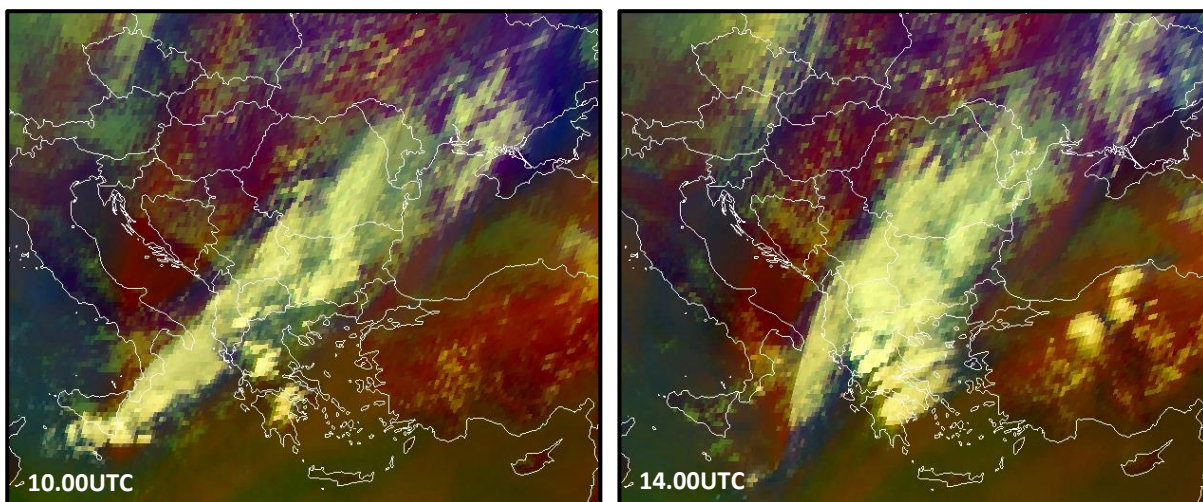
στ. Ανάλυση εικόνων RGB : Airmass

Ο συνδυασμός Airmass είναι χρήσιμος, κυρίως, για τη διάκριση των ψυχρών-πολικών αέριων μαζών, με μπλε-μωβ χρώμα, από τις θερμές-τροπικές αέριες μάζες, με πράσινο. Η θέση του αεροχειμάρρου μπορεί να εντοπιστεί και αποδίδεται με κόκκινο-μωβ χρώμα. Επιπλέον, στο προϊόν Airmass RGB μπορούν να ανιχνευθούν περιοχές με κυκλογέννεση σε εξέλιξη, να διακριθούν μετωπικά νεφικά συστήματα, τα οποία ακολουθούνται από ξηρό καθοδικό στρατοσφαιρικό αέρα (σκούρο κόκκινο), και κατ' επέκταση ανωμαλίες της δυναμικής τροπόπαυσης (PV Anomalies). Τέλος, επιτρέπεται η διάκριση των υψηλών (λευκό) από τα μεσαία (σκούρο πράσινο) και χαμηλά (καφέ) νέφη.

Στις 10.00UTC, στο Σχ. 48 εντοπίζεται αρχικά η θέση του αεροχειμάρρου πάνω από τις βόρειες χώρες της βαλκανικής χερσονήσου, όπου οι αποχρώσεις είναι κόκκινες-μωβ, το

μέγιστο του οποίου αποδίδεται με σκούρο κόκκινο χρώμα στην περιοχή της Αδριατικής θάλασσας. Με μπλε-μωβ αποχρώσεις δυτικά-νοτιοδυτικά του αεροχειμάρρου αποτυπώνονται οι ψυχρές αέριες μάζες. Σκούρες πράσινες έως καφέ αποχρώσεις στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου φανερώνουν την παρουσία θερμών αέριων μαζών με χαμηλά επίπεδα υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Ο διαχωρισμός θερμών – ψυχρών αέριων μαζών, όπως είναι εμφανές στο Σχ. 48, παρατηρείται κατά μήκος της γραμμής του μετώπου, στην περιοχή όπου επικρατούν παχιά νέφη που φτάνουν σε σημαντικό ύψος στην τροπόσφαιρα, όπως υποδηλώνει το λευκό χρώμα.

Κατά την εξέλιξη των φαινομένων τις επόμενες ώρες, παρατηρείται μετακίνηση του ψυχρού αέρα προς νότια-νοτιοανατολικά, ενώ παράλληλα ο θερμός υγρός αέρας φαίνεται να ανέρχεται του ψυχρού ξηρού, μεταφέροντας υγρασία στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας και ενισχύοντας την νέφωση. Οι δυο αυτές αέριες μάζες στην ουσία προκαθορίζουν τα όρια της μετωπικής ζώνης, κατά μήκος της οποίας εξελίσσονται τα φαινόμενα. Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι η ανάπτυξη και ενίσχυση του συστήματος είναι αποτέλεσμα της μεταφοράς υγρασίας υψηλότερα στην τροπόσφαιρα λόγω της ανολίσθησης θερμής αέριας μάζας, ανατολικά του συστήματος, πάνω σε ψυχρότερη αέρια μάζα, δυτικά αυτού. Όσον αφορά τον αεροχειμάρρο, φαίνεται στο Σχ. 48 για τις 14.00UTC να έχει μετατοπιστεί νοτιότερα, ενώ εντοπίζεται πάντοτε βορειοδυτικά της περιοχής εξέλιξης των ισχυρών φαινομένων.

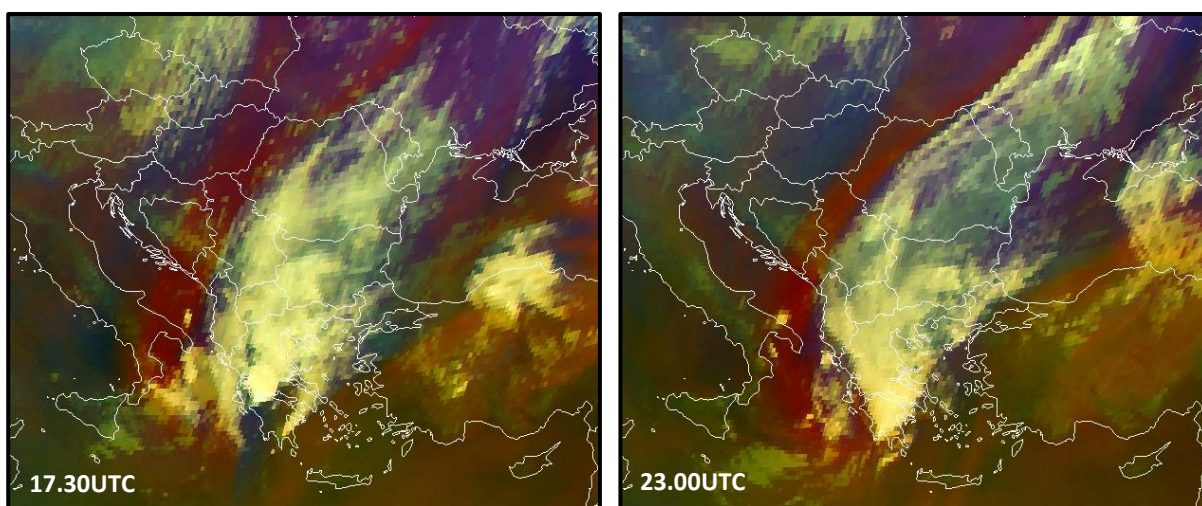


Σχ. 48. Εικόνες RGB – Airmass, για τις 16 Ιουλίου 2017

Στις 17.30UTC (Σχ. 49) η μπλε-μωβ απόχρωση γύρω από την περιοχή με το έντονο λευκό χρώμα υποδεικνύει τη θέση στην οποία εντοπίζονται πλέον οι ψυχρές μάζες. Όντως, όπως αναφέρεται στην ανάλυση της συνοπτικής κατάστασης, οι ψυχρές αέριες μάζες έχουν επεκταθεί και καλύπτει και τη Μακεδονία, ενώ συνεχίζουν να κατέρχονται σε μικρότερα

γεωγραφικά πλάτη μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης}. Από τα δυτικά του νεφικού συστήματος το έντονο κόκκινο χρώμα, πέρα από τη θέση του αεροχειμάρρου, εκδηλώνει την ύπαρξη ξηρού καθοδικού στρατοσφαιρικού αέρα, καθώς επίσης είναι ένδειξη του χαμηλού ύψους της δυναμικής τροπόπαυσης στην περιοχή νοτιοανατολικά της Ιταλίας. Πράγματι, στρατοσφαιρικός αέρας έχει φτάσει σε αρκετά χαμηλό ύψος πάνω από τη νότια Ιταλία, όπως υπέδειξε η σχετική κατακόρυφη τομή με πεδία τη δυναμική τροπόπαυση και την υγρασία. Τέλος, τα έντονα φαινόμενα εκδηλώθηκαν στην περιοχή μπροστά από την ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, δηλαδή στη Στερεά Ελλάδα και την Πελοπόννησο, όπου και επικρατούν ανοδικά ρεύματα, το οποίο γίνεται εντονότερο τις επόμενες ώρες στο συνδυασμό αυτό.

Το επόμενο διάστημα, το σύστημα συνεχίζει να είναι ενισχυμένο λόγω της ύπαρξης χαμηλού δυτικά της διαταραχής, το οποίο αποτυπώνεται στις 23.00UTC (Σχ. 49). Το γεγονός ότι το κέντρο του χαμηλού εντοπίζεται να είναι στην αριστερή έξοδο του αεροχειμάρρου, ενέτεινε τη δυναμική του συστήματος, καθώς οι ενισχυμένοι άνεμοι οδηγούν σε περαιτέρω βάθυνση του χαμηλού. Η πτώση, λοιπόν, των γεωδυναμικών υψών σε συνδυασμό με την μετακίνηση των ψυχρών αέριων μαζών σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, οδήγησαν σε έντονα φαινόμενα στα ηπειρωτικά κεντρικά και νότια τμήματα της χώρας κάτω το οποίο προκύπτει και από το φωτεινό λευκό χρώμα που καλύπτει ολόκληρο τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας. Όπως προαναφέρθηκε, φωτεινό λευκό χρώμα σημαίνει ύπαρξη νεφών με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη.

