



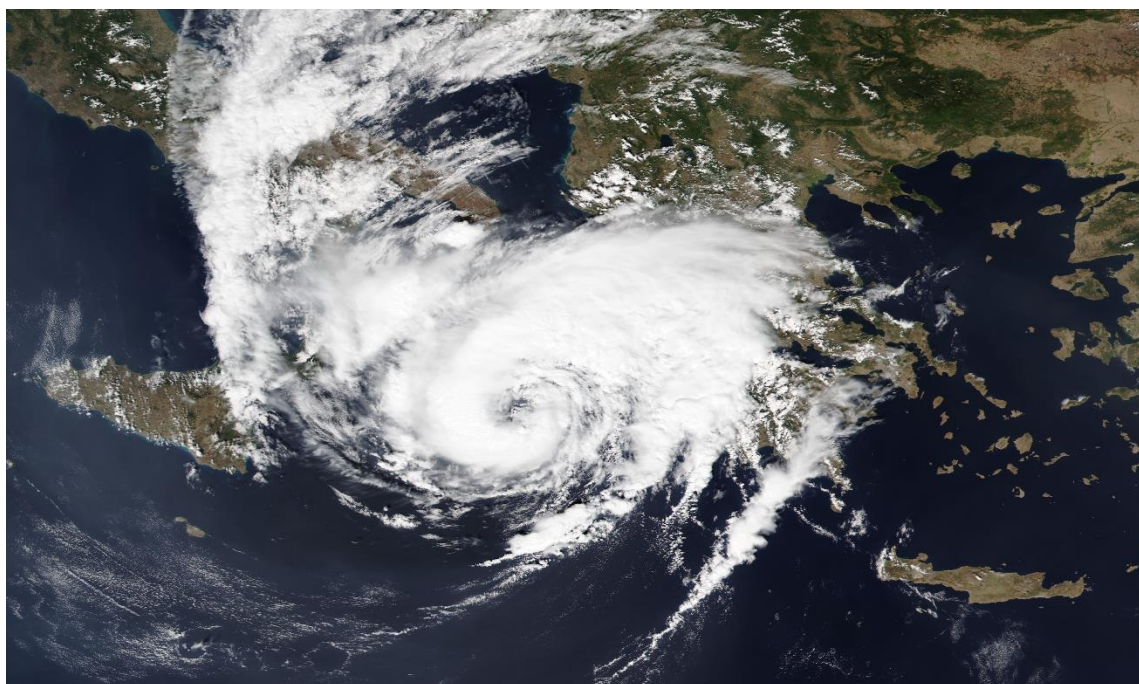
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΜΕ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΤΟ 2023

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024





ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5982

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΤΡΟΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΤΟ 2023

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, κατά το Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών,
στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων

Αναπληρωτής Καθηγητής Πυθαρούλης Ιωάννης



© Αντώνιος Παπανικολάου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΤΟ 2023 – *Διπλωματική Εργασία*

© Antonios Papanikolaou, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2024
All rights reserved.

SYNOPTIC ANALYSIS OF A BAROMETRIC LOW WITH TROPICAL CYCLONE CHARACTERISTICS IN THE MEDITERRANEAN IN 2023 – *Bachelor Thesis*

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

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

Εικόνα Εξωφύλλου: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συνοπτική ανάλυση ενός βαρομετρικού χαμηλού που εμφάνισε χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στην Αδριατική θάλασσα τον Ιανουάριο του 2023. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν πλεγματικά δεδομένα επιχειρησιακών αναλύσεων και προγνώσεων του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF) και δορυφορικά δεδομένα.

Το βαρομετρικό χαμηλό σχηματίστηκε στον Ατλαντικό ωκεανό και εισήλθε στην Ιβηρική θάλασσα στις 20 Ιανουαρίου υπό την παρουσία ενός αυλώνα στη μέση τροπόσφαιρα. Στη συνέχεια, κατευθυνόμενο ανατολικά διέσχισε το νότιο τμήμα της Ιταλικής χερσονήσου στις 21 Ιανουαρίου. Εκεί φαίνεται να ενισχύθηκε από την παρουσία μιας ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης και τις επιφανειακές ροές ενέργειας καθώς, λίγες ώρες αργότερα, εμφάνισε χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα. Τέλος, κινούμενο κατά μήκος της Αδριατικής θάλασσας, το σύστημα κατέληξε στην περιοχή της πόλης Ανκόνα όπου και διαλύθηκε τις πρώτες ώρες της 22^{ης} Ιανουαρίου. Από τη συνοπτική και δυναμική μελέτη έγινε εμφανές πως παρόλο που το σύστημα παρουσίασε ορισμένα χαρακτηριστικά τροπικών κυκλώνων, όπως ανέφelo 'μάτι' και θερμό πυρήνα, η κατηγοριοποίηση του ως Μεσογειακό κυκλώνα δεν είναι τόσο ξεκάθαρη.



Abstract

The aim of this thesis is the synoptic analysis of a barometric low that exhibited characteristics of a tropical cyclone in the Adriatic Sea in January 2023. For this purpose, gridded operational analyses and forecast data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and satellite data were utilized.

The barometric low initially formed in the Atlantic Ocean and entered the Iberian Sea on January 20 under the presence of a trough in the mid-troposphere. Afterwards, it moved eastward, crossing the southern part of the Italian Peninsula on 21 January. In this region, it appears to have been strengthened by the presence of an anomaly in the dynamic tropopause and the surface fluxes of latent and sensible heat, as a few hours later it exhibited characteristics of a tropical cyclone. Finally, moving along the Adriatic Sea, the system reached the area of the city of Ancona where it dissipated in the early hours of January 22. The synoptic and dynamic study made it evident that although the system exhibited some characteristics of tropical cyclones, such as a cloud-free ‘eye’ and a warm-core, its classification as a Mediterranean tropical-like cyclone is not entirely clear.

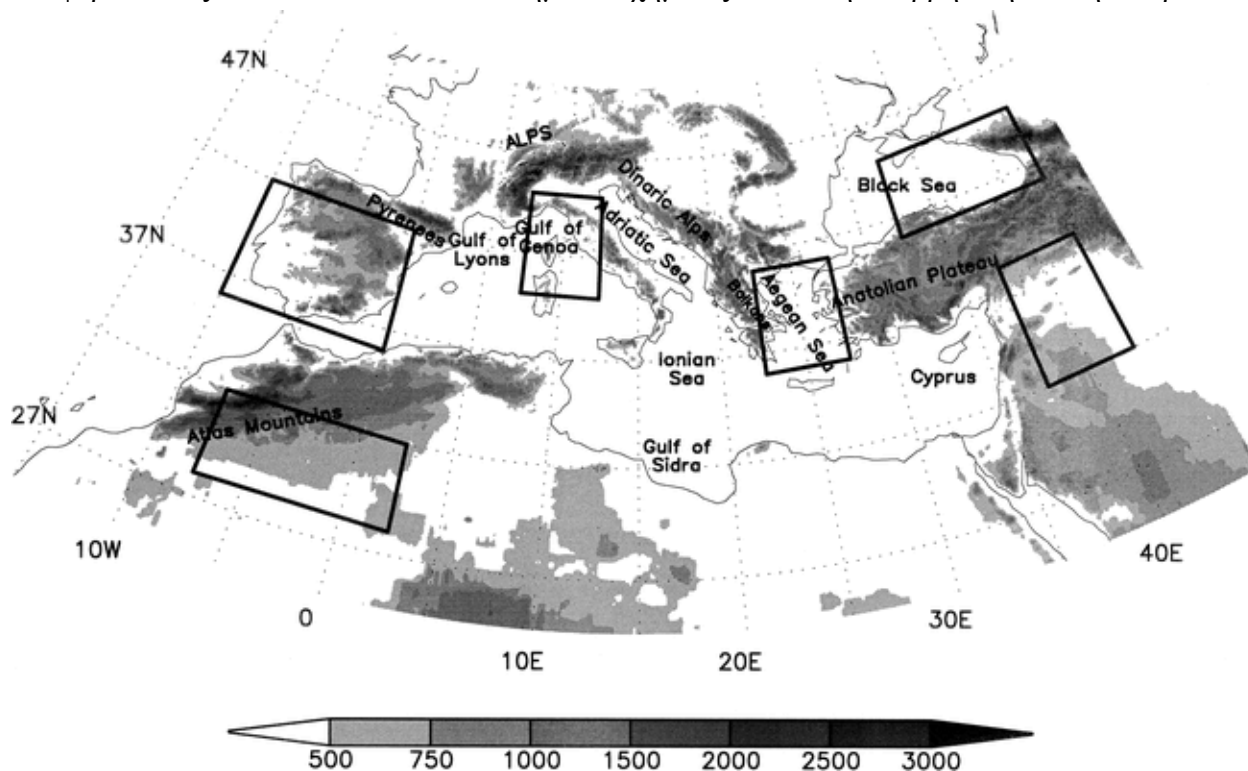


Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	8
1.1 Κυκλογένεση στο χώρο της Μεσογείου	8
1.2 Η περίπτωση των Μεσογειακών Κυκλώνων με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα (Medicanes).....	11
1.3 Παλαιότερες εμφανίσεις Μεσογειακών Κυκλώνων	14
Μεσογειακός κυκλώνας τον Ιανουάριο του 1995.....	14
Μεσογειακός κυκλώνας Ζορμπάς (2018)	15
Μεσογειακός κυκλώνας Ιανός (2020).....	16
1.4 Σκοπός της εργασίας	18
2. Δεδομένα και Μεθοδολογία.....	19
2.1 Δορυφορικά δεδομένα	19
2.2 Πλεγματικά δεδομένα.....	19
2.3 Λογισμικό	20
2.4 Μεθοδολογία	20
3. Συνοπτική ανάλυση	22
3.1 Πορεία του συστήματος και νετός	22
3.2 Θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και ροές θερμότητας.....	27
3.3 Γεωδυναμικό ύψος και θερμοκρασία στα 500 hPa και 850 hPa	33
3.4 Δυναμική Τροπόπαυση.....	37
3.5 Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας.....	39
4. Συμπεράσματα	46
5. Βιβλιογραφία	48

1.1 Κυκλογένεση στο χώρο της Μεσογείου

Η λεκάνη της Μεσογείου θεωρείται ως μια από τις κύριες περιοχές κυκλογένεσης παγκοσμίως (Παρανός-Λιόλιος, 2016). Η δημιουργία αυτών των συστημάτων χαμηλής βαρομετρικής πίεσης έχει συνδεθεί με τις οροσειρές των Άλπεων, των Πυρηναίων και του Άτλαντα που περιβάλλουν την Μεσόγειο θάλασσα (Tous & Romero, 2013). Οι Trigo et al. (2002), από τη μελέτη υφέσεων που σχηματίστηκαν στη Μεσόγειο για το χρονικό διάστημα 1979-1996, σύμφωνα με δεδομένα του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF), καθόρισαν έξι περιοχές κυκλογένεσης (Σχήμα 1.1). Οι οροσειρές που προαναφέρθηκαν, παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των περιοχών αυτών καθώς η γένεση αρκετών συστημάτων παρατηρείται στις υπήνεμες πλευρές τους (Trigo et al., 2002). Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι Flaounas et al. (2022) αναφέρουν πως έντονα κυκλωνικά συστήματα σχηματίζονται στην Τυρρηνική και την Αδριατική



Σχήμα 1.1. Χάρτης που απεικονίζει την τοπογραφία (σε μέτρα) και τις περιοχές κυκλογένεσης στη λεκάνη της Μεσογείου. Οι περιοχές προσδιορίστηκαν από τη μελέτη κυκλωνικών συστημάτων για το διάστημα 1979-1996 για την περιοχή της Μεσογείου (Trigo et al., 2002).