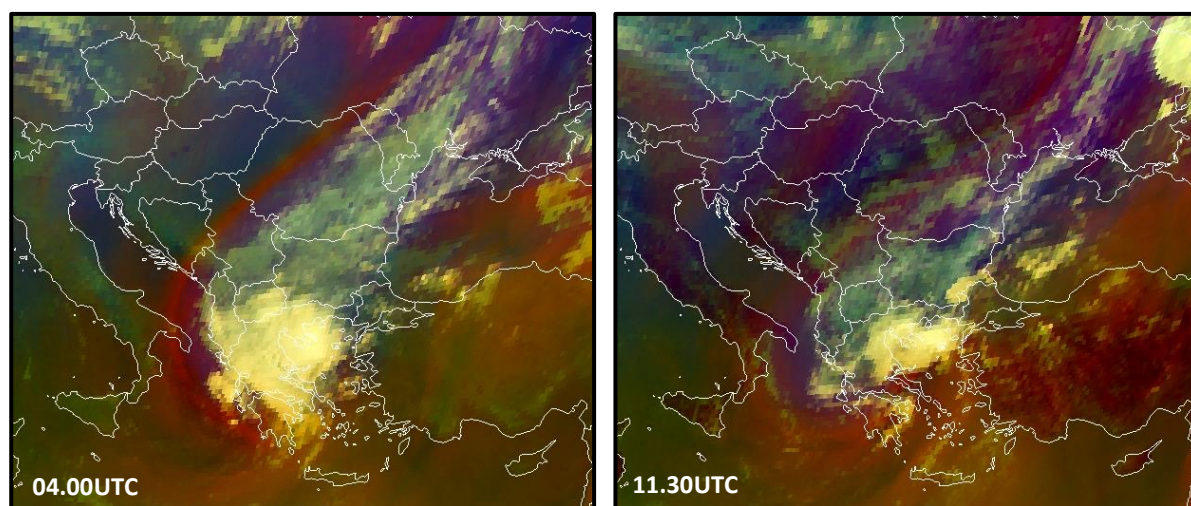


Σχ. 49. Εικόνες RGB – Airmass, για τις 16 Ιουλίου 2017

Από τις βραδινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου μέχρι και το τέλος των φαινομένων το μεσημέρι της 17^{ης}, τα αίτια της έντασης τους αποτέλεσαν το αποκομμένο χαμηλό στην ισοβαρική στάθμη των 500hPa σε συνδυασμό με τον αεροχείμαρρο, η διάταξη του οποίου ήταν

καθοριστική για τέτοιας έντασης φαινόμενα, καθώς η περιοχή με τις ανοδικές κινήσεις εντοπίστηκε στην αριστερή έξοδο του. Στις εικόνες Airmass ο αεροχείμαρρος αποδίδεται με κόκκινο χρώμα δυτικά του συστήματος, πάνω από το Ιόνιο.

Από τις 02.00UTC έως και τις 06.00UTC το νεφικό σύστημα περιορίζεται πάνω από το βόρειο Αιγαίο και τη Χαλκιδική. Η έντονη επιφανειακή σύγκλιση των ανέμων στην περιοχή και κατ' επέκταση οι ισχυρές ανοδικές κινήσεις οδηγούν σε σημαντική κατακόρυφη ανάπτυξη του νεφικού συστήματος. Στο Σχ. 50 για τις 04.00UTC το έντονο λευκό χρώμα στην περιοχή αποκαλύπτει το μεγάλο ύψος των νεφών. Παρ'ολ'αυτά και στην υπόλοιπη χώρα επικρατεί το λευκό χρώμα, ένδειξη ύπαρξης νεφών, όμως όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ανάλυση πρόκειται για παχιά αλλά χαμηλότερα νέφη. Δυτικά αυτών, η συνύπαρξη μοβ και κόκκινου χρώματος, τα οποία αντιστοιχούν σε ψυχρές αέριες μάζες, στον ηπειρωτικό κορμό μέχρι και το Ιόνιο και σε ψυχρότερο στρατοσφαιρικό αέρα, στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα νοτιοανατολικά της Ιταλίας, επιβεβαιώνουν πως το μέτωπο στο Αιγαίο είχε χαρακτηριστικά ανά-μετώπου.



Σχ. 50. Εικόνες RGB – Airmass, για τις 17 Ιουλίου 2017

Το πρωί της 17^{ης} Ιουλίου, όποτε και το MCS είναι στη φάση διάλυσης, έχει μετακινηθεί ανατολικότερα. Λίγο πριν το σύστημα καταστεί βαροτροπικό και αρχίσουν τα φαινόμενα να εξασθενούν, μια νέα ανάπτυξη νεφικού σχηματισμού, όχι όμως τόσο εκτεταμένου, παρατηρείται στο βορειοανατολικό Αιγαίο. Ο λόγος είναι η μετατόπιση του κλειστού χαμηλού και της περιοχής των ανοδικών κινήσεων προς τα ανατολικά. Μετατόπιση των αέριων μαζών προς τα ανατολικά είναι εμφανής στο Σχ. 50, τόσο των θερμών όσο και των ψυχρών.

ζ. Ανάλυση εικόνων RGB : Day Convective Storm

Αυτός ο συνδυασμός προσδίδει πληροφορίες σχετικά με τη μικροφυσική των νεφών και το οπτικό πάχος τους. Μπορούν, έτσι, να εντοπιστούν τα ενεργά μέρη ενός καταιγιδοφόρου συστήματος, συνεπώς οι προεξέχουσες κορυφές και οι περιοχές με έντονα ανοδικά ρεύματα. Επίσης, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην παρατήρηση της φάσης μιας κατακόρυφης ανάπτυξης, δηλαδή εάν βρίσκεται στη φάση ανάπτυξης ή διάλυσης. Συγκριτικά με άλλα RGB, το συγκεκριμένο δείχνει τα πιο έντονα νεφικά κύτταρα, κάτι το οποίο εξυπηρετεί στο διαχωρισμό των νεοδημιουργηθέντων κατακόρυφων αναπτύξεων και αυτών υπό διάλυση.

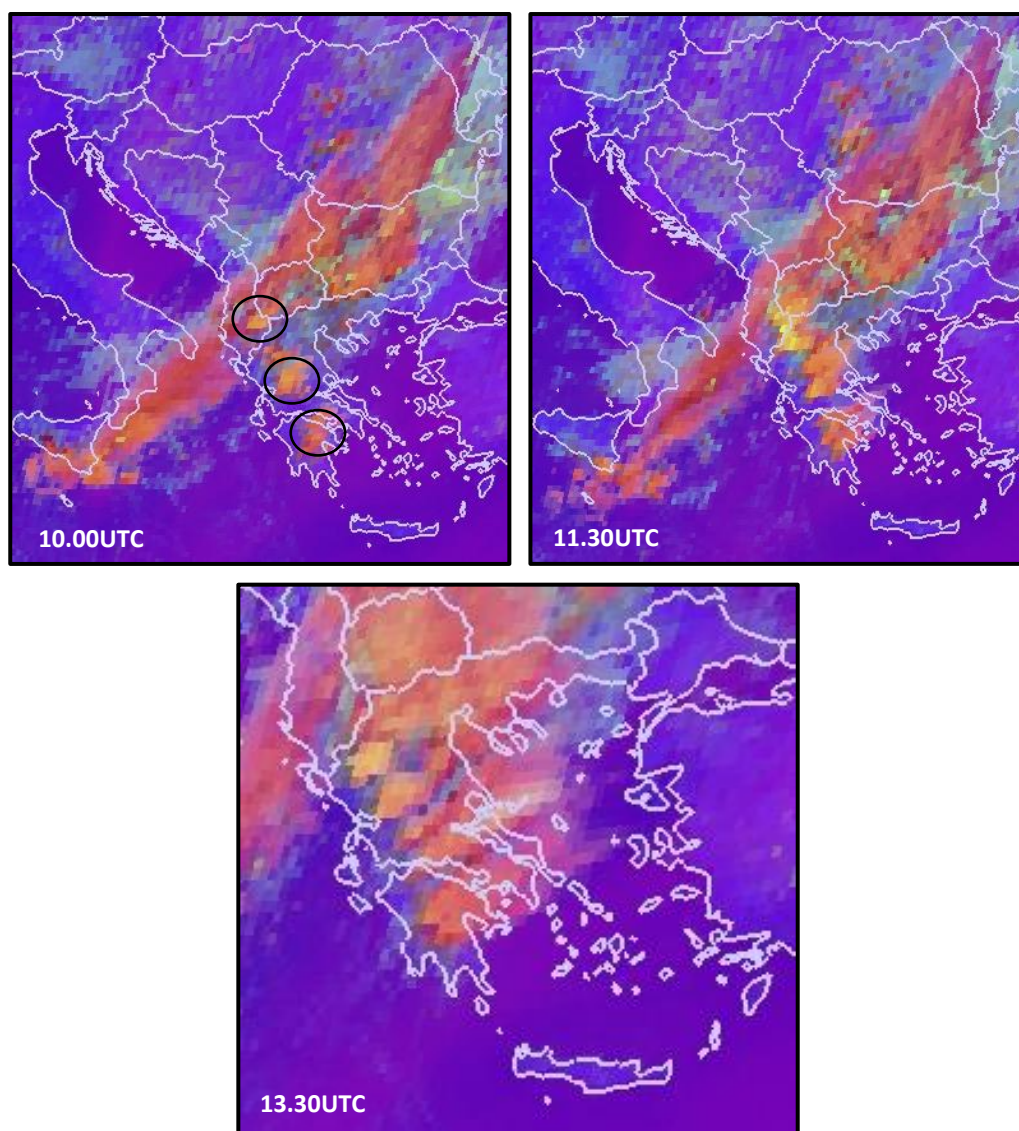
Με φωτεινό κίτρινο χρώμα εμφανίζονται ψυχρά, παχιά νέφη που αποτελούνται από πολύ μικρούς παγοκρυστάλλους, που υποδηλώνουν έντονη κατακόρυφη ανάπτυξη (intense convection). Όσο λιγότερο φωτεινά κίτρινα, τόσο μεγαλύτεροι οι παγοκρύσταλλοι των ψυχρών παχιών νεφών. Να συμπληρωθεί πως το κίτρινο χρώμα δεν συνεπάγεται αποκλειστικά μικρούς παγοκρυστάλλους, άλλα και πολύ ψυχρές κορυφές νεφών που συντίθενται από μεγάλους παγοκρυστάλλους. Με πορτοκαλί-κόκκινο χρώμα εμφανίζονται ψυχρά, παχιά νέφη με μεγάλους παγοκρυστάλλους, που υπονοούν φάση διάλυσης για την κατακόρυφη ανάπτυξη.

Λόγω του ότι εμπλέκονται κανάλια του ορατού στο συγκεκριμένο RGB, αποκλείεται η παρατήρηση των φαινομένων κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το επιτρεπόμενο διάστημα χρήσης του καναλιού, για την εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων, είναι 06.00UTC έως 15.00UTC.