θάλασσα, στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων, καθώς και στη νοτιοδυτική Μεσόγειο κοντά στην οροσειρά του Άτλαντα. Σημαντικός αριθμός χαμηλών παρατηρείται επίσης στο Ιόνιο, στο Αιγαίο, την Μαύρη Θάλασσα και στην Θάλασσα του Λεβάντε (ανατολικά της Κύπρου) (Flaounas et al., 2022).

Η συχνότητα και η χωρική κατανομή των χαμηλών στη λεκάνη της Μεσογείου παρουσιάζουν εποχιακή διαφοροποίηση (Trigo et al., 2002). Οι Campins et al. (2011), κάνοντας χρήση των δεδομένων ERA-40, που καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1957-2002, αναφέρουν πως η κυκλογένεση στην Μεσόγειο παρουσιάζει μέγιστο τους μήνες του χειμώνα και ελάχιστο το καλοκαίρι, ενώ το φθινόπωρο και η άνοιξη είναι μεταβατικές περίοδοι. Όσον αφορά τη χωρική κατανομή των υφέσεων, ο κόλπος της Γένοβα και κατ' επέκταση η ευρύτερη περιοχή νότια των Άλπεων, καθώς και η Κύπρος αποτελούν μόνιμα κέντρα κυκλογένεσης καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Στο Ιόνιο, το Αιγαίο και την Αδριατική θάλασσα ο σχηματισμός των συστημάτων αυτών παρατηρείται κυρίως τους μήνες του χειμώνα και λιγότερο του φθινοπώρου (Campins et al., 2011). Σημαντικό κέντρο κυκλογένεσης για την περίοδο της άνοιξης αποτελεί το βορειοδυτικό τμήμα της Αφρικανικής ηπείρου και συγκεκριμένα η υπήνεμη πλευρά της οροσειράς του Άτλαντα (Flaounas et al., 2022). Οι υφέσεις που σχηματίζονται εκεί ακολουθούν μια πορεία προς τα ανατολικά, επηρεάζοντας την κεντρική και ανατολική Μεσόγειο προκαλώντας έντονες βροχοπτώσεις και μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες σκόνης (Ammar et al., 2013).

Η διάρκεια ζωής, η ένταση καθώς και η χωρική έκταση των χαμηλών της Μεσογείου είναι μικρότερες συγκριτικά με αντίστοιχα συστήματα χαμηλής πίεσης που αναπτύσσονται στον Ατλαντικό ωκεανό (Trigo et al., 1999). Οι παράμετροι αυτοί όμως παρουσιάζουν διαφοροποίηση και σε εποχική βάση, όπως αναφέρουν οι Campins et al. (2011), οι υφέσεις που σχηματίζονται τους χειμερινούς μήνες στην Μεσόγειο είναι μεγαλύτεροι σε έκταση, με μέση ακτίνα 565 km, σε σύγκριση με αυτούς των καλοκαιρινών μηνών με μέση ακτίνα 475 km. Αντίστοιχη διαφορά παρατηρείται τόσο στη διάρκεια ζωής των συστημάτων αυτών, όπου στα χαμηλά της χειμερινής περιόδου κυμαίνεται μεταξύ 1-4 ημέρες, όσο και στην ένταση τους (Campins et al., 2011; Romem et al., 2007).

Τα κυκλωνικά συστήματα που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου έχουν κατηγοριοποιηθεί με κριτήρια όπως: οι διεργασίες σχηματισμού τους, η γεωγραφική τους προέλευση και ο ρυθμός με τον οποίο ισχυροποιούνται (ελαττώνεται η πίεση στο κέντρο τους) (Flaounas et al., 2022). Παρακάτω περιγράφονται μερικά από αυτά τα συστήματα.

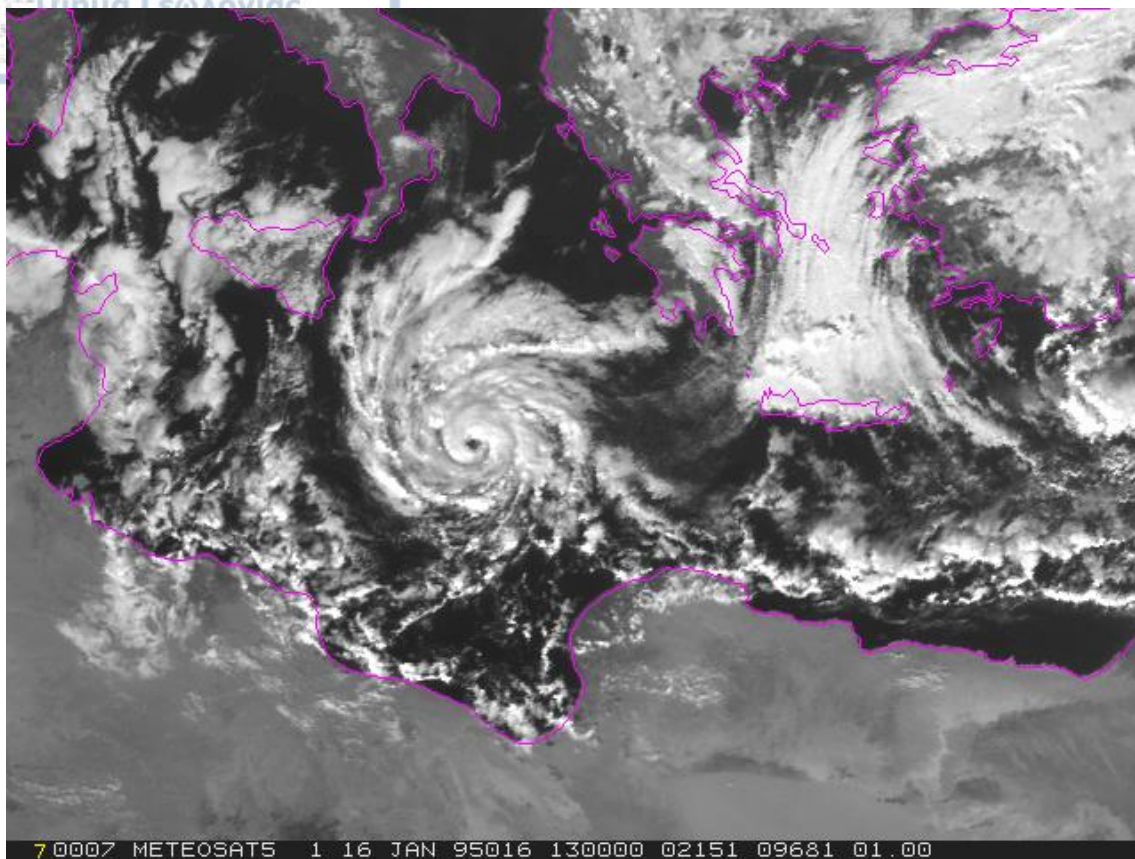
- Υφέσεις που σχηματίζονται στον Ατλαντικό ωκεανό: οι υφέσεις αυτές σχηματίζονται και ισχυροποιούνται πάνω από τον Ατλαντικό ωκεανό και έπειτα περνούν στην Ευρώπη και τη Μεσόγειο θάλασσα, συνοδευόμενοι από έντονες βροχοπτώσεις και ισχυρούς ανέμους. Η καταιγίδα 'Klaus' το 2009 ήταν ένα ακραίο τέτοιο σύστημα που ξεκίνησε ως μια μικρής έκτασης βαροκλινική διαταραχή στον Ατλαντικό ωκεανό και σε διάστημα 6 ημερών έφτασε ως την Μαύρη Θάλασσα, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές στην νότια Γαλλία και την Ισπανία (Liberato et al., 2011).
- Υφέσεις που σχηματίζονται στη Βόρεια Αφρική: όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι υφέσεις αυτές, γνωστοί και ως κυκλώνες 'Sharav' (Alpert & Ziv, 1989), σχηματίζονται στην υπήνεμη πλευρά της οροσειράς του Άτλαντα κυρίως την περίοδο της άνοιξης (Flaounas et al., 2022). Η πορεία που ακολουθούν αυτά τα συστήματα είναι κατά μήκος της ακτογραμμής της βόρειας Αφρικής, αρκετοί όμως από αυτούς κινούνται βορειότερα προς την ανατολική Μεσόγειο (Alpert & Ziv, 1989; Ammar et al., 2013). Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των κυκλώνων είναι η μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Η σκόνη επηρεάζει κατά κύριο λόγο την περιοχή της Μεσογείου. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου έφτασε μέχρι τη νότια Αγγλία, τη Γαλλία και σπανιότερα στον Αρκτικό κύκλο (Ammar et al., 2013; Flaounas et al., 2015) .
- Μετεωρολογικές Βόμβες (Explosive Cyclones): είναι συνοπτικής και υπό-συνοπτικής κλίμακας βαρομετρικά χαμηλά που σχηματίζονται κατά την χειμερινή περίοδο, κυρίως πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και η πίεση στο κέντρο τους ελαττώνεται με μεγάλο ρυθμό. Σύμφωνα με τον αρχικό ορισμό, η ελάχιστη πίεση στο κέντρο τους πρέπει να μειώνεται με ρυθμό τουλάχιστον 1 hPa/ώρα για τουλάχιστον 24 ώρες (1 bergeron = 24 hPa/ 24 ώρες). Όμως, αυτό το κατώφλι που προέκυψε για τις 60°B τροποποιείται για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Συγκεκριμένα για την Μεσόγειο, η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 5 ημέρες, με τα ισχυρότερα συστήματα να παρατηρούνται στο νότιο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης. Τέτοιου είδους συστήματα 'βαθαίνουν' στη Μεσόγειο κατά μέσο όρο με ρυθμό 20

hPa/ 24h, ενώ έχουν σημειωθεί ρυθμοί έως και 34-35 hPa/ 24 h (Flaounas et al., 2022; Michaelides et al., 2018). Η εμφάνιση αυτών των συστημάτων αν και σπάνια στην Μεσόγειο, με κατά μέσο όρο 5.5 περιπτώσεις τον χρόνο, πραγματοποιείται κυρίως τον χειμώνα (Kouroutzoglou et al., 2011). Από τη μελέτη τέτοιων συστημάτων για το διάστημα 1962-2001, οι Kouroutzoglou et al. (2011), αναφέρουν πως είναι πιθανότερο ο σχηματισμός τους να λάβει χώρα στη δυτική Μεσόγειο και το σύστημα να ακολουθήσει μια πορεία προς τα ανατολικά. Οι περιπτώσεις όμως των χαμηλών που σχηματίζονται στην ανατολική Μεσόγειο είναι μεγαλύτερες σε ένταση και έκταση (Kouroutzoglou et al., 2011).

1.2 Η περίπτωση των Μεσογειακών Κυκλώνων με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα (Medicanes)

Μια σημαντική κατηγορία κυκλώνων που σχηματίζονται στη λεκάνη της Μεσογείου είναι αυτή των Medicanes (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται ως Μεσογειακοί Κυκλώνες). Η ονομασία τους προκύπτει ως συντομογραφία από τον συνδυασμό των λέξεων ‘Mediterranean’ και ‘Hurricane’ (Emanuel, 2005), καθώς είναι επίσης γνωστοί στην βιβλιογραφία και ως Mediterranean Tropical-Like Cyclones (TLC) (Miglietta, 2019). Οι κατηγορία των Μεσογειακών κυκλώνων, όπως θα αναφέρονται στην παρούσα εργασία, δεν είχε εξακριβωθεί μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1960-1970, καθώς η έλλειψη δορυφορικών εικόνων καθιστούσε αδύνατο τον εντοπισμό τους (Cioni et al., 2016; Miglietta et al., 2013).

Οι Μεσογειακοί κυκλώνες στις δορυφορικές τους απεικονίσεις παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τους τροπικούς κυκλώνες. Συγκεκριμένα, εμφανίζουν μία κεντρική ανέφελη περιοχή, το λεγόμενο ‘μάτι’, η οποία περιβάλλεται από μια σπείρα νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Σχήμα 1.2) (Flaounas et al., 2022; Παρανός-Λιόλιος, 2016). Η οριζόντια έκταση των συστημάτων αυτών δεν μπορεί να ξεπερνά τα 300 km σε διάμετρο λόγω του περιορισμένου μεγέθους της Μεσογείου θάλασσας, που κατ’ επέκταση περιορίζει τις ροές θερμότητας από την επιφάνεια της προς την ατμόσφαιρα, παράγοντας σημαντικός για την ανάπτυξη τους (Tous & Romero, 2013). Οι Μεσογειακοί κυκλώνες παρατηρούνται σχετικά σπάνια. Από τη μελέτη των συστημάτων για το διάστημα 1969-2014, οι Nastos et al. (2018), αναφέρουν πως η ετήσια συχνότητα τους είναι 1.4 ± 1.3 περιπτώσεις ανά έτος. Οι εμφανίσεις σημειώνονται στη δυτική και κεντρική Μεσόγειο, με την ευρύτερη περιοχή του Ιονίου πελάγους να αποτελεί σημαντικό κέντρο γένεσης των



Σχήμα 1.2: Δορυφορική εικόνα του Μεσογειακού κυκλώνα της 15^{ης} Ιανουαρίου 1995. Διακρίνεται το 'μάτι' και η σπείρα νεφών που το περιβάλλει μια ημέρα μετά την εμφάνιση του, στις 16 Ιανουαρίου 1995. Πηγή: <http://meteorologia.uib.eu/medicanes/>

συστημάτων αυτών. Όσον αφορά την εποχιακή τους διακύμανση, οι κυκλώνες παρουσιάζουν μέγιστο τη χειμερινή και φθινοπωρινή περίοδο, ενώ σπάνια παρατηρούνται την άνοιξη (Cavicchia et al., 2013; Miglietta et al., 2013; Nastos et al., 2018; Tous & Romero, 2013).

Ο τρόπος σχηματισμού του αρχικού βαρομετρικού χαμηλού και η εξέλιξη αυτού σε Μεσογειακό Κυκλώνα μπορούν να περιγραφούν με βάση την βαροκλινική θεωρία και τη θεωρία ανταλλαγής θερμότητας με την επιφάνεια λόγω του ανέμου, WISHE (wind-induced surface heat exchange), αντίστοιχα. Σύμφωνα με την βαροκλινική θεωρία, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ηπείρου (βόρεια) και της Μεσογείου θάλασσας (νότια), προκαλεί θερμοβαθμίδα στην κατώτερη τροπόσφαιρα και ευνοεί τη βαροκλινική αστάθεια στην περιοχή, η οποία μπορεί να ενισχυθεί από τις οροσειρές των Άλπεων και του Άτλαντα. Αν επίσης, στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα επικρατεί μια μικρού μήκους κύματος διαταραχή (αυλώνας-through), τότε προκαλείται κυκλωνικός στροβιλισμός στα ανώτερα στρώματα που μεταφέρεται κατ' επέκταση

[12]

και στην επιφάνεια (Παρανός-Λιόλιος, 2016; Σαχσαμάνογλου & Μακρογιάννης, 2004). Μετά τον σχηματισμό του, το σύστημα ισχυροποιείται, σε αρκετές περιπτώσεις, σύμφωνα με την θεωρία WISHE όπου οι ροές θερμότητας από την επιφάνεια της θάλασσας είναι βασικός παράγοντας. Πιο αναλυτικά, καθώς η πίεση στο κέντρο του συστήματος ελαττώνεται, ο αέρας στην επιφάνεια συγκλίνει προς το κέντρο (‘μάτι’) ενώ ενισχύεται η έντασή του λόγω ισχυρότερης βαροβαθμίδας, αυξάνοντας την εξάτμιση από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι ο κυκλώνας τροφοδοτείται με λανθάνουσα (από την συμπύκνωση των υδρατμών που εξατμίστηκαν) και αισθητή θερμότητα, που συμβάλλουν στην ισχυροποίηση του (Παρανός-Λιόλιος, 2016). Αυτό προκαλεί θέρμανση του πυρήνα του κυκλώνα και περαιτέρω μείωση της ελάχιστης πίεσης, με αποτέλεσμα την ενίσχυση των επιφανειακών ανέμων και των επιφανειακών ροών θερμότητας. Πρέπει να σημειωθεί πως ο τρόπος ισχυροποίησης των κυκλωνικών συστημάτων που περιγράφεται από τη θεωρία WISHE δεν παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις Μεσογειακών κυκλώνων (Miglietta & Rotunno, 2019).

Οι Μεσογειακοί κυκλώνες παρά τις ομοιότητες που παρουσιάζουν με τους τροπικούς κυκλώνες στις δορυφορικές τους απεικονίσεις, διαφέρουν όσον αφορά τις συνθήκες και το περιβάλλον σχηματισμού τους (Flaounas et al., 2022). Σημαντική διαφορά αποτελεί η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (Sea Surface Temperature – SST) πάνω από την οποία σχηματίζονται τα συστήματα. Οι τροπικοί κυκλώνες δεν σχηματίζονται σε θερμοκρασίες κάτω των 26.5 °C (Tory & Dare, 2015), σε αντίθεση με τους Μεσογειακούς κυκλώνες που παρατηρούνται σε θερμοκρασίες έως και 14 °C, με ορισμένες περιπτώσεις στο Ιόνιο και την Σικελία να φτάνουν στους 26°-27 °C (Miglietta et al., 2013; Tous & Romero, 2013). Οι ροές θερμότητας από την επιφάνεια της θάλασσας παίζουν σημαντικό ρόλο και στα δύο συστήματα, με τη διαφορά ότι στους Μεσογειακούς κυκλώνες οι ροές λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας είναι εξίσου σημαντικές ενώ στους τροπικούς κυκλώνες η λανθάνουσα θερμότητα υπερτερεί της αισθητής (Ma & Fei, 2022; Pytharoulis et al., 2000). Σχετικά με το περιβάλλον σχηματισμού, οι Μεσογειακοί κυκλώνες παρουσιάζουν ομοιότητες με μία άλλη κατηγορία κυκλώνων, τα πολικά χαμηλά (Rasmussen & Zick, 1987). Τα πολικά χαμηλά είναι συστήματα χαμηλής βαρομετρικής πίεσης που σχηματίζονται σε ψυχρές αέριες μάζες υπό την παρουσία ενός αυλώνα στη μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα, χαρακτηριστικά που μοιράζονται και οι Μεσογειακοί κυκλώνες (Businger & Reed, 1989; Pytharoulis, 2018; Παρανός-Λιόλιος, 2016).

Οι Μεσογειακοί κυκλώνες συνοδεύονται από μεγάλης ταχύτητας ανέμους και ραγδαίες βροχοπτώσεις. Τα παραπάνω φαινόμενα δημιουργούν με τη σειρά τους περαιτέρω προβλήματα όταν τα συστήματα φτάνουν στις παράκτιες περιοχές της Μεσογείου (Nastos et al., 2018). Συγκεκριμένα, οι Nastos et al. (2018), από τη μελέτη 63 περιπτώσεων στο διάστημα 1969-2014, αναφέρουν πως παράκτιες περιοχές κυρίως της δυτικής και κεντρικής Μεσογείου, κατέγραψαν πλημμύρες και ζημιές σε δημόσιες υποδομές και εγκαταστάσεις που σχετίζονταν άμεσα με τους κυκλώνες.

1.3 Παλαιότερες εμφανίσεις Μεσογειακών Κυκλώνων

Παρακάτω περιγράφονται κάποιοι έντονοι Μεσογειακοί κυκλώνες που μελετήθηκαν αρκετά τα προηγούμενα χρόνια.

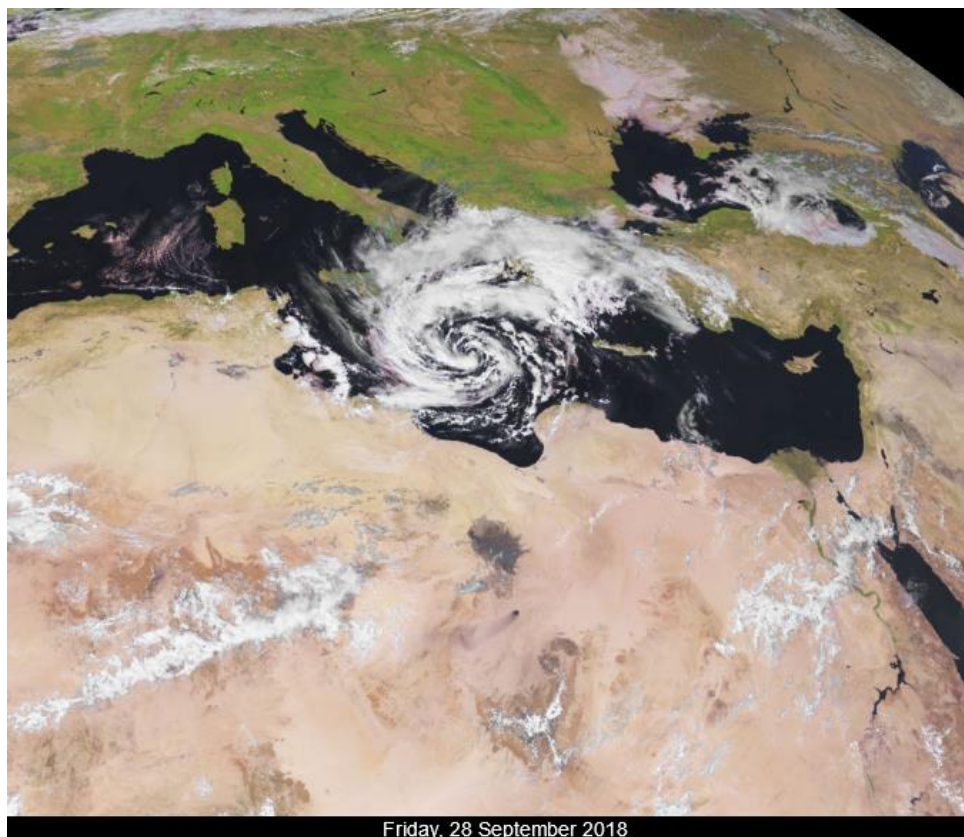
Μεσογειακός κυκλώνας τον Ιανουάριο του 1995