Στις 10.00UTC (Σχ. 51) εντοπίζονται πορτοκαλί-κόκκινες αποχρώσεις κατά μήκος του ψυχρού μετώπου. Πρόκειται για παχιά νέφη, τα οποία αποτελούνται από μεγάλους παγοκρυστάλλους, που όμως δε φτάνουν σε μεγάλο ύψος στην τροπόσφαιρα. Το ίδιο συμπέρασμα έχει εξαχθεί και κατά την ανάλυση των εικόνων διαφοράς καναλιών 9-10. Όπως διαπιστώνεται με το πέρασμα της ώρας, μπαίνουν σταδιακά στη φάση διάλυσης. Αυτά, όμως, τα οποία γεννιούνται εκείνη τη χρονική στιγμή, ταυτόχρονα, και αναπτύσσονται αργότερα περαιτέρω, είναι τρία διαφορετικά νεφικά κύτταρα: στην περιοχή των συνόρων με Αλβανία και Βόρεια Μακεδονία, πάνω από την Πίνδο στους νομούς Τρικάλων, Καρδίτσας και Λάρισας, καθώς επίσης και πάνω από την Πελοπόννησο. Από την εικόνα διαπιστώνεται ότι ο πρώτος πυρήνας φτάνει, μέσα σε μια ώρα, σε μεγάλο ύψος. Το φωτεινό έντονο κίτρινο στις 11.00UTC υποδηλώνει τη σύνθεση της κορυφής του cb, η οποία φτάνει σε μεγάλο ύψος και σχηματίζεται από πολύ μικρούς παγοκρυστάλλους, καθώς και τα έντονα ανοδικά ρεύματα που επικρατούν κάτω και μέσα στο νέφος. Αποτέλεσμα τόσο έντονων κατακόρυφων αναπτύξεων όπως αυτή, είναι έντονα καιρικά φαινόμενα. Πράγματι, το συγκεκριμένο νέφος άφησε μεγάλα ποσά βροχής στην περιοχή. Να συμπληρωθεί πως η κορυφή αυτή αποτέλεσε προεξέχουσα (Overshooting Top), σύμφωνα με την εικόνα Ch5-Ch9, με ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία. Οσον αφορά τα υπόλοιπα μέρη του MCS, καλύπτονται απο ανοιχτό πορτοκαλί

χρώμα και παραπέμπουν σε λιγότερο ανεπτυγμένα νέφη cb, το περιεχόμενο των οποίων ήταν μεγάλοι παγοκρύσταλλοι. Με το πέρασμα της ώρας και καθώς οι νεφικοί πυρήνες κάνουν τον κύκλο ζωής τους και φτάνουν στη φάση διάλυσης, το χρώμα τους περνάει από το κίτρινο και το ανοιχτό πορτοκαλί, στο ανοιχτό κόκκινο, έως ότου διαλυθούν. Το χρώμα τους, δηλαδή, επιβεβαιώνει τη φάση της κάθε κατακόρυφης ανάπτυξης, για κάθε χρονική στιγμή.

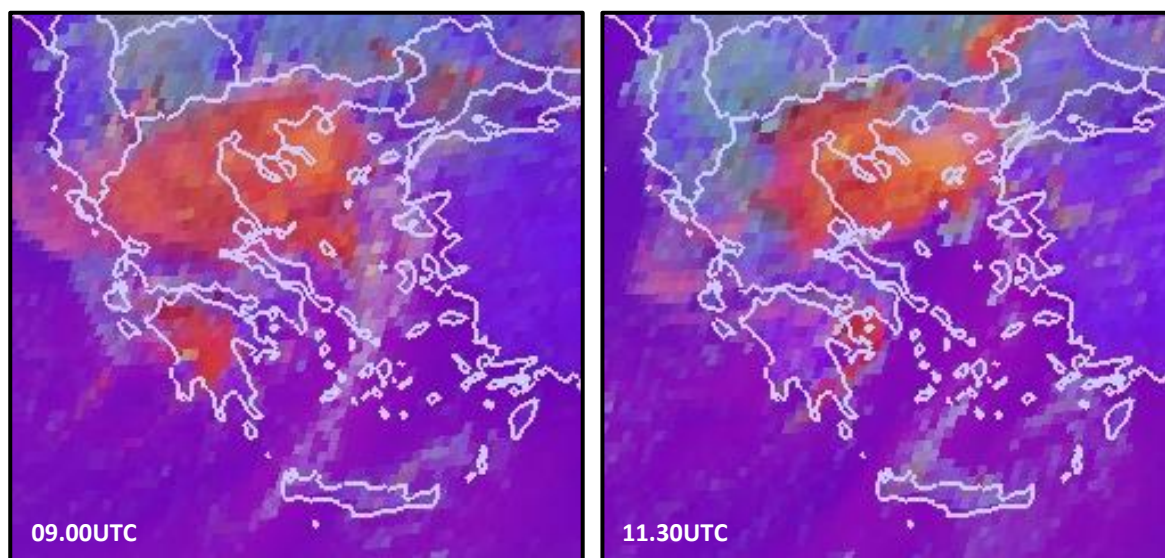
Λίγο πριν η έλλειψη του φωτός της ημέρας εμποδίζει την παρατήρηση, στις 13.30UTC εντοπίζονται να γεννιούνται νέοι πυρήνες, οι δυο έχοντας κίτρινο-ανοιχτό πορτοκαλί χρώμα και οι άλλοι δυο σκούρο πορτοκαλί. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως τα νεφικά κύτταρα που εντοπίζονται στο Σχ. 51 δυτικά των κορυφών της Πίνδου, αποκτούν μεγάλο ύψος εφόσον συντίθενται από μικρούς παγοκρυστάλλους, γεγονός στο οποίο συνέβαλε και η ορογραφία, ενώ οι αναπτύξεις στη δυτική Στερεά Ελλάδα και Πελοπόννησο φτάνουν ικανοποιητικά ψηλά στην τροπόσφαιρα και συντίθενται από μεγαλύτερους παγοκρυστάλλους. Τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο το σύστημα εξελίσσεται στη βόρεια Ελλάδα.



Σχ. 51. Εικόνες RGB - Day Convective Storm, για τις 16 Ιουλίου 2017

Για την περαιτέρω εξέλιξη και σύσταση των νέφων δεν διατίθενται πληροφορίες από το συγκεκριμένο RGB. Για τους νεφικούς σχηματισμούς που ακολουθούν, έως και την επομένη στις 06.00UTC, δε μπορούν να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα, γιατί τα χρώματα των εικόνων αλλιώνονται λόγω έλλειψης φωτισμού.

Από τη νυχτερινή κακοκαιρία που διήρκησε όλο το βράδυ της 17^{ης} Ιουλίου, το μόνο που δύναται να σχολιαστεί είναι η φάση διάλυσης του συστήματος, στις 09.00UTC. Όπως είναι αναμενόμενο, επικρατούν ανοιχτές ερυθρές αποχρώσεις, έως ότου το σύστημα να καταρρεύσει πάνω από τη Χαλκιδική λίγο αργότερα. Παράλληλα, όμως, το καταιγιδοφόρο σύστημα κάνει το τελευταίο του ξέσπασμα πάνω από το βόρειο Αιγαίο και συγκεκριμένα πάνω από τη Λήμνο (Σχ. 52, 11.30UTC). Όμως, δεν είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, καθώς καθόλη τη διάρκεια ζωής του, από τη φάση ανάπτυξης έως και τη φάση διάλυσης, η απόχρωση είναι η ίδια, σκούρο πορτοκαλί. Παρόλο που υπήρξαν βροχοπτώσεις από το συγκεκριμένη ανάπτυξη, η σύνθεση της καθόλη τη διάρκεια ήταν μεγάλοι παγοκρύσταλλοι. Το υπόλοιπο μέρος του συστήματος στην υπόλοιπη Ελλάδα εμφανίζει πιο σκούρες ερυθρές αποχρώσεις, που δηλώνουν και την καταστολή του.



Σχ. 52. Εικόνες RGB - Day Convective Storm, για τις 17 Ιουλίου 2017

η. Ανάλυση εικόνων RGB : Day Microphysics

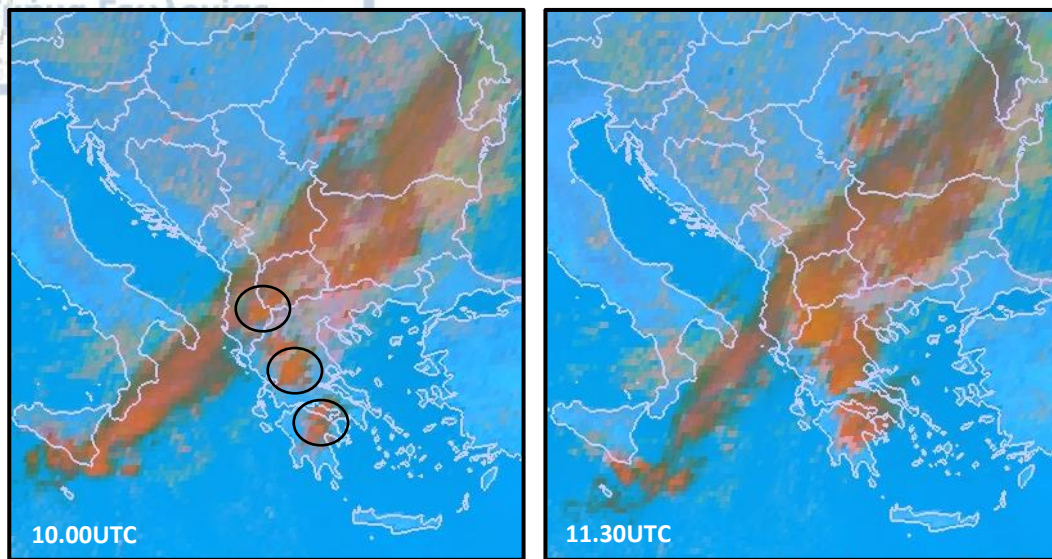
Αρχικά, ο συνδυασμός Day Microphysics ενδείκνυται μόνο για τις ώρες της ημέρας, που υπάρχει ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, διότι συμμετέχει κανάλι του ορατού φάσματος. Στο συγκεκριμένο κατηγοριοποιούνται τα νέφη ανάλογα με τη σύσταση και το οπτικό τους πάχος, δηλαδή διαχωρίζονται τα υψηλά νέφη με σύσταση πάγου από τα χαμηλά νέφη με

σύσταση νερού, καθώς επίσης και τα νέφη σύστασης νερού που δίνουν βροχή από αυτά που δε δίνουν (precipitating and non-precipitating water clouds). Τέλος, η αναγνώριση των έντονα ανεπτυγμένων νεφών λόγω έντονων ανοδικών κινήσεων, είναι δυνατή.