Το σύστημα αυτό εμφανίστηκε πρώτη φορά, έχοντας αποκτήσει τα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα (‘μάτι’ και σπείρα νεφών), στις 03 UTC στις 15 Ιανουαρίου 1995 στον θαλάσσιο χώρο μεταξύ Ελλάδας και Σικελίας (Pytharoulis et al., 2000). Πριν τον σχηματισμό του κυκλώνα, στις 13 Ιανουαρίου, στην περιοχή μεταξύ Ιταλίας και Λιβύης επικρατούσε ένα μεγάλης έκτασης βαρομετρικό χαμηλό που τις επόμενες ημέρες κινήθηκε προς τα βορειοανατολικά. Ταυτόχρονα στην μέση τροπόσφαιρα ένας αυλώνας εκτεινόταν νότια προς την βόρεια Αφρική και σχημάτιζε μια περιοχή χαμηλής πίεσης πάνω από τη θέση που εμφανίστηκε ο κυκλώνας. Το σύστημα αρχικά παρέμεινε ακίνητο για τη διάρκεια της πρώτης ημέρας, ίσως λόγω της επίδρασης του μεγαλύτερου χαμηλού που βρισκόταν στην περιοχή. Έπειτα, κινήθηκε νοτιοδυτικά, ενώ στις 18 UTC στις 16 Ιανουαρίου (Σχήμα 1.2) κατευθύνθηκε νότια προς τον κόλπο της Σύρτης και μια μέρα αργότερα ο κυκλώνας έφτασε πάνω από την ξηρά. Τις πρώτες ώρες στις 18 Ιανουαρίου το σύστημα είχε αρχίσει να εξασθενεί και διαλύθηκε εντελώς στις 15 UTC της ίδιας ημέρας. Οι μόνες παρατηρήσεις σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή του κυκλώνα προέρχονται από πλοία, που αναφέρουν ταχύτητες μεταξύ 7.7 και 12.8 m/s στις 15 Ιανουαρίου. Αντίστοιχα, στις 16 Ιανουαρίου, δύο πλοία κατέγραψαν ταχύτητες 17.5 m/s. Όσον αφορά την βαρομετρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, οι χάρτες της Βρετανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας έδειξαν πίεση 1002 hPa στις 15 Ιανουαρίου 06 UTC (Lagouvardos et al., 1999; Pytharoulis et al., 2000). Οι

Lagounardos et al. (1999), από προσομοιώσεις του φαινομένου, αναφέρουν πως το μεγαλύτερο βαρομετρικό χαμηλό που βρισκόταν στην περιοχή σε συνδυασμό με τον αυλώνα στην μέση τροπόσφαιρα ήταν καθοριστικά για την ανάπτυξη του κυκλώνα. Επιπρόσθετα, οι Pytharoulis et al. (2000), επισημαίνουν τη σημασία της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας για την ανάπτυξη του κυκλώνα, χαρακτηριστικό που παρομοιάζει το σύστημα με πολικό χαμηλό.

Μεσογειακός κυκλώνας Ζορμπάς (2018)

Ο κυκλώνας Ζορμπάς (Σχήμα 1.3) εμφανίστηκε στις 27 Σεπτεμβρίου του 2018 στο δυτικό τμήμα του κόλπου της Σύρτης, κοντά στην πόλη Βεγγάζη της Λιβύης. Το σύστημα ακολούθησε μια βορειοδυτική πορεία και στις 28 Σεπτεμβρίου άλλαξε απότομα κατεύθυνση κινούμενο πλέον προς την Ελλάδα. Στις 29 Σεπτεμβρίου ο κυκλώνας είχε φτάσει πάνω από την Πελοπόννησο και συνέχισε να κινείται βορειοανατολικά, διασχίζοντας το Αιγαίο πέλαγος, μέχρι τις δυτικές ακτές



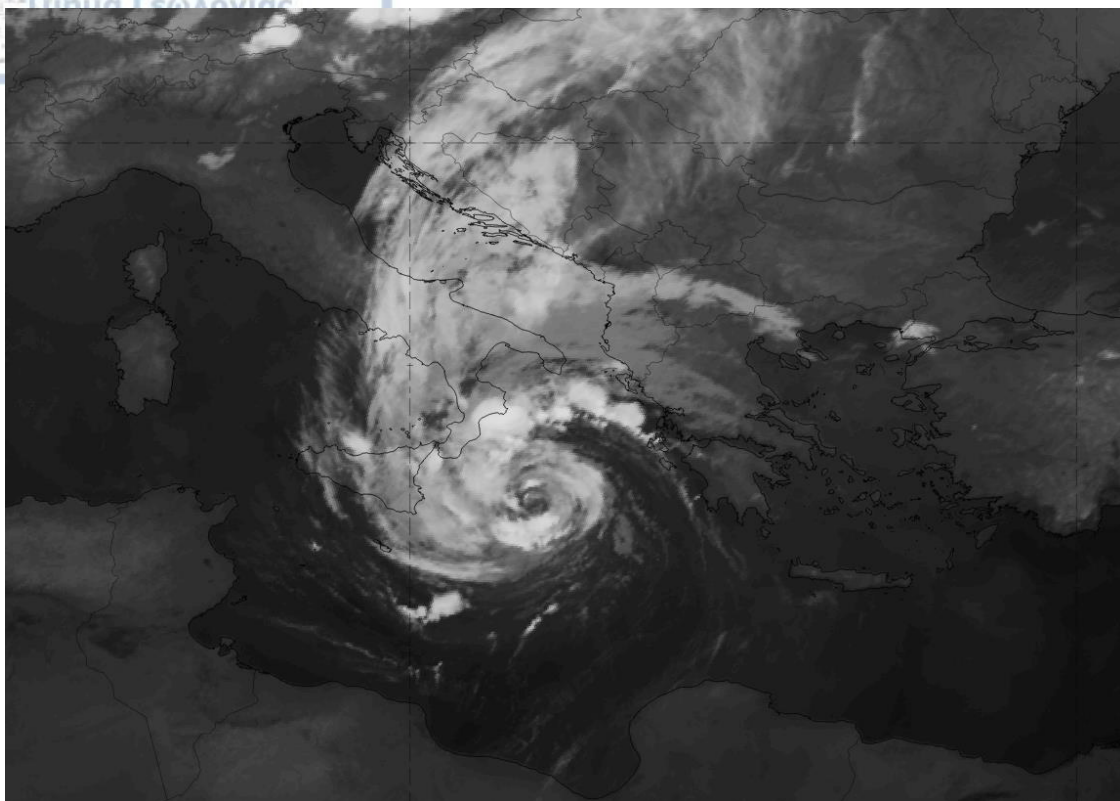
Σχήμα 1.3: Δορυφορική απεικόνιση του μεσογειακού κυκλώνα 'Zorba' στις 28 Σεπτεμβρίου 2018 (12 UTC). Το σύστημα είχε αποκτήσει τα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα ('μάτι' και σπείρα νεφών). Η εικόνα λήφθηκε από τον δορυφόρο MSG4 στο ορατό φάσμα. Πηγή: <https://pics.eumetsat.int/viewer/index.html>

της Τουρκίας όπου και διαλύθηκε. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, ο κυκλώνας εμφάνισε τα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα ('μάτι', σπείρα νεφών) μια ημέρα πριν φτάσει πάνω από τον Ελλαδικό χώρο, στις 28 Σεπτεμβρίου 12 UTC.

Όσον αφορά τη γέννησή του, στις 24 Σεπτεμβρίου στην ανώτερη τροπόσφαιρα ξεκίνησε να σχηματίζεται πάνω από την Ευρώπη και τον Ατλαντικό ένα κύμα Rossby, αποτελούμενο από δύο αυλώνες και μία ράχη. Στο διάστημα των επόμενων τριών ημερών το κύμα αυτό έγινε πιο έντονο όπου εν τέλει έσπασε και δημιούργησε μία αποκομμένη περιοχή δυναμικού στροβιλισμού, κοντά στην οποία σχηματίστηκε το σύστημα στις 27 Σεπτεμβρίου (Portmann et al., 2020). Σύμφωνα με τους Kouroutzoglou et al. (2021), το σύστημα ξεκίνησε στις 27 Σεπτεμβρίου ως μετεωρολογική βόμβα (explosive cyclone) η οποία μία ημέρα αργότερα μετατράπηκε σε Μεσογειακό κυκλώνα με βαθύ θερμό πυρήνα. Λίγο πριν την άφιξη του κυκλώνα στην Πελοπόννησο η βαρομετρική πίεση στην επιφάνεια έφτασε στα 989.3 hPa σε σταθμό της Καλαμάτας. Ταυτόχρονα σημειώθηκαν άνεμοι με ταχύτητα 25.8 m/s και ριπές που ξεπερνούσαν τα 27.7 m/s (SWE, 2018).

Μεσογειακός κυκλώνας Ιανός (2020)

Ο κυκλώνας Ιανός ήταν ένας από τους πιο ισχυρούς κυκλώνες των τελευταίων 25 ετών. Εμφανίστηκε αρχικά ως ένα επιφανειακό χαμηλό στις 15 Σεπτεμβρίου 2020 στο δυτικό τμήμα του κόλπου της Σύρτης. Δύο ημέρες αργότερα (Σχήμα 1.4), έχοντας μετακινηθεί βόρεια-βορειοανατολικά προς το Ιόνιο πέλαγος, εξελίχθηκε σε Μεσογειακό κυκλώνα αποκτώντας τα χαρακτηριστικά των τροπικών συστημάτων ('μάτι', σπείρα νεφών). Έπειτα βρέθηκε πάνω από στα νησιά του Ιονίου (18 Σεπτεμβρίου) συνεχίζοντας την πορεία του προς τα βορειοανατολικά. Η διαδρομή του διήρκεσε 7 ημέρες και τελικά ο κυκλώνας διαλύθηκε πάνω από τις ακτές της Αιγύπτου στις 21 Σεπτεμβρίου 00 UTC. Στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου στις 16 Σεπτεμβρίου 2020 επικρατούσε ένας αυλώνας στην μέση τροπόσφαιρα, ορατός στους χάρτες της ισοβαρικής επιφάνειας των 500 hPa. Το κέντρο χαμηλής πίεσης στην επιφάνεια παρουσίαζε μια κλίση καθ' ύψος με το κέντρο του αυλώνα η οποία μηδενίστηκε όταν το σύστημα μετατράπηκε σε Μεσογειακό κυκλώνα, στις 17 Σεπτεμβρίου. Ταυτόχρονα στην ανώτερη τροπόσφαιρα είχαμε την είσοδο ψυχρού και ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα, δημιουργώντας μια περιοχή υψηλού δυναμικού στροβιλισμού. Τα παραπάνω φαινόμενα οδήγησαν στη δημιουργία του Μεσογειακού



Σχήμα 1.4: Ο Μεσογειακός κυκλώνας Ιανός στις 17 Σεπτεμβρίου 2020 (03 UTC). Διακρίνεται το 'μάτι' και η σπείρα νεφών. Λήφθηκε από δορυφόρο MSG στο υπέρυθρο σε μήκος κύματος 10.8 μm . Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>

κυκλώνα. Το σύστημα επηρέασε κυρίως τις περιοχές της δυτικής και κεντρικής Ελλάδας. Συγκεκριμένα όταν το σύστημα έφτασε πάνω από τα νησιά του Ιονίου καταγράφηκε ελάχιστη βαρομετρική πίεση 984.3 hPa και ο άνεμος έφτασε τα 42 m/s με ριπές στα 54 m/s. Οι ημερήσιες αθροιστικές βροχοπτώσεις για τη δυτική Ελλάδα έφτασαν τα 600 mm ενώ στην κεντρική τα 300 mm. Τα παραπάνω ακραία καιρικά φαινόμενα είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζωών καθώς και ζημιές σε υποδομές και εγκαταστάσεις εξαιτίας πλημμυρών και κατολισθήσεων που προκλήθηκαν (Lagouvardos et al., 2022). Οι Varlas et al. (2023), από προσομοιώσεις του κυκλώνα αναφέρουν πως η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (Sea Surface Temperature - SST) είναι μείζονος σημασίας για την ανάπτυξη, την ένταση και την ισχυροποίηση του συστήματος. Συγκεκριμένα, η αύξηση της SST κατά 2°C, θα είχε ως αποτέλεσμα έναν πιο ισχυρό κυκλώνα, καθώς στις προσομοιώσεις τους προέκυψε αύξηση τόσο στη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου όσο και στη μέση βροχόπτωση (Varlas et al., 2023).

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη συνοπτική μελέτη ενός βαρομετρικού χαμηλού που παρατηρήθηκε στην Αδριατική θάλασσα στις 21 Ιανουαρίου 2023. Το σύστημα ήταν μικρό σε ένταση και διάρκεια όμως παρουσίαζε μερικά χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα. Ξεκίνησε από το κεντρικό τμήμα της Αδριατικής θάλασσας (43° N, 15.25° E) και ακολούθησε μια πορεία προς τα βορειοανατολικά. Τις πρώτες ώρες της 22^{ης} Ιανουαρίου έφτασε πάνω από την ξηρά, στην περιοχή της πόλης Ancona, στις ανατολικές ακτές της Ιταλικής χερσονήσου, όπου και διαλύθηκε. Σύμφωνα με τους Miglietta et al. (2023), οι Μεσογειακοί κυκλώνες που σχηματίζονται στην Αδριατική θάλασσα είναι περιορισμένης έκτασης εξαιτίας του μικρού μεγέθους της και των οροσειρών που την περιβάλλουν. Οι ίδιοι όμως παράγοντες είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία συστημάτων με χαρακτηριστικά που ποικίλουν κατά πολύ από τις περιπτώσεις που σχηματίζονται σε πιο ομοιόμορφη μορφολογία. Συνεπώς και το σύστημα που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία αναμένεται να αποκλίνει από τις περιπτώσεις Μεσογειακών κυκλώνων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υπό-κεφάλαιο.

2. Δεδομένα και Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο λογισμικό και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση του συστήματος στην παρούσα εργασία.

2.1 Δορυφορικά δεδομένα

Για τις εκτιμήσεις υετού από δορυφορικά δεδομένα έγινε χρήση της εφαρμογής Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) της NASA. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε του προϊόν Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (GPM_3IMERGHH V07) που παρέχει μια εκτίμηση των κατακρημνισμάτων στην επιφάνεια της Γης σε παγκόσμια κλίμακα με χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ κάθε 30 λεπτά της ώρας, καλύπτοντας το χρονικό διάστημα από 1^η Ιουνίου του 2000 έως σήμερα. Τα δεδομένα συλλέγονται από διεθνές πλέγμα δορυφόρων και από τον δορυφόρο GPM Core Observatory που χρησιμεύει ως μέσο βαθμονόμησης ώστε να πραγματοποιηθεί η σύνθεση των δεδομένων και η εξαγωγή του τελικού προϊόντος.

Για τις δορυφορικές εικόνες έγινε χρήση της διαδικτυακής εφαρμογής EUMeTrain-ePort της EUMeTrain (<https://eumetrain.org/eport>). Επιλέχθηκαν εικόνες από τη σειρά δορυφόρων Meteosat 2^{ης} γενιάς (MSG). Πρόκειται για γεωστάσιμους δορυφόρους της EUMETSAT, που παρέχουν πληροφορίες για την Ευρώπη, την Αφρική και τμήμα του Ινδικού Ωκεανού. Για την απεικόνιση της νεφοκάλυψης επιλέχθηκε το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος με μήκος κύματος $10.8 \mu\text{m}$ (IR $10.8 \mu\text{m}$).

2.2 Πλεγματικά δεδομένα

Έγινε χρήση των επιχειρησιακών πλεγματικών αναλύσεων του Integrated Forecast System (IFS) του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (European Centre for Medium range Weather Forecasts - ECMWF). Τα δεδομένα είναι εξάωρα και έχουν χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι αρχείων: επιφανείας, ισοβαρικών επιφανειών και στην επιφάνεια με τιμή δυναμικού στροβιλισμού ίση με 2 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) η οποία αντιστοιχεί στη δυναμική τροπόπαυση. Τα πρωτογενή μετεωρολογικά πεδία που χρησιμοποιήθηκαν από αυτά τα αρχεία για την εξαγωγή μετεωρολογικών χαρτών είναι τα εξής:

ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (Pa), θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (K), συνιστώσες u και v της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 μέτρα από την επιφάνεια (m/s), θερμοκρασία στις ισοβαρικές επιφάνειες των 500 hPa και 850 hPa (K) καθώς και το γεωδυναμικό της επιφάνειας δυναμικού στροβιλισμού ίση με 2 PVU και των ισοβαρικών επιφανειών 500 hPa και 850 hPa (m^2 / s^2). Για την εξαγωγή των κατακόρυφων τομών της ατμόσφαιρας (εύρος πιέσεων 1000-200 hPa) χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή πεδία: σχετικής υγρασίας (%), σχετικού στροβιλισμού (s^{-1}), η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου ω (omega, Pa/s), θερμοκρασίας (K), ειδικής υγρασίας (kg/kg) και οι οριζόντιες συνιστώσες u και v της ταχύτητας του ανέμου (m/s).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν επίσης ορισμένα προγνωστικά πλεγματικά δεδομένα του Integrated Forecast System (IFS) τα οποία δεν είναι διαθέσιμα ως αναλύσεις. Τα δεδομένα αυτά είναι ανά εξάωρα και περιέχουν αθροιστικές τιμές για τις ροές λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας από την επιφάνεια Γης προς την ατμόσφαιρα (J / m^2).

2.3 Λογισμικό

Για την οπτικοποίηση των πλεγματικών δεδομένων και την εξαγωγή των μετεωρολογικών χαρτών και τομών έγινε χρήση του λογισμικού Grid Analysis and Display System (GrADS) έκδοση 2.2.1. Το λογισμικό χρησιμοποιεί δεδομένα τεσσάρων διαστάσεων: γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ύψος (στην περίπτωση αυτή τις ισοβαρικές επιφάνειες) και χρόνο. Υποστηρίζει επίσης διάφορους τύπους αρχείων και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αρχεία GRIB. Τέλος παρέχονται ποικίλοι τρόποι οπτικοποίησης των δεδομένων από τους οποίους αξιοποιήθηκαν κυρίως τα διαγράμματα και οι ισοϋψείς/ισοβαρικές επιφάνειες σκιασμένες κα μη.

2.4 Μεθοδολογία

Η συνοπτική μελέτη του συστήματος πραγματοποιήθηκε για το διάστημα 20/01/2023 12 UTC έως 22/01/2023 06 UTC. Αρχικά, από τα πλεγματικά δεδομένα των αναλύσεων εντοπίστηκε το κέντρο του συστήματος (ελάχιστη πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας) και τα σημεία προβλήθηκαν σε χάρτη μέσω του λογισμικού GrADS. Από τα σημεία αυτά δημιουργήθηκε και μια χρονοσειρά με την ελάχιστη πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας και τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα, κάνοντας χρήση του Excel. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για [20]

την εξαγωγή χαρτών του γεωδυναμικού ύψους των ισοβαρικών επιφανειών 500 hPa και 850 hPa σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία στις επιφάνειες αυτές και την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας. Οι παραπάνω χάρτες εστιάζουν στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (27° - 60° N, 14° - 36° E) αλλά και στην Αδριατική θάλασσα όπου εμφανίστηκε το σύστημα (32° - 48.5° N, 4° - 26.5° E). Επιπλέον, δημιουργήθηκαν χάρτες που απεικονίζουν την επιφάνεια δυναμικού στροβιλισμού ίση με 2 PVU σε συνδυασμό με την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας για την περιοχή της Μεσογείου καθώς και τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας.