Όσο πιο έντονο και φωτεινό πορτοκαλί, λοιπόν, είναι το χρώμα που αποδίδεται στα νέφη, τόσο μεγαλύτερη η κατακόρυφη ανάπτυξη τους και συνεπώς τόσο μικρότεροι οι παγοκρύσταλλοι από τους οποίους συντίθενται. Σκούρο πορτοκαλί έως φωτεινό κόκκινο χρώμα δηλώνει ότι το νέφος, το οποίο αποτελείται από μεγάλους παγοκρυστάλλους, βρίσκεται στη φάση διάλυσης, ενώ ανοιχτό ροζ χρώμα υποδεικνύει την ύπαρξη χαμηλότερων νεφών που αποτελούνται από μεγάλες υδροσταγόνες, που συνοδεύονται από βροχή. Να σημειωθεί πως οι πληροφορίες που παρέχονται από αυτό το RGB συμπίπτουν με αυτές του RGB Day Convective Storm.

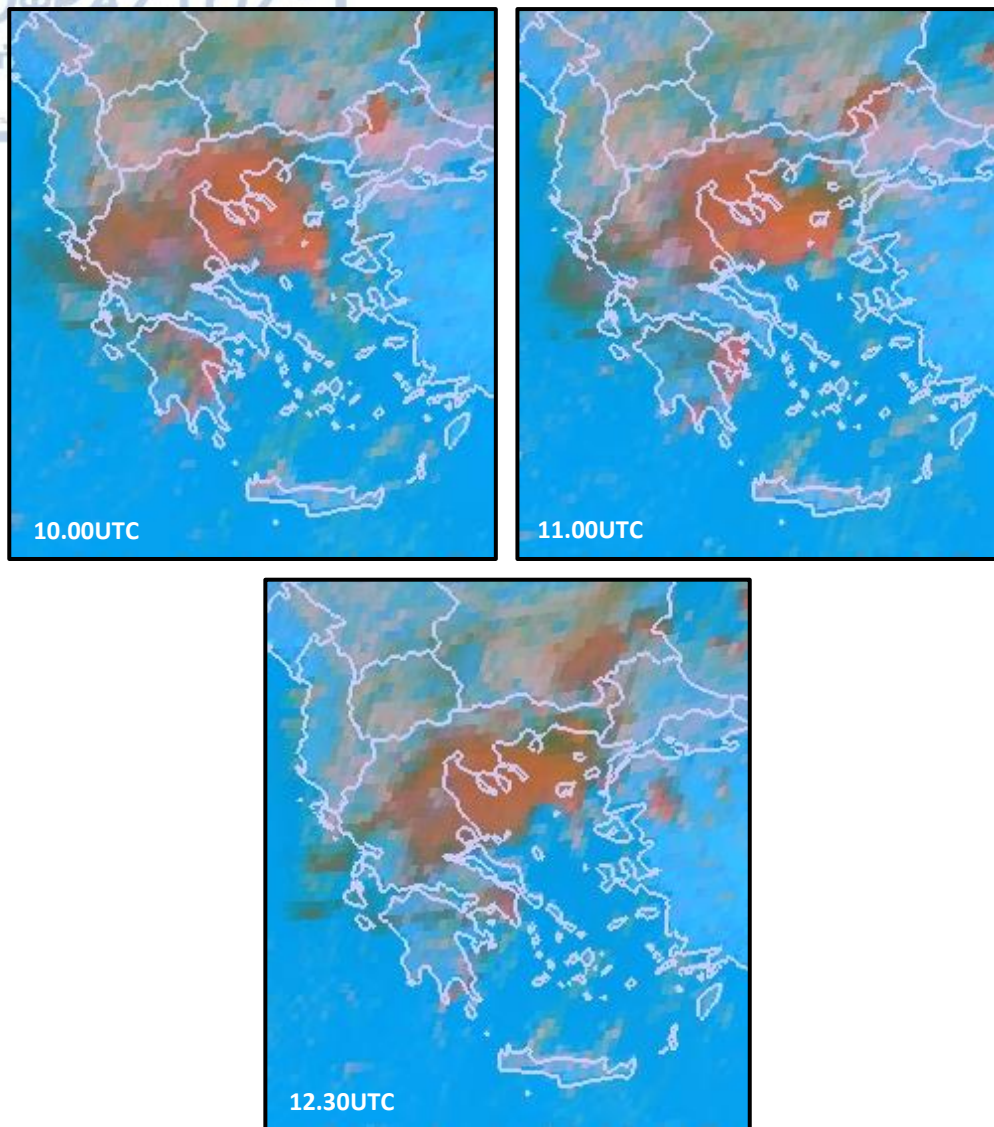
Στο Σχ. 53, στις 10.00UTC, αποτυπώνεται η σύσταση των νεφών κατά μήκος του μετώπου με σκούρο πορτοκαλί, που, όπως έχει διαπιστωθεί και στην εικόνα Day Convective Storm, είναι παχιά νέφη με μεγάλους παγοκρυστάλλους στο εσωτερικό τους, από το οποίο προκύπτει το συμπέρασμα ότι δε πρόκειται για υψηλά νέφη. Εξαίρεση αποτελεί το κάτω άκρο του μετώπου, πάνω από τη νότια Ιταλία, του οποίου το χρώμα είναι φωτεινό πορτοκαλί – μικροί παγοκρύσταλλοι – που όμως σε διάρκεια μισής ώρας αποκτά την ίδια σύσταση με τον υπόλοιπο νεφικό σχηματισμό, λόγω της έναρξης διάλυσης του. Συνεχίζοντας την ανάλυση, παρατηρείται ότι τρεις είναι οι έντονα ανεπτυγμένες κορυφές που ξεχωρίζουν με το έντονο φωτεινό πορτοκαλί χρώμα κατά μήκος του ηπειρωτικού κορμού της χώρας, καθώς βρίσκονται στη φάση ανάπτυξης. Στην υπόλοιπη Μακεδονία εντοπίζονται χαμηλότερα παχιά νέφη με μεγάλες υδροσταγόνες, με ανοιχτό ροζ χρώμα. Όντως, το τεφίγραμμα των 06.00UTC, για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, επιβεβαιώνει την ύπαρξη μεγάλου ποσοστού υγρασίας στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

Στις 11.30UTC είναι πλέον ξεκάθαρες οι περιοχές του συστήματος που καλύπτονται από νέφη μεγάλου οπτικού πάχους (φωτεινό πορτοκαλί χρώμα) από αυτές που βρίσκονται στη φάση διάλυσης και αποτυπώνονται με σκούρο πορτοκαλί, στη γραμμή δηλαδή του μετώπου. Νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος υπονοούν την ύπαρξη ισχυρών ανοδικών ρευμάτων, η εμφάνιση των οποίων οφείλεται κυρίως στην έντονη θερμοβαθμίδα που επικρατεί πάνω από τη χώρα και αναγκάζει τις θερμότερες αέριες μάζες, που είναι εμπλουτισμένες με υγρασία, να ολισθήσουν πάνω στις ψυχρές, οι οποίες έχουν κατέλθει από βορειότερες χώρες της Ευρώπης παρασυρόμενες από τη μεσημβρινή κυκλοφορία που επικρατεί. Έγκυρη παρατήρηση μπορεί να γίνει έως τις 13.00UTC, που το ανακλώμενο φως του ήλιου το επιτρέπει. Είναι η στιγμή που το νεφικό στρώμα πάνω από τον κορμό της χώρας αρχίζει να αλλάζει σύσταση, εφόσον σκουραίνει το πορτοκαλί χρώμα που τα απεικονίζει, έχει εξαπλωθεί προς βορειοανατολικά και το σύστημα έχει αποκτήσει μεγάλη οριζόντια έκταση. Μετά από μισή ώρα, το νεφικό στρώμα αρχίζουν να τροφοδοτούν τέσσερις νέοι νεφικοί πυρήνες, η ανάπτυξη και η μικροφυσική των οποίων δεν δύναται να περιγραφεί από αυτό το συνδυασμό, ωστόσο η ανάλυση τους έχει πραγματοποιηθεί από το συνδυασμό Day Convective Storm.



Σχ. 53. Εικόνες RGB - Day Microphysics, για τις 16 Ιουλίου 2017

Την ερχόμενη ημέρα, στις 10.00UTC, η ούρα του MCS πάνω από την περιοχή των Βαλκάνιων, στο Σχ. 54, σχηματίζεται από λεπτά νέφη Cirrus (πράσινο χρώμα). Το κέντρο του συστήματος και των έντονων κατακόρυφων αναπτύξεων είναι μετατοπισμένο, πλέον, στο βορειοδυτικό Αιγαίο, όπου και τα νέφη αποδίδονται με έντονο φωτεινό πορτοκαλί χρώμα, απόδειξη επίσης των ανοδικών κινήσεων. Στις 11.00UTC, οπότε και η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης έχει μετατοπιστεί στη δυτική Στερεά Ελλάδα και Πελοπόννησο το οποίο και σηματοδοτεί τη λήξη των φαινομένων σε εκείνες τις περιοχές, οι νότιες χώρες της Βαλκανικής χερσονήσου καθώς και η βόρεια Ελλάδα κατά τόπους καλύπτεται από παχιά, μεσαία, βροχοφόρα νέφη (ροζ αποχρώσεις) ενώ σε ορισμένες περιοχές αυτά φαίνονται να υπερκαλύπτονται από νέφη Cirrus (πράσινες αποχρώσεις). Η εικόνα αυτή επικρατεί έως τις 12.30UTC. Από τότε και έπειτα, το σύστημα αρχίζει να εξασθενεί, τα νέφη να περιορίζονται σε οριζόντια έκταση αλλά και σε ύψος, καθώς και η σύσταση τους αρχίζει να αλλάζει από μικρούς παγοκρυστάλλους σε μεγάλους, τα οποία και αποτυπώνονται με τη τροποποίηση του χρώματος των νεφών.