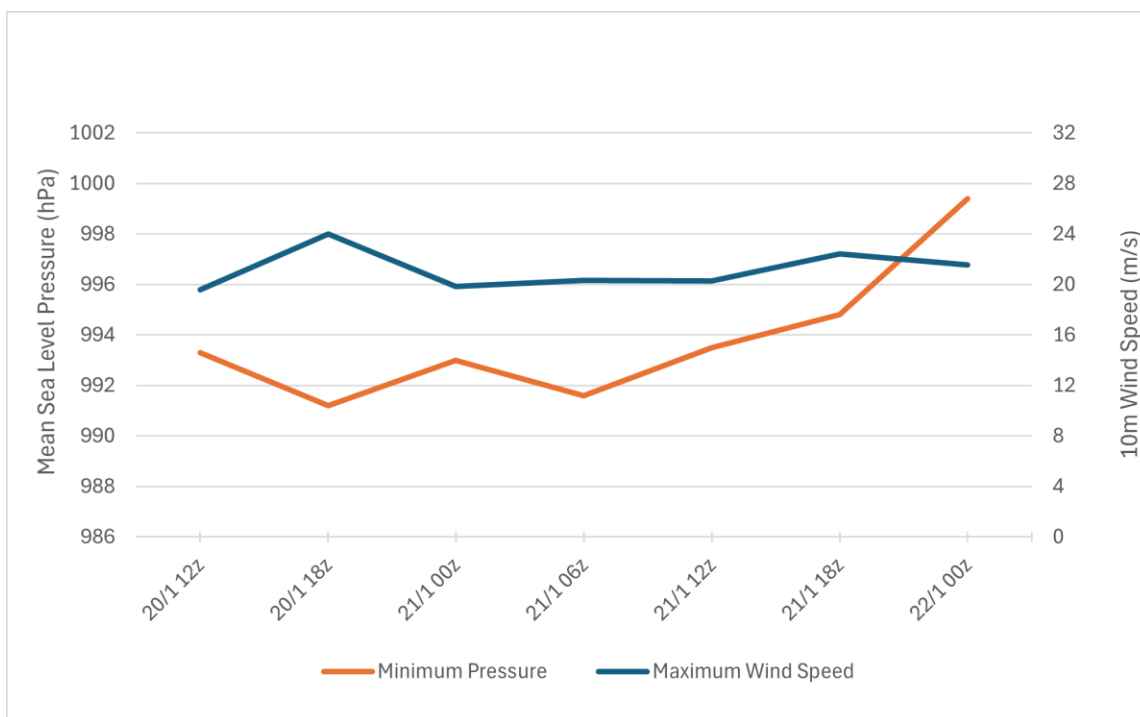
Ακόμα ένα προϊόν της οπτικοποίησης των δεδομένων επιχειρησιακών αναλύσεων του ECMWF στην παρούσα εργασία αποτελούν οι κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας. Οι τομές επιλέχθηκαν με βάση την τοποθεσία του κέντρου χαμηλής πίεσης σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, 21/01 18 UTC και 22/01 00 UTC, και έχουν προσανατολισμό ανατολή-δύση. Τα πεδία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία τους αναφέρθηκαν παραπάνω. Κατά μήκος των τομών έγινε προσπάθεια οπτικοποίησης του κέντρου ('μάτι') και του 'τοιχους' νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης που το περιβάλλουν (eyewall). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν διαγράμματα της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας σε συνδυασμό με τον άνεμο στα 10 μέτρα, κατά μήκος των τομών.

Τέλος, από τα αντίστοιχα προγνωστικά δεδομένα του ECMWF παρήχθησαν χάρτες της ροής λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας από την επιφάνεια της Γης προς την ατμόσφαιρα ανά εξάωρα. Για τη δημιουργία τους βρέθηκε η διαφορά των πεδίων των ροών μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών και έγινε η αναγωγή αυτών στο διάστημα 6 ωρών. Οι χάρτες αυτοί επικεντρώνονται στην περιοχή όπου σχηματίστηκε και κινήθηκε το σύστημα χαμηλής βαρομετρικής πίεσης (41° - 46° N, 11° - 17° E).

3. Συνοπτική ανάλυση

3.1 Πορεία του συστήματος και νετός

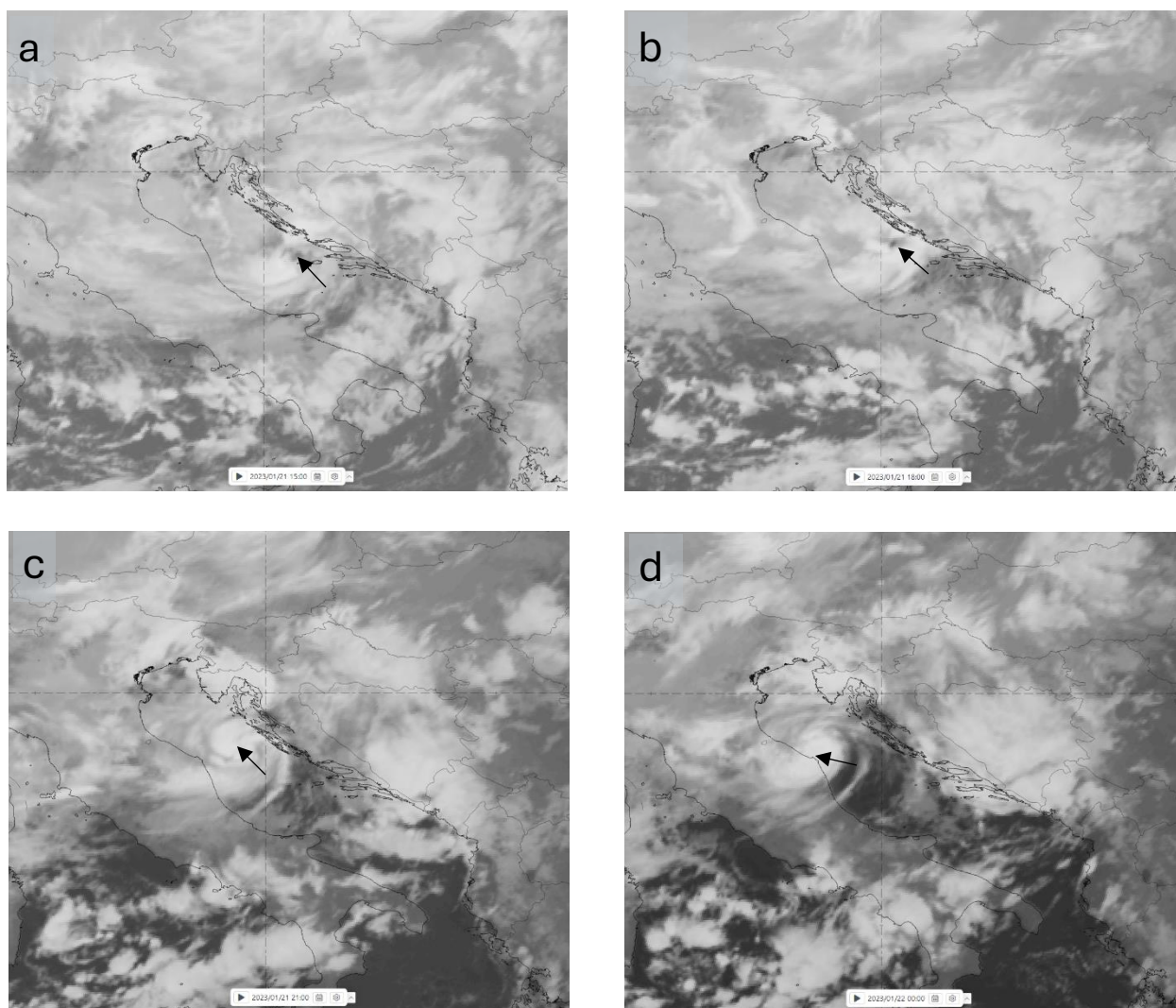
Το σύστημα ξεκίνησε ως ένα βαρομετρικό χαμηλό που εμφανίστηκε αρχικά στη Μεσόγειο στην Ιβηρική θάλασσα την 20^η Ιανουαρίου 2023 00 UTC, έχοντας διασχίσει τον ανατολικό Ατλαντικό ωκεανό και τον Βισκαϊκό Κόλπο. Έπειτα κινήθηκε ανατολικά, φτάνοντας σε λίγες ώρες στην Τυρρηνική θάλασσα με την ελάχιστη πίεση στο κέντρο του συστήματος να είναι στα 991.2 hPa, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (20/01 18 UTC). Στις 21/01 00 UTC το βαρομετρικό χαμηλό πέρασε πάνω από το νότιο τμήμα της Ιταλικής χερσονήσου, γεγονός που φαίνεται να αποδυνάμωσε το σύστημα καθώς μειώθηκε η ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα και η πίεση



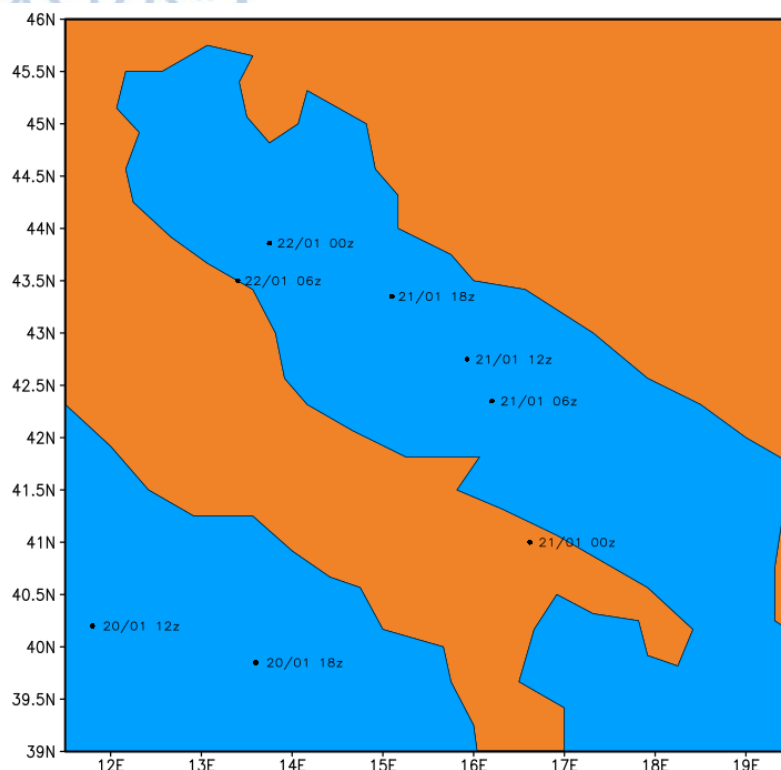
Σχήμα 3.1: Χρονοσειρά της ελάχιστης πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας και της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα ακολουθώντας το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου (δευτερεύον άξονας) και η πορτοκαλί την ελάχιστη βαρομετρική πίεση (πρωτεύον άξονας). Το σύστημα απέκτησε χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στο διάστημα 12z-18z στις 21/01/2023.