Σχ. 54. Εικόνες RGB - Day Microphysics, για τις 17 Ιουλίου 2017

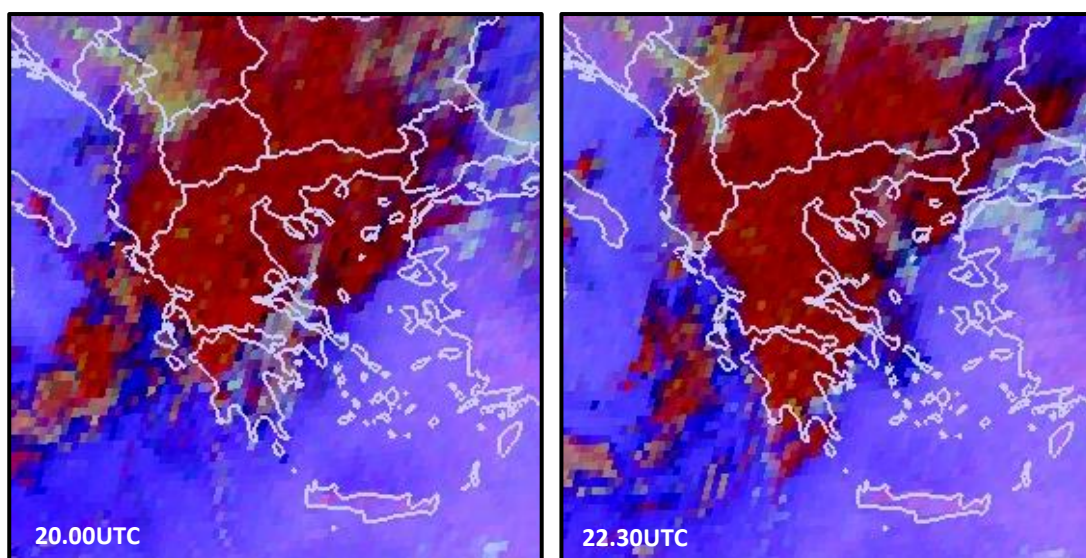
θ. Ανάλυση εικόνων RGB : Night Microphysics

Ο τελευταίος συνδυασμός είναι το RGB Night Microphysics. Στον συγκεκριμένο ανιχνεύονται περιοχές με έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης νέφη, τα οποία εμφανίζονται στις εικόνες κατά τη διάρκεια της νύχτας με κίτρινες κουκίδες σε βαθύ κόκκινο φόντο. Σκούρες μπλε αχνές σκιές υπονοούν λεπτά νέφη Cirrus. Ο συνδυασμός αυτός χρησιμοποιείται ορθότερα για την ανάλυση των νεφών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή από τη στιγμή που παύει να επηρεάζει η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Στις 20.00UTC, παρόλο που το σύστημα και τα ισχυρά φαινόμενα έχουν συγκεντρωθεί πλέον στα νότια της χώρας και στην ευρύτερη περιοχή της Στερεάς Ελλάδας, στη νεφική

ασπίδα που απλώνεται πάνω από ολόκληρη την ηπειρωτική περιοχή της Ελλάδας και αποτυπώνεται με βαθύ κόκκινο χρώμα στο Σχ. 55 εντοπίζονται διάσπαρτες κίτρινες κουκκίδες, από την κεντρική Μακεδονία έως και τα βορειοδυτικά της Πελοποννήσου, ένδειξη της ύπαρξης διάσπαρτων cb στις περιοχές αυτές.

Καθώς το σύστημα μετατοπίζεται με γρήγορο ρυθμό νοτιότερα, λιγότερες πλέον οι κίτρινες κουκκίδες, οι οποίες αντιστοιχούν σε κορυφές νεφών μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης, εντοπίζονται στις 22.30UTC στο νοτιοδυτικό άκρο της Πελοποννήσου. Επιπλέον, οι αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες του υπερύθρου για εκείνο το χρονικό διάστημα υποδεικνύουν πως οι κορυφές των νεφών, τα οποία συνθέτουν τη νεφική ασπίδα που καλύπτει την περιοχή, έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται πιο θερμές. Όλα αυτά συνεπάγονται και την εξασθένηση του συστήματος, κάτι το οποίο συνέβη μετά από λίγο στην περιοχή. Στον υπόλοιπο ελλαδικό χώρο μέχρι και το βορειοδυτικό Αιγαίο επικρατεί το βαθύ κόκκινο χρώμα, δηλαδή οπτικά παχιά νέφη, τα οποία όμως δεν φτάνουν σε σημαντικό ύψος στην τροπόσφαιρα.

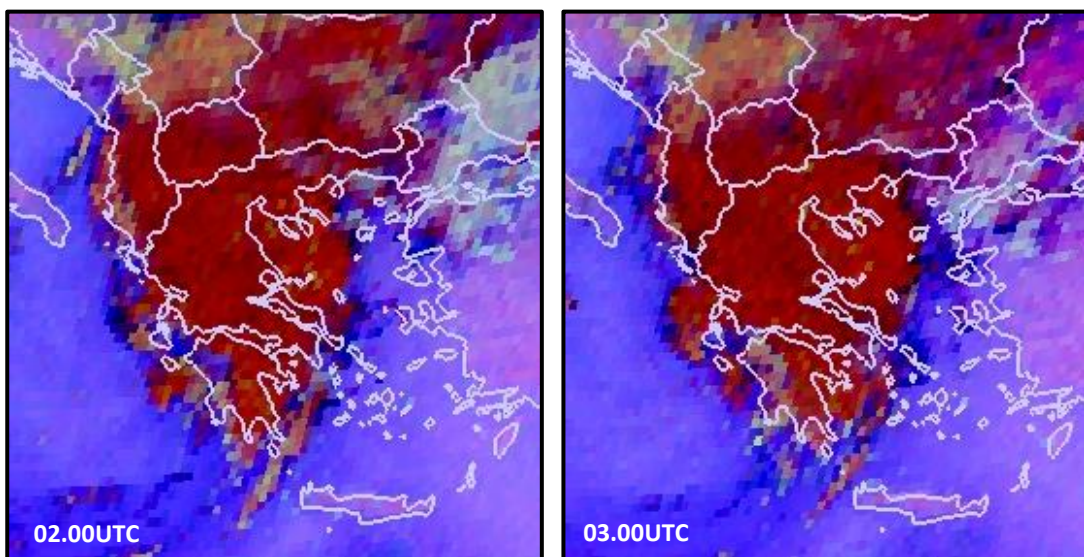


Σχ. 55. Εικόνες RGB - Night Microphysics, για τις 16 Ιουλίου 2017

Τις επόμενες ώρες που το σύστημα μετατοπίζεται σταδιακά προς τα βορειοανατολικά κατά την κίνηση της γενικότερης ροής και του αεροχειμάρρου, δεν εμφανίζονται κίτρινες κουκκίδες, παρά μόνο κυριαρχούν σε όλη την έκταση του συστήματος παχιά υψηλά νέφη. Μέχρι τις 02.00UTC, οι πρώτες κατακόρυφα ανεπτυγμένες κορυφές νεφών μεγάλου οπτικού πάχους θα εμφανιστούν πάνω από τις Σποράδες και μισή ώρα αργότερα, στις 2.30UTC, πάνω από τη Χαλκιδική (Σχ. 56). Πρόκειται για την περιοχή, όπου επικράτησαν ισχυρά ανοδικά ρεύματα εκείνο το χρονικό διάστημα, οφειλόμενα στην έντονη σύγκλιση των άνεμων στην επιφάνεια, παρασύροντας τα νέφη να αναπτυχθούν σε μεγαλύτερο ύψος. Τέλος, να σχολιαστεί πως πάνω από την Πελοπόννησο και τα νοτιοδυτικά παράλια, όπου το σύστημα έχει

εξασθενήσει, το πάχος των νεφών έχει μικρύνει σημαντικά και τα νέφη έχουν κατέλθει στην ατμόσφαιρα, στο οποίο ευθύνεται η θέση της δυναμικής τροπόπαυσης, που λόγω του ότι σε εκείνη την περιοχή έχει κατέλθει σημαντικά, επιτρέπει τα νέφη αντίστοιχα να αναπτυχθούν μέχρι ένα χαμηλότερο ύψος. Αντίθετα, στον ηπειρωτικό κορμό η τροπόπαυση φτάνει μέχρι το ύψος των 300hPa, σύμφωνα με την σχετική κατακόρυφη τομή, επιτρέποντας τα νέφη να διατηρήσουν μεγάλο οπτικό πάχος, όπως σχολιάστηκε και παραπάνω.

Από τις 03.00UTC και έπειτα οι πληροφορίες που εξάγονται από τις εικόνες αυτού του συνδυασμού δεν είναι έγκυρες, καθώς αρχίζει και επιδρά σε αυτές αλλοιωτικά η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.



Σχ. 56. Εικόνες RGB - Night Microphysics, για τις 17 Ιουλίου 2017

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη ενός μέσης κλίμακας νεφικού συστήματος κατακόρυφης ανάπτυξης (MCS) που επηρέασε τον ελλαδικό χώρο τις 16 και 17 Ιουλίου 2017. Αρχικά έγινε ανάλυση της συνοπτικής κατάστασης για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και εξετάστηκαν οι μετεωρολογικές παράμετροι που δημιούργησαν ένα ευνοϊκό, για την ανάπτυξη ενός τέτοιου σημαντικού συστήματος, περιβάλλον. Έπειτα μελετήθηκαν και περιγράφηκαν δορυφορικές εικόνες, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τα φυσικά χαρακτηριστικά του, το οποίο και αποτελούσε τον κύριο σκοπό της εργασίας. Τέλος, σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται όλα τα συμπεράσματα τα οποία έχουν προκύψει από την προαναφερθείσα μελέτη.

➤ Συνοπτική ανάλυση – Τεφίγραμμα

Στις 16 Ιουλίου 2017 τη χώρα απασχόλησε μια διαταραχή των ανώτερων στρωμάτων της τροπόσφαιρας, που πέρασε από τον ηπειρωτικό κορμό τις θερμές ώρες της μέρας και είχε ως αποτέλεσμα την εκδήλωση έντονων φαινομένων. Τις πρώτες πρωινές ώρες παρατηρήθηκε στην ισοβαρική επιφάνεια των 500hPa και πάνω από την κεντρική Ευρώπη, αυλώνας, ο οποίος είχε επεκταθεί μέχρι την Ιταλία και τα Βαλκάνια. Αποτέλεσμα ήταν να καταστεί η κυκλοφορία μεσημβρινή και να μετακινηθούν ψυχρές αέριες μάζες σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Παράλληλα, η εισβολή θερμών αέριων μαζών από την Τουρκία είχε σαν αποτέλεσμα την διατήρηση ενισχυμένης θερμοβαθμίδας στο επίπεδο των 850hPa και ως επακόλουθο ένα ψυχρό μέτωπο κατά μήκος των Βαλκανίων, το οποίο στη διάρκεια της ημέρας παρουσίασε μετατόπιση προς νότια-νοτιοανατολικά, όσο συνεχιζόταν η ψυχρή μεταφορά από τη βόρεια Ευρώπη, καταλήγοντας τελικά πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας. Στη μετωπική επιφάνεια επικράτησε ανολίσθηση του θερμού, υγρού κορεσμένου αέρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτεταμένου και κατακόρυφα ανεπτυγμένου νεφικού συστήματος.