αυξήθηκε στα 993 hPa (Σχήμα 3.1). Στη συνέχεια κινήθηκε βόρειο-βορειοανατολικά περνώντας στην Αδριατική θάλασσα, και στις 21/01 15 UTC το βαρομετρικό χαμηλό εμφάνισε στις δορυφορικές του απεικονίσεις (Σχήμα 3.2) χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα (‘μάτι’ και

σπείρα νεφών). Σε αυτό το σημείο, σύμφωνα με τα δεδομένα αναλύσεων του ECMWF, η πίεση στο κέντρο του συστήματος είχε αυξηθεί στα 994 hPa και η ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα ήταν περίπου 21 m/s. Η ταχύτητα αυτή ξεπερνάει το όριο των 17 m/s, γεγονός που σύμφωνα με τον ορισμό του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού διαφοροποιεί μια τροπική ύφεση (tropical depression) από έναν τροπικό κυκλώνα (tropical storm), καθιστώντας δυνατή την ονοματοδοσία του. Για το υπόλοιπο της ημέρας ο κυκλώνας κινούνταν βόρειο-βορειοδυτικά, κατά μήκος της Αδριατικής θάλασσας, ενώ στις 22/01 00 UTC η πορεία του άλλαξε απότομα προς τα δυτικά. Τέλος, τις πρώτες ώρες της 22^{ης} Ιανουαρίου 2023, το σύστημα έφτασε για ακόμα μια φορά



Σχήμα 3.2: Δορυφορικές εικόνες του συστήματος σε τέσσερις χρονικές στιγμές αφού εμφάνισε χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα. Τα βέλη δείχνουν κατά προσέγγιση το κέντρο του χαμηλού. Οι χρονικές στιγμές είναι οι εξής: α) 21/01/2023 15 UTC, β) 21/01/2023 18 UTC, γ) 21/01/2023 21 UTC και δ) 22/01/2023 00 UTC. Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>

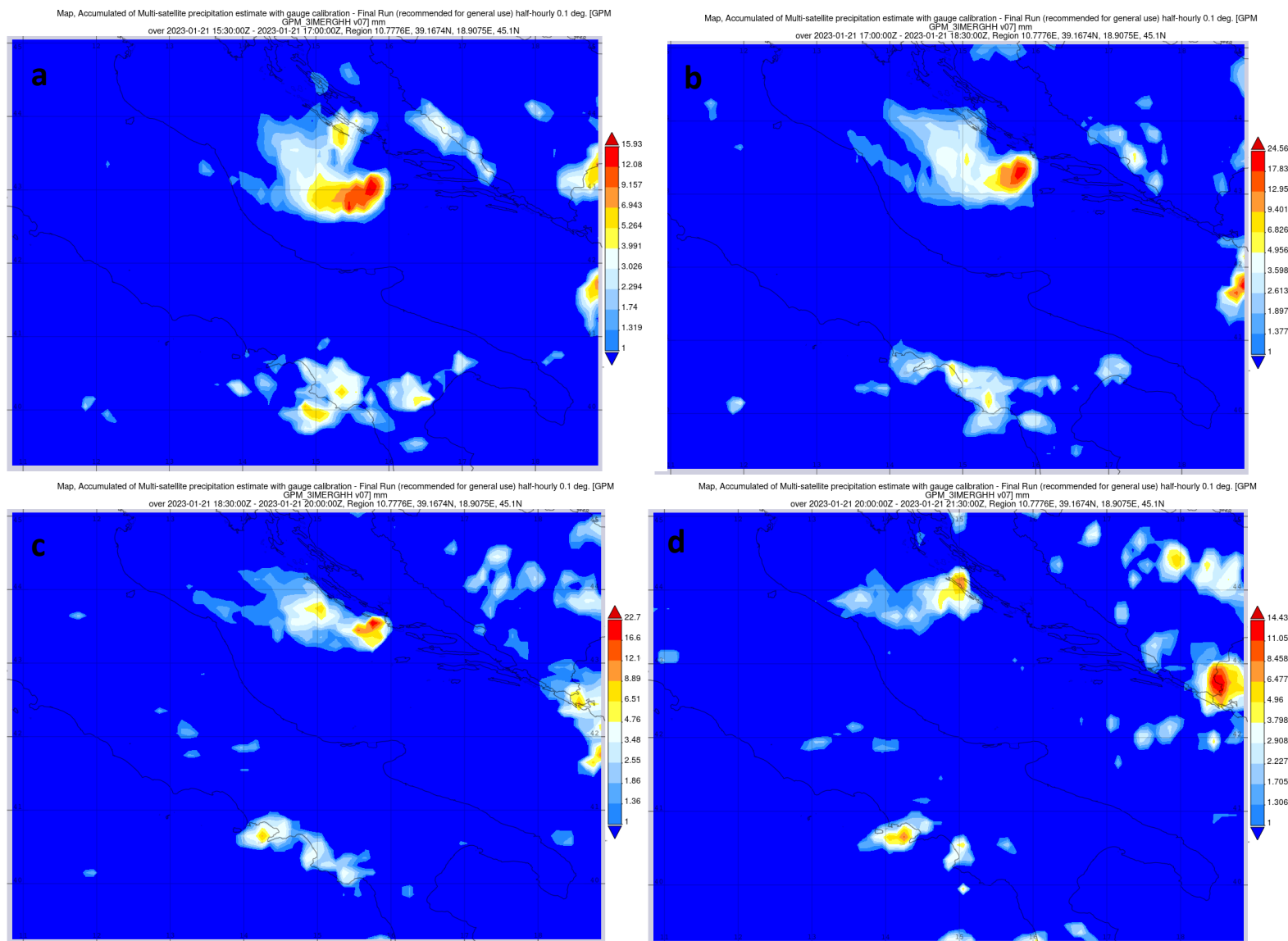


Σχήμα 3.3: Η πορεία που ακολούθησε το βαρομετρικό χαμηλό στις δωρεές επιχειρησιακές αναλύσεις του ECMWF πριν και αφού εμφάνισε χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα στις 21/01/23 15 UTC. Ο εντοπισμός των σημείων ελάχιστης βαρομετρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας και η προβολή τους στον παραπάνω χάρτη έγινε με την χρήση του λογισμικού GrADS.

πάνω από την Ιταλική χερσόνησο στην ευρύτερη περιοχή της πόλης Ανκόνα όπου και διαλύθηκε. Η πορεία του βαρομετρικού χαμηλού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

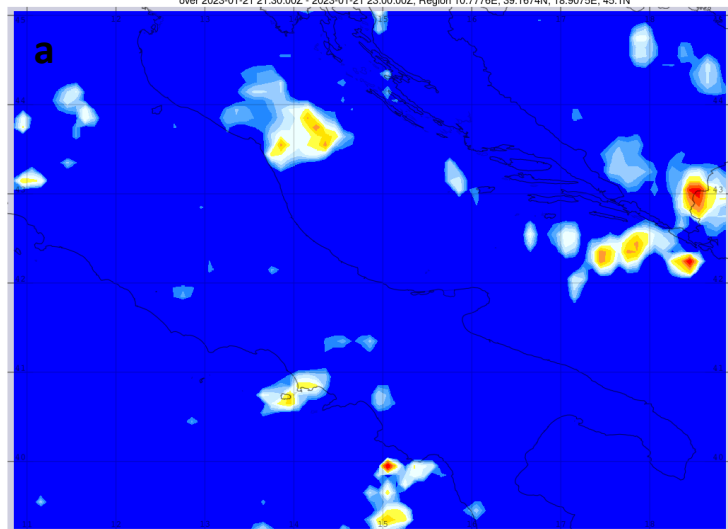
Κάνοντας χρήση της εφαρμογής Giovanni της NASA, που οπτικοποιεί τις δορυφορικές εκτιμήσεις υετού IMERG-GPM (Huffman et al., 2023), έγινε μελέτη του αθροιστικού ύψους υετού που παρουσίασε το σύστημα. Συγκεκριμένα, εξήχθησαν χάρτες που καλύπτουν το διάστημα 21/01 15.30 UTC έως 22/01 03.30 UTC (Σχήματα 3.4, 3.5), με χρονικό βήμα 1.5 ωρών, δηλαδή από τη στιγμή που το σύστημα άρχισε να εμφανίζει χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα μέχρι και τη διάλυση του. Σύμφωνα λοιπόν με αυτούς τους χάρτες το μεγαλύτερο αθροιστικό ύψος βροχής ήταν 24.56 mm και παρατηρήθηκε στο χρονικό διάστημα 17.00-18.30 UTC στις 21/01 (Σχήμα 3.4 b). Βλέποντας τον χάρτη αθροιστικής βροχόπτωσης που καλύπτει ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του κυκλώνα (Σχήμα 3.6), παρατηρείται πως το σύστημα είχε μικρή διάρκεια και επηρέασε μικρή έκταση. Όσον αφορά την ένταση, συγκρινόμενο με τον Μεσογειακό κυκλώνα Qendresa του 2014, που σημείωσε έως και 43.3 mm/hr στην περιοχή του 'ματιού' (Δημητριάδου,

2017), το σύστημα της παρούσας εργασίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέτριας έντασης. Επίσης, τις ώρες που το σύστημα ήταν υπό διάλυση το ύψος της αθροιστικής βροχόπτωσης έφτανε μόλις τα 7.3 mm (Σχήμα 3.5, c).

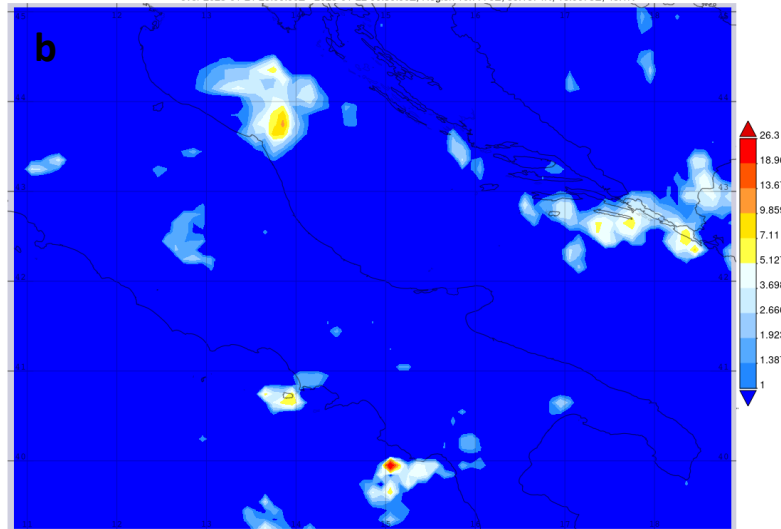


Σχήμα 3.4: Αθροιστικός νετός IMERG-GPM για τα χρονικά διαστήματα α)15.30-17.00 UTC, β)17.00-18.30 UTC, γ) 18.30-20.00 UTC και δ) 20.00-21.30 UTC στις 21/01/2023. Πηγή: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

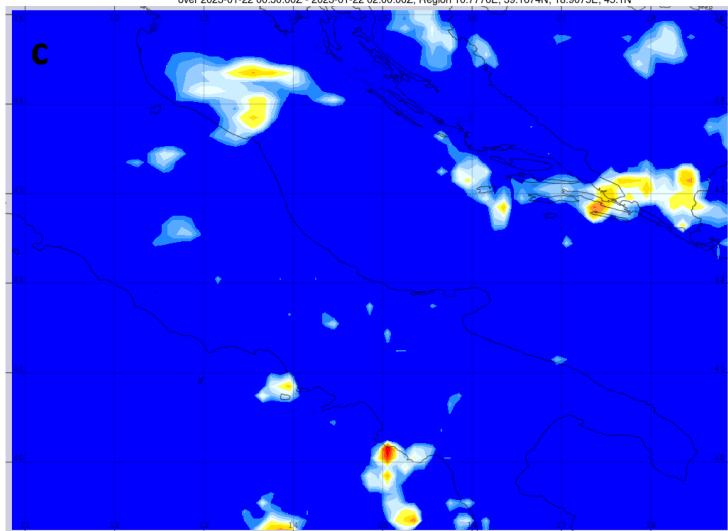
Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM 3IMERGHH v07] mm
over 2023-01-21 21:30:00Z - 2023-01-21 23:00:00Z, Region 10.7776E, 39.1674N, 18.9075E, 45.1N