Τις απογευματινές ώρες της ίδιας μέρας η κυκλοφορία καθίσταται κυκλωνική πάνω από τη χώρα, ενώ το ίδιο βράδυ το σύστημα αποκόπτεται από την κυκλοφορία, με το κέντρο των χαμηλών γεωδυναμικών υψών να εντοπίζεται πάνω από το Ιόνιο. Η ανατολικότερη διάταξη του κέντρου κυκλωνικής κυκλοφορίας στο επίπεδο των 850hPa, τις πρώτες πρωινές ώρες της 17^{ης} Ιουλίου, χαρακτήρισε την ατμόσφαιρα ως βαροκλινική. Η πτώση των γεωδυναμικών υψών στις δυο ισοβαρικές επιφάνειες, 500hPa και 850hPa, συνδυάστηκε με την έντονη επιφανειακή σύγκλιση στην περιοχή του βόρειου Αιγαίου, λόγω της ισχυρής θερμοβαθμίδας, με αποτέλεσμα ισχυρά ανοδικά ρεύματα στην περιοχή. Τις μεσημβρινές ώρες η ανατολικότε-

ρη μετατόπιση του κλειστού χαμηλού των 500hPa θα τη μετατρέψει σε βαροτροπική και το σύστημα θα εξασθενίσει.

Όσον αφορά τον αεροχειμάρρο, η διάταξη του έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των φαινομένων. Αρχικά, έχοντας αποκτήσει βόρεια συνιστώσα, εντοπίζεται δυτικά του αυλώνα, εντείνοντας τη βάθυνση του προς νότια. Η θέση του jet streak, πάντα στο δυτικό κλάδο του αεροχειμάρρου, ευνόησε την ισχυροποίηση των ανοδικών κινήσεων και εντατικοποίηση των φαινομένων αρχικά στον ηπειρωτικό κορμό και έπειτα νοτιότερα στην Πελοπόννησο, σύμφωνα με την πορεία που ακολούθησε και ο αεροχειμάρρος, καταλήγοντας στις 17 Ιουλίου στην περιοχή των έντονων επιφανειακών συγκλίσεων στο Αιγαίο. Πέραν του αεροχειμάρρου, στην μεγάλη ένταση των ανοδικών ρευμάτων συνεισέφερε και η αναδίπλωση της τροπόπαυσης, την οποία συνόδευσε εισβολή ξηρού ψυχρού στρατοσφαιρικού αέρα στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας, φτάνοντας έως και τα 680hPa δυτικά του συστήματος. Ο ξηρός στρατοσφαιρικός αέρας ψηλά σε συνδυασμό με την ύπαρξη υγρασίας στα χαμηλότερα επίπεδα δημιούργησαν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για την ύπαρξη δυναμικής αστάθειας στην ατμόσφαιρα, η οποία ενέτεινε με τη σειρά της τις ανοδικές κινήσεις.

Τέλος, το τεφίγραμμα του αεροδρομίου της Αθήνας επιβεβαιώνει πως στις 16 Ιουλίου η ατμόσφαιρα της ευρύτερης περιοχής αποτέλεσε δυναμικώς ασταθής, κυρίως τις βραδινές ώρες, οπότε και το κέντρο του συστήματος εντοπιζόταν στη νότια Ελλάδα. Αντιθέτως, το τεφίγραμμα της Θεσσαλονίκης πληροφορεί για μια πιο ευσταθή ατμόσφαιρα, ενώ άλλοι ήταν οι παράγοντες που πυροδότησαν τα ανοδικά ρεύματα.

➤ Δορυφορική ανάλυση

Στη συγκεκριμένη μελέτη του φαινομένου, το κανάλι των 10,8μm αποτέλεσε ένα σημαντικό εργαλείο για το χαρακτηρισμό των επιμέρους συστημάτων που αναπτύχθηκαν πάνω από την Ελλάδα στις 16 και 17 Ιουλίου, με γνώμονα τη θερμοκρασία των κορυφών των νεφών. Σύμφωνα, λοιπόν, με το κανάλι του υπερύθρου, οι πρώτοι μεμονωμένοι νεφικοί πυρήνες που γεννήθηκαν στη βόρεια Ελλάδα, οι οποίοι κατά την ένωση τους με άλλους γειτονικούς δημιούργησαν μεγάλους νεφικούς σχηματισμούς, παρουσίασαν μικρή διάρκεια ζωής.

Τις μεσημβρινές ώρες της 16^{ης} κατά μήκος του μετώπου αναπτύχθηκε ένα μέσης κλίμακας σύμπλεγμα πολυκύτταρων καταιγίδων (Multicell Cluster Storm), συγκεκριμένα πάνω από την κεντρική Μακεδονία, τη Θεσσαλία και την Ήπειρο. Η ορογραφία της περιοχής έπαιξε σημαντικό ρόλο, καθώς η εξέλιξη του πραγματοποιήθηκε πάνω από την Πίνδο. Η συγκεκριμένη δορυφορική εικόνα επέτρεψε να αποτυπωθεί η παράλληλη στη μετωπική επιφάνεια διάταξη των ακμών του συμπλέγματος, καθώς και προεξέχουσες, από τη νεφική ασπίδα, κορυφές. Στη συνέχεια, το σύστημα μετατοπίστηκε νοτιοδυτικά.

Νωρίς το απόγευμα, καταιγιδόφορο σύστημα σχήματος-V (enchanced-V shaped) επηρέασε κυρίως τη δυτική Στερεά Ελλάδα και βορειοδυτική Πελοπόννησο, όμως η ψυχρή νεφική ασπίδα του συστήματος κάλυπτε μεγάλο τμήμα της χώρας. Νέοι νεφικοί πυρήνες δημιουργούνταν συνεχώς στην περιοχή των ανοδικών ρευμάτων και τροφοδοτούσαν το σύστημα, το οποίο διατηρήθηκε έως τις βραδινές ώρες, οπότε και έσβησε μετατοπισμένο πάνω από την Πελοπόννησο. Να σχολιαστεί πως το χαρακτηριστικό σχήμα που είχε αποκτήσει οφείλεται στους δυνατούς ανέμους στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας, καθώς εμφανίστηκε στο σημείο τομής των δυο αεροχειμάρρων υποτροπικού και πολικού. Επιπλέον, η βαροκλινικότητα της ατμόσφαιρας εκείνο το διάστημα αποτέλεσε ευνοϊκή συνθήκη.

Τέλος, τις πρωινές ώρες της ερχόμενης ημέρας, ένα νέο μεγάλο νεφικό σύστημα θα ξεκινήσει στο βορειοδυτικό Αιγαίο, πάνω από Σποράδες και Χαλκιδική, από την συνένωση δυο ξεχωριστών νεφικών κυττάρων. Η εξέλιξη των φαινομένων εξαιτίας της συνένωσης αυτής ήταν δραματική, εφόσον επήλθαν καταστροφές, κυρίως στη Χαλκιδική. Τα χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος, η διάρκεια, το σχήμα και η έκταση, το ενέταξαν στην κατηγορία ενός κυκλικού καταιγιδόφορου συστήματος μέσο-β κλίμακας (Meso-β Circular Convective System, M-βCCS).

Στο κανάλι 5 των υδρατμών ελήφθησαν πληροφορίες σχετικά με την υγρασία στην ανώτερη τροπόσφαιρα, από τις οποίες προέκυψαν συμπεράσματα για τις δυναμικές συνθήκες και τους ανέμους που επικρατήσαν τις δυο μέρες του Ιουλίου. Στις πρώτες, λοιπόν, εικόνες της 16^{ης} αποτυπώνεται η θέση του αυλώνα, με τις πιο σκούρες αποχρώσεις να επικρατούν στην περιοχή όπου εντοπίστηκε και τις πιο φωτεινές στον ανατολικό κλάδο του και κατά μήκος του μετώπου, αλλά κυρίως πάνω από τον ελλαδικό χώρο. Οι σκούρες αποχρώσεις, επίσης, επιβεβαιώνουν την ξηρή στρατοσφαιρική εισβολή, επακόλουθο της ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης. Ανοιχτόχρωμες περιοχές οφείλονται στα νέφη που έχουν αναπτυχθεί λόγω ανοδικών ρευμάτων μπροστά από την ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, αλλά και στο μεγάλο ύψος της τροπόπαυσης τοπικά, το οποίο επέτρεψε σ' αυτά να αναπτυχθούν σημαντικά. Τέλος, η θέση του αεροχειμάρρου εντοπίστηκε στην περιοχή με την απότομη αντίθεση στα επίπεδα του γκρι, καθώς αποτελούν μεταβατικές, για το ύψος της τροπόπαυσης, ζώνες.

Τις απογευματινές ώρες η δυναμική τροπόπαυση βάθυνε ακόμα περισσότερο, στα δυτικά του συστήματος, πάνω από το Ιόνιο, παρασέρνοντας τον ξηρό αέρα της στρατόσφαιρας ακόμα χαμηλότερα στην τροπόσφαιρα, ενώ αντίστοιχη μετακίνηση προς νότια παρουσίασε και ο αεροχείμαρρος. Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τη βαροκλινικότητα της ατμόσφαιρας, συνέβαλλαν στην κυκλογέννεση που προέκυψε στο τέλος της ημέρας πάνω από το Ιόνιο και την Πελοπόννησο. Στις 17 Ιουλίου, βορειοανατολικά του κέντρου του χαμηλού, στο βορειοδυτικό Αιγαίο, το έντονο φωτεινό χρώμα στις δορυφορικές εικόνες πρόδιδε την μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη ενός εκτεταμένου νεφικού συστήματος, η ύπαρξη του οποίου ευθυνόταν στην ύπαρξη ανά-μετώπου πάνω από το Αιγαίο, όπως αποδείχτηκε στις εικόνες

των υδρατμών, ενώ το σημαντικό ύψος των νεφών προέκυψε από το ευνοϊκό ύψος της τροπόπαυσης.

Τόσο στις διαφορές θερμοκρασίας λαμπρότητας των δυο καναλιών των υδρατμών 5-6, όσο και στις διαφορές μεταξύ των καναλιών 5-9 πραγματοποιήθηκε διάκριση των χαμηλών-μεσαίων νεφών από τα υψηλά και επισημάνθηκαν οι προεξέχουσες από την τροπόπαυση κορυφές. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι κορυφές που αναπτύχθηκαν πάνω από την οροσειρά της Πίνδου και με τη βοήθεια των ανοδικών ρευμάτων, μπροστά από τη γραμμή του μετώπου, έφτασαν στο ύψος της τροπόπαυσης και το ξεπέρασαν. Οι θερμοκρασίες, επίσης, που καταγράφηκαν από τις κορυφές αυτές ήταν ιδιαίτερα χαμηλές. Το σύστημα σχήματος-V, επίσης, όφειλε το σχήμα του στις υπερυψωμένες κορυφές που δημιουργήθηκαν στην περιοχή των ανοδικών κινήσεων, όπου εντοπιζόταν και η αριστερή έξοδος του αεροχειμάρρου. Τέλος, το τελευταίο σύστημα που γεννήθηκε στην περιοχή του Αιγαίου, περιελάμβανε επίσης νέφη μεγάλης κατακόρυφης ανάπτυξης που ξεπέρασαν την 'όχι τόσο υψηλή' σε εκείνη την περιοχή τροπόπαυση. Παρ'ολ'αυτά, το ύψος τους, κρίνοντας από τις ελάχιστες θερμοκρασίες κορυφών, δεν ήταν τόσο μεγάλο όσο των αναπτύξεων της προηγούμενης ημέρας.

Στις δορυφορικές εικόνες διαφοράς των T10.8-T12.0, στις οποίες διακρίθηκαν τα οπτικά παχιά νέφη από τα λεπτά τύπου cirrus, έγινε ξεκάθαρο πως τα νέφη τα οποία κάλυψαν τα βόρεια και κεντρικά τμήματα της χώρας, τις μεσημβρινές-απογευματινές ώρες της 16^{ης} Ιουλίου, δημιουργώντας ένα σύμπλεγμα καταιγιδοφόρων νεφών, αφορούσαν οπτικώς παχιά νέφη που περιείχαν μεγάλες ποσότητες νερού. Η ανατροφοδότηση των ήδη προϋπάρχουσων νεφών με υγρασία προέκυπτε από τις θερμές και υγρές αέριες μάζες που πήγαζαν από την Τουρκία, με διέλευση πάνω από το Αιγαίο. Παρομοίως, οπτικώς παχιά και πλούσια σε υγρασία αποτέλεσαν τα νέφη που δημιούργησαν το σύστημα που επηρέασε τη νότια Ελλάδα κατά τις βραδινές ώρες. Τέλος, σε συμφωνία με αντίστοιχη κατακόρυφη τομή κατά μήκος του Αιγαίου, τα μεγαλύτερα ποσά υγρασίας τα κατείχαν τα νέφη που αναπτύχθηκαν τις πρώτες πρωινές ώρες της επομένης, πάνω από την περιοχή της Χαλκιδικής και τις Σποράδες. Συνεπώς, επρόκειτο για νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος που έφταναν μέχρι το ύψος της τροπόπαυσης.

Ο συνδυασμός Airmass χρησιμοποιήθηκε ώστε να διακριθούν οι θερμές-τροπικές από τις ψυχρές-πολικές αέριες μάζες, η στρατοσφαιρική εισβολή καθώς και η θέση του αεροχειμάρρου. Στις συγκεκριμένες δορυφορικές εικόνες έχει αποδοθεί με κατάλληλο χρώμα ο ψυχρός πολικής προέλευσης αέρας που έχει κατέλθει μέχρι τα Βαλκάνια και αργότερα μέχρι την κεντρική Ελλάδα παρασέρνοντας ομοιοτρόπως και το σύστημα νοτιότερα. Αντίθετα, στα νοτιοανατολικά, πάνω από την ανατολική Μεσόγειο, αποτυπώθηκε η ύπαρξη θερμών και υγρών αέριων μαζών. Οι δυο αυτές αέριες μάζες προκαθόρισαν τη γραμμή της μετωπικής ζώνης, όπου και εξελίχθηκαν τα φαινόμενα τις πρωινές έως απογευματινές ώρες της 16^{ης}. Στη διάρκεια της ημέρας, ξηρός αέρας κατήλθε από τη στρατόσφαιρα στην ανώτερη αλλά και μέση τροπόσφαιρα πάνω από τα νοτιοανατολικά της Ιταλίας, στην περιοχή όπου εντοπιζόταν η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης. Καθ'όλη τη διάρκεια εξέλιξης των φαινομένων, ο

ανατολικός κλάδος της δυναμικής τροπόπαυσης βρισκόταν σε ευνοϊκή θέση, ώστε οι ανοδικές κινήσεις να υφίστανται πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό της χώρας τις απογευματινές ώρες και τη Στερεά Ελλάδα και Πελοπόννησο τις βραδινές. Όσον αφορά τον αεροχείμαρρο, ξεκινώντας αρχικά από τις βόρειες χώρες της Βαλκανικής χερσονήσου, υπήρξε συνεχής μετακίνηση του προς τα νότια, ευρισκόμενος πάντα δυτικά-βορειοδυτικά του συστήματος, μέχρι τελικά να καταλήξει πάνω από το Ιόνιο, με την αριστερή του έξοδο επίσης σε ευνοϊκή θέση για την ενίσχυση των ανοδικών ρευμάτων. Τέλος, στο συνδυασμό αυτό επιβεβαιώνονται τα χαρακτηριστικά του ανά-μετώπου πάνω από το Αιγαίο, την 17^η Ιουλίου, με ψυχρές αέριες μάζες να αποτυπώνονται πάνω από τον ηπειρωτικό κορμό και το Ιόνιο και ψυχρότερο στρατοσφαιρικό αέρα νοτιοανατολικά της Ιταλίας.

Ενδιαφέρουσα αποτέλεσε η ανάλυση στο συνδυασμό Day Convective Storm η οποία ασχολείται με τη μικροφυσική των νεφών, καθώς και το οπτικό τους πάχος, μόνο όμως τις ώρες της ημέρας που επηρεάζει η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία. Διαπιστώθηκε πως κατά την έναρξη του συστήματος οι κορυφές των νεφών στη δυτική Μακεδονία αποτελούνταν από μικρούς παγοκρυστάλλους, φτάνοντας μάλιστα σε αρκετά μεγάλο ύψος, κρίνοντας από τη θερμοκρασία τους. Το ίδιο ίσχυε και για τα νέφη κατά μήκος της οροσειράς της Πίνδου που αναπτύχτηκαν λίγο αργότερα, τα οποία και αποτέλεσαν νέφη μεγάλου οπτικού πάχους. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξε και η ανάλυση του συνδυασμού Day Microphysics.

Στον τελευταίο συνδυασμό Night Microphysics εντοπίζονται με ακρίβεια νέφη cumulonimbus, καθώς επίσης και νεφικές αναπτύξεις μεγάλου οπτικού πάχους πάνω από τη χώρα, για την χρονική περίοδο που παύει να επηρεάζει η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αργά το απόγευμα της 16^{ης} κίτρινες κουκίδες που απέδιδαν τις σημαντικά ανεπτυγμένες και ψυχρές κορυφές νεφών cb εμφανίζονταν διάσπαρτες στον ηπειρωτικό κορμό από τη δυτική Μακεδονία έως και τη δυτική Στερεά Ελλάδα, ενώ αργότερα, τις βραδινές ώρες, περιορίστηκαν νοτιότερα, πάνω από την Πελοπόννησο, σε συμφωνία και με την κίνηση του συστήματος. Κατά το τελευταίο σύστημα, το οποίο επηρέασε την ευρύτερη περιοχή του βορειοδυτικού Αιγαίου, επικράτησαν, καθ'όλη της διάρκειας ζωής του, νέφη μεγάλου οπτικού πάχους, ενώ οι κορυφές των cumulonimbus εντοπίζονταν πάνω από τις Σποράδες και τη Χαλκιδική.



6. Βιβλιογραφία

Arnaud Y., Desbois M. and Maizi J. (1992): Automatic tracking and characterization of convective systems on Meteosat pictures. *J. Appl. Meteorol.*, 31, 443–453

Augustine J. A., Tollerud E. I. and Jamison B. D. (1989): Distributions and other general characteristics of mesoscale convective systems during 1986 as determined from GOES infrared imagery. *Pp. 437–442 in preprint volume of the 12th Conference on weather analysis and forecasting, 2–6 October 1989, Monterey, CA, US*

Bluestein H. B. and Jain M. H. (1985): Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1711–1732

Brandes E. A. (1990): Evolution and structure of the 6-7 May 1985 Mesoscale Convective System and Associated Vortex. *NOAA. Env. Laborat., National, Severe Storms Laboratory, Oklahoma*, 118, 109-126

Browning K. A. and Hill F. F. (1984): Structure and evolution of a mesoscale convective system near the British Isles, *Quart. J. R. Met. SOC.*, 110, pp. 897-913

Browning K. A. (1985): Conceptual models of precipitation systems. *Meteorological Magazine*, 114(1359), 293-319

Brunner J. C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S. and Rabin R. M. (2007): A Quantitative Analysis of the Enhanced-V Feature in Relation to Severe Weather. *Vol 22*, 853-872

Cohen J., Silva Dias M. A. F. and Nobre C. (1995): Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Mon. Wea. Rev* 123:3163–3174

Collander R. S. (1993): A ten-year summary of severe weather in mesoscale convective complexes, Part 2: Heavy rainfall. *Preprints, 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc.*, 638–641

Cotton W. R. and R. Anthes (1989): Cloud and Storm Dynamics. *Academic Press*, 630-657

Curic M., Janc D. and Vuckovic V. (2009): The influence of merging and individual storm splitting on mesoscale convective system formation. *Elsevier, Atmospheric Research* 9, 21–29

Educational Website: <http://www.theweatherprediction.com/>

Feidas H. (2011): Study of a Mesoscale Convective Complex over the Eastern Mediterranean basin with Meteosat Data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 5-9 September 2011, Oslo, Norway, 8pp*

Feidas H. and Giannakos A. (2011): Identifying precipitating clouds in Greece using multispectral infrared Meteosat Second Generation satellite data. *Theor Appl Climatol* 104:25-42

Feidas H. (2017): Satellite-observed features of a mesoscale convective complex over SE Europe. *International Journal of Remote Sensing*, 38:22, 6219-6246

Feidas H. (2018): Spectral features of convective cloud tops. *Autumn School 2018 on the "Use of Satellite Data and Products for severe weather nowcasting", 24 - 28 September 2018, Thessaloniki, Greece*

Feidas H. (2018): Storm types and their characteristics. *Autumn School 2018 on the "Use of Satellite Data and Products for severe weather nowcasting", 24 - 28 September 2018, Thessaloniki, Greece*

Fritz S., Laszlo I. (1993): Detection of water vapor in the stratosphere over very high clouds in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 98, D12, pp 22959-22967

Fritsch J. M., and Forbes G. S. (2001): Mesoscale convective systems. *Severe Convective Storms, Meteor. Monogr., No. 50, Amer. Meteor. Soc., 323–357*

Fujita T. T. (1978): Manual of downburst identification for Project NIMROD. *SMRP 156, University of Chicago. 104 pp.*

Fujita T. T. (1981): Mesoscale aspects of convective storms. *Proc. IAMAP Symp. Nowcasting: Mesoscale Observation and Short-Range Prediction. Hamburg, European Space Agency, 3-10*

Fujita T. T. (1982): Infrared, stereo-height, cloud-motion, and radar-echo analysis of SESAME-day thunderstorms. *Preprints, 12th Conference on Severe Local Storms (San Antonio), AMS, Boston, pp. 213-216*

George J. J. (1960): Weather and Forecasting for Aeronautics. *Academic Press, 410-415*

Georgiev C. G. and Kozinarova G. (2009): Usefulness of satellite water vapour imagery in forecasting strong convection: A flash-flood case study. *Atmos. Res.*, 93 295303

Georgiev C. G. and Santurette P. (2009): Mid-level jet in Intense Convective Environment as seen in the 7.3 μm Satellite Imagery. *Atmos. Res.* 93, 277–285



Georgiev C. G. (2011): Satellite Image Interpretation and Applications. *EUMeTrain Online Course*, 10–30 June 2011

Georgiev C. G. (2011): Usefulness of MPEF DIVERgence product in diagnosing the environment of deep convection. *6th European Conference on Severe Storms (ECSS 2011)*, 3–7 October 2011, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain

Georgiev C. G. and Santurette P. (2018): Diagnosing upper-level dynamics by WV imagery as a key forecast issue. *EUMETSAT – AUTH Training Workshop “Use of satellite data and products for severe weather nowcasting”*, 24–28 Sep 2018, Thessaloniki, Greece

Georgiev C. G. and Santurette P. (2018): Use of Water Vapour imagery in nowcasting severe convection over South-Eastern Europe. *EUMETSAT – AUTH Training Workshop “Use of satellite data and products for severe weather nowcasting”*, 24–28 Sep 2018, Thessaloniki, Greece

Hane C. E., 1986: Extratropical squall lines and rainbands. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P. Ray, Ed., American Meteorological Society, 359–389

Heymsfield G. M., Szejwach G., Schotz S. and Blackmer R. H., JR (1983): Upper-Level Structure of Oklahoma Tornadoic Storms on 2 May 1979. II: Proposed Explanation of “V” Pattern and Internal Warm Region in Infrared Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol 40, 1756-1767

Heymsfield G.M. and Blackmer R.H., JR (1988): Satellite-observed characteristics of Midwest severe thunderstorm anvils. *Vol.116*, 2200-2224

Houze R. A. Jr. (1977): Structure and dynamics of a tropical squall-line system. *Mon. Weather Rev.*, 105, 1540–1567

House R. A., Jr. (1993): Cloud Dynamics. *chap. 4*, 107-129, Academic Press, California, U.S.

Houze R. A. Jr. (2004), Mesoscale convective systems. *Rev. Geophys.*, 42, RG4003

Inoue T. (1985): On the Temperature and Effective Emissivity Determination of Semi-Transparent Cirrus Clouds by Bi-Spectral Measurements in the 10-Mm Window Region. *Journal of Meteorological Society of Japan* 63: 88–99

Inoue T. (1987): A Cloud Type Classification with NOAA-7 Split-Window Measurements. *Journal of Geophysics Research* 92: 3991–4000

Jirak I. L., W. R. Cotton, and R. L. McAnelly (2003): Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2428-2449

Kerkmann J., H. J. Lutz, M. König, J. Prieto, P. Pylkko, H. P. Roesli, D. Rosenfeld et al. (2006): MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. Available online at <http://eumetrain.org/IntGuide/>. Accessed 21 July 2016

Kolios S. and Feidas H. (2010): A warm season climatology of mesoscale convective systems in the Mediterranean basin using satellite data. *Theor Appl Climatol* 102:29–42

Leary C.A. and Houze R. A., JR. (1979): The Structure and Evolution of Convection in a Tropical Cloud Cluster, *J. Atmos. Sci.*, 36, 437-457

Lutz H. J., Inoue T., Schmetz J. (2003): Comparison of a Split-window and a Multi-spectral Cloud Classification for MODIS Observations. *Journal of the Met. Soc. of Japan*, Vol.81, No.. 3, pp. 623-631

Machado L. A., Lima W. F., Pinto Jr, O., and Morales, C. A. (2009): Relationship between cloud-to-ground discharge and penetrative clouds: A multi-channel satellite application. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , Instituto de Astronomia, Atmospheric Research* 93, 304-309

Maddox R. A. (1980): Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61, 1374–1387

Mathon V., Laurent H. and Lebel T. (2002): Mesoscale Convective System Rainfall in the Sahel, *LTHE, IRD, Grenoble, France*, 41, 1081-1092

McAnelly R. L. and Cotton W. R. (1989): The precipitation life cycle of Mesoscale Convective Complexes over the central United States. *Mon. Weather Rev.*, 117, 784–808

McCallum E. and Waters A. J.: Severe thunderstorms over south-east England, 20/21 July 1992: Satellite and radar perspective of a mesoscale convective system. *Meteorological Office, Bracknell*, 198-208

McCann D. W. (1983): The enhanced-V, a satellite observable severe storms signature. *Mon. Wea.Rev.*, 111, 887–894

Meteorological Chart Site: www.wetter3.de

Morel C. and Senesi S. (2002): A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery II: Characteristics of European mesoscale convective systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 1953-1992

Negri A. J. (1982): Cloud-top structure of tornadic storms on 10 April 1979 from rapid scan and stereo satellite observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 1151-1159

Putsay M., Szenyan I. and Simon A. (2009): Case study of Mesoscale Convective Systems over Hungary on 29 June 2006 with satellite, radar and lightning data. *Atmospheric Research, Elsevier, Vol.93, 82-92*

Rabin R. M.: Nowcasting thunderstorm intensity from satellite: a review. *NOAA/National Severe Storms Lab, Norman, OK USA Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, Madison, WI USA*

Santurette P. and Georgiev C. G. (2005): Weather Analysis and Forecasting: Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis. ISBN: 0-12-619262-6. Academic Press, Burlington, MA, San Diego, London. Copyright ©, Elsevier Inc. 179pp

Santurette P. and Georgiev C. G. (2007): Water Vapour Imagery Analysis in 7.3/6.2 μ m for diagnosing thermo-dynamic context of intense convection. *2007 AMS-EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Amsterdam, The Netherlands, 24-28 September 2007*

Santurette P. Georgiev C. G. and Piriou C. (2009): A diagnostic tool based on MSG 7.3 μ /6.2 μ Channels for the analysis and forecasting of deep convection. *5th European Conference on Severe Storms 12-16 October 2009-Landshut-GERMANY, 2pp*

Santurette P. Georgiev C. G. and Piriou C. (2009): A diagnostic tool based on MSG 7.3 μ /6.2 μ channel for the analysis and forecasting of deep convection. *5th ECSS 12 - 16 October 2009 - Landshut, Germany*

Santurette P. Georgiev C. G. and Piriou C. (2009): Diagnosis of atmospheric environment favourable for deep moist convection by using satellite imagery. *5th ECSS 12 - 16 October 2009 - Landshut, Germany*

Satellite image site: <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>

Schmetz J., Tjemkes, S. A., Gube M. and van de Berg L. (1997): Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT. *Adv. Space Res. 19 (3), 433-441*

Schmetz J., Pili P., Tjemkes S., Just D., Kerkmann J., Rota S. and Ratier A. (2002): An introduction to Meteosat Second Generation (MSG), *Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 977-992*

Schumacher R. S and Johnson R. H. (2005): Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems. *Dep. Atmos. Sci, Colorado State University, 133, 961-976*

Scotfield R. A. and Oliver V.J. (1977): A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery. *NOAA Tech. Memo. NESS 86, National Earth Satellite Service, Suitland MD 47 pp*

Scotfield R. A. (1985): Satellite convective categories associated with heavy precipitation. *Preprints, Sixth Conf. on Hydrometeorology, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc.*, 42–51

Scotfield R. A. (1987): The NESDIS Operational Convective Precipitation Estimation Technique, NOAA/NESDIS, *Sat. App. Lab., Washington*, 1773-1792

Senesi S., Bougeault P., Chéze J. L., Cosentino P. and Thepenier R. M. (1996): The Vaison-La-Romaine Flash Flood: Mesoscale Analysis and Predictability Issues. *Weather and Forecasting*, 11, 417-442

Setvak M., Rabin R. M. and Wang P. K. (2007): Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery. *Atmos. Res.* 83, 505-528

Setvák M., Lindsey D. T., Novák P., Wang P. K., Radová M., Kerkmann J., Grasso L., Shih-Hao Su, Rabin R. M., Sástka J., Charvát, Z. (2010): Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Elsevier, Atmospheric Research*, 97(1-2), 80-96

Setvak M. (2018): Satellite observations of storm tops: Part 2. *EUMETSAT autumn school „Use of Satellite Data and Products for Severe Weather Nowcasting“, 24 – 28 September 2018, Thessaloniki, Greece*

Silva Dias M. A. F. and Ferreira R. N. (1992): Application of a linear spectral model to the study of Amazonian squall lines during GTE/ABLE 2B. *J. Geophys. Res* 97:20405–20419

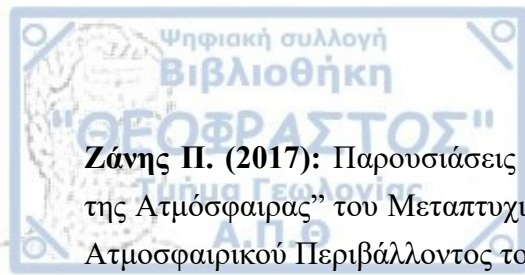
Tollerud E. I. and Collander R. S (1993): Mesoscale convective systems and extreme rainfall in the central United States. Extreme hydrological events: precipitation, floods and droughts. *Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS Publ. no. 213*

University of Wyoming: Atmospheric soundings website, University of Wyoming, Department of Atmospheric Science, Laramie, USA.

<http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>

Βαφειάδης Ι. (2000): Διερεύνηση των χαρακτηριστικών της τροπόπαυσης κατά την εμφάνιση των χαλαζοκαταιγίδων. *Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 102*

Βλάχου Μ. και Χριστοδούλου Μ. (2010): Μνημόνιο πρόγνωσης καιρού. Οργανισμός Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων – Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών, σελ.57



Ζάνης Π. (2017): Παρουσιάσεις στα πλαίσια του μαθήματος “Θερμοδυναμική και Στατική της Ατμόσφαιρας” του Μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ

Μπαλάμη Μ. (2001): Φυσική μελέτη θερμής καταιγίδας. *Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 163*

Πυθαρούλης Ι. (2017): Παρουσιάσεις στα πλαίσια του μαθήματος “Συνοπτική Μετεωρολογία” του Μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ

Φείδας Χ. (2017): Παρουσιάσεις στα πλαίσια του μαθήματος “Δορυφορική Μετεωρολογία” του Μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του τμήματος Γεωλογίας, ΑΠΘ