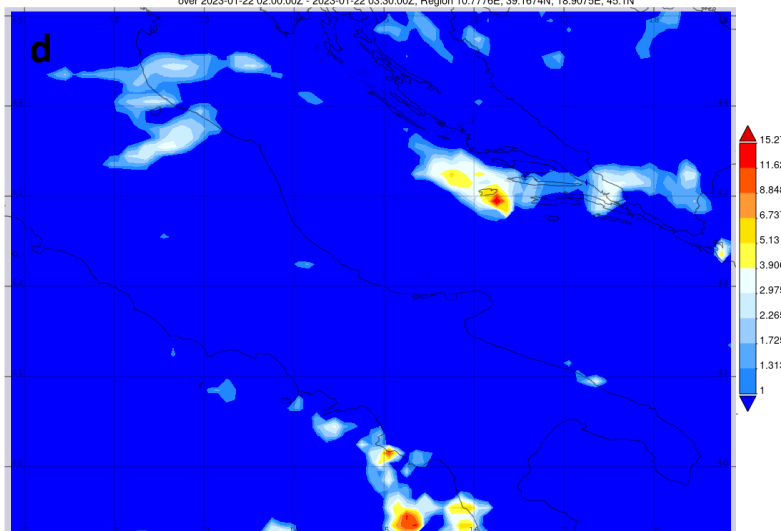
Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM 3IMERGHH v07] mm
over 2023-01-21 23:00:00Z - 2023-01-22 00:30:00Z, Region 10.7776E, 39.1674N, 18.9075E, 45.1N



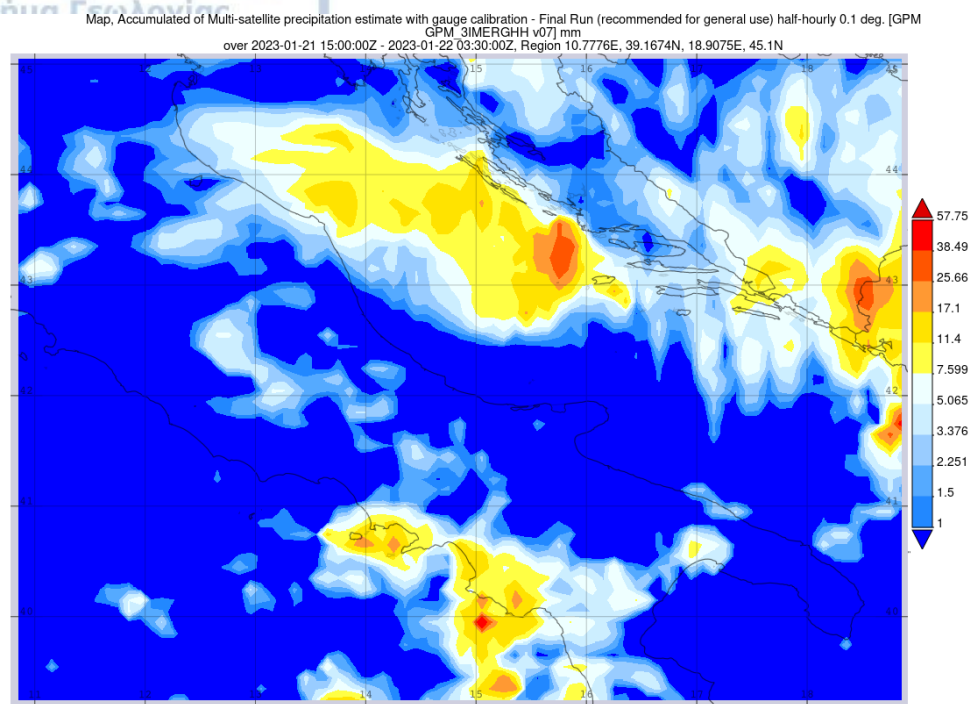
Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM 3IMERGHH v07] mm
over 2023-01-22 00:30:00Z - 2023-01-22 02:00:00Z, Region 10.7776E, 39.1674N, 18.9075E, 45.1N



Map, Accumulated of Multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration - Final Run (recommended for general use) half-hourly 0.1 deg. [GPM 3IMERGHH v07] mm
over 2023-01-22 02:00:00Z - 2023-01-22 03:30:00Z, Region 10.7776E, 39.1674N, 18.9075E, 45.1N



Σχήμα 3.5: Αθροιστικός νετός IMERG-GPM για τα χρονικά διαστήματα α) 21.30-23.00 UTC, β) 23.00-00.30 UTC, γ) 00.30-02.00 UTC και δ) 02.00-03.30 UTC στις 21/01/2023-22/01/2023. Πηγή: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>



Σχήμα 3.6: Αθροιστική βροχόπτωση για το χρονικό διάστημα 21/01 15.00 UTC – 22/01 03.30 UTC. Είναι πως η βροχόπτωση κατά μήκος της πορείας που ακολούθησε το σύστημα είναι περιορισμένη. Ξεχωρίζει το κέντρο του συστήματος στο χρονικό διάστημα που αναφέρθηκε παραπάνω εξαιτίας του μεγάλου ύψους βροχής που συγκεντρώνει. Πηγή: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

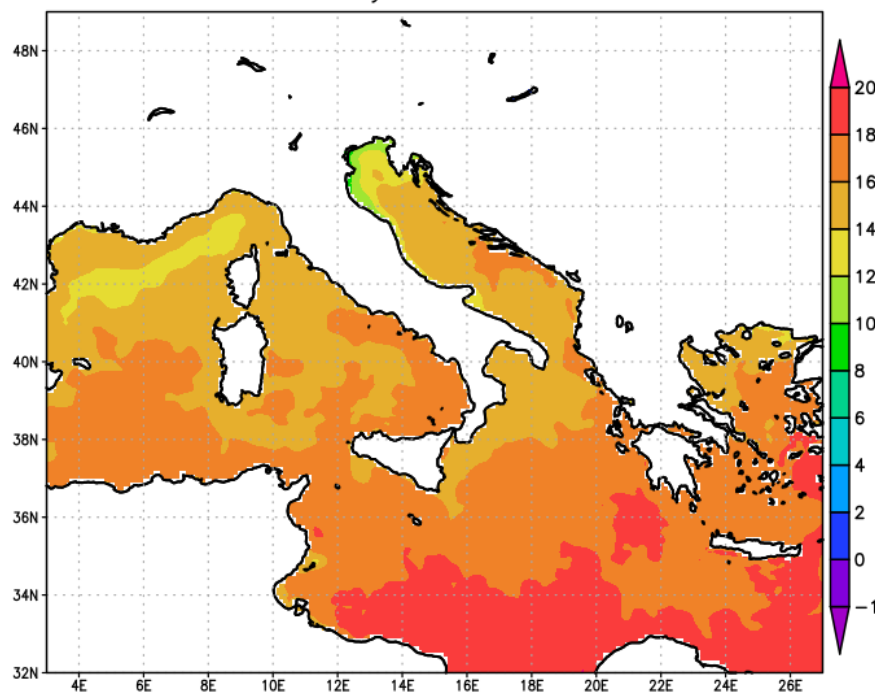
3.2 Θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και ροές θερμότητας

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία των Μεσογειακών κυκλώνων, ένας παράγοντας που φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στην ένταση και την ανάπτυξη τους είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Temperature–SST). Συγκεκριμένα, οι Varlas et al. (2023), από προσομοιώσεις του Μεσογειακού κυκλώνα Ιανού κατέληξαν στο συμπέρασμα πως αν η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας ήταν αυξημένη κατά 2°C τότε θα είχε αυξηθεί σημαντικά η ένταση του φαινομένου. Μια τέτοια αύξηση στην θερμοκρασία θα είχε επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής, αλλά και στην πορεία του συστήματος (Varlas et al., 2023). Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξε και ο Pytharoulis (2018) από προσομοιώσεις του Μεσογειακού κυκλώνα ‘Qendresa’ που εμφανίστηκε στην κεντρική Μεσόγειο στις 7 Νοεμβρίου του 2014. Πιο αναλυτικά, η ένταση και η διάρκεια ζωής του συστήματος εμφάνιζε γραμμική σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας για συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών (Pytharoulis,

2018). Επιπρόσθετα, και σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι Miglietta et al. (2011) από την προσομοίωση κυκλωνικού συστήματος που εμφανίστηκε στην νοτιοανατολική Ιταλία τον Σεπτέμβριο του 2006, αναφέρουν πως ο κυκλώνας παρουσίαζε μικρότερη ένταση και εν τέλει έχανε τα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα όταν υπήρχε μείωση της θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 4°C (Miglietta et al., 2011). Τέλος, οι Tous και Romero (2013), από τη μελέτη 12 περιπτώσεων Μεσογειακών κυκλώνων στο διάστημα 1982-2003, αναφέρουν πώς για τον σχηματισμό των συστημάτων ήταν απαραίτητο η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας να είναι μεγαλύτερη των 15°C , γεγονός που επιβεβαιώνεται σε μεγάλο βαθμό από τη βιβλιογραφία καθώς οι χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας που παρατηρήθηκαν σε Μεσογειακούς Κυκλώνες ήταν $14^{\circ}\text{-}17^{\circ}\text{C}$ (Miglietta et al., 2013).

Στην παρούσα εργασία, κάνοντας χρήση του λογισμικού GrADS και των πλεγματικών δεδομένων από τις επιχειρησιακές αναλύσεις του Integrated Forecast System (IFS) του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού, δημιουργήθηκε χάρτης που απεικονίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Σχήμα 3.7). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η θερμοκρασία στην περιοχή της Αδριατικής θάλασσας όπου το σύστημα απέκτησε και τα χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα ήταν $16^{\circ}\text{-}18^{\circ}\text{C}$, πάνω από το όριο που έθεσαν οι Tous και Romero (2013), όμως στην ευρύτερη περιοχή η θερμοκρασία κυμαινόταν στους $14^{\circ}\text{-}16^{\circ}\text{C}$. Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία διατηρείται σε αυτά τα επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια ζωής του συστήματος. Στο Σχήμα 3.7 διακρίνεται μια περιοχή στην βορειοδυτική πλευρά της λεκάνης της Αδριατικής όπου η θερμοκρασία της θάλασσας κυμαίνεται μεταξύ $8^{\circ}\text{-}12^{\circ}\text{C}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην είσοδο γλυκού νερού από τον ποταμό Πάδο που εκβάλει στην περιοχή και, ιδιαίτερα τον Ιανουάριο, τα ύδατα που μεταφέρει έχουν σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά με αυτά της Αδριατικής θάλασσας (Gačić et al., 1997). Όμως, αυτές οι χαμηλές θερμοκρασίες ήταν εκτός της περιοχής δράσης του κυκλώνα.

Sea Surface Temperature (°C)
21 January 2023 at 00 UTC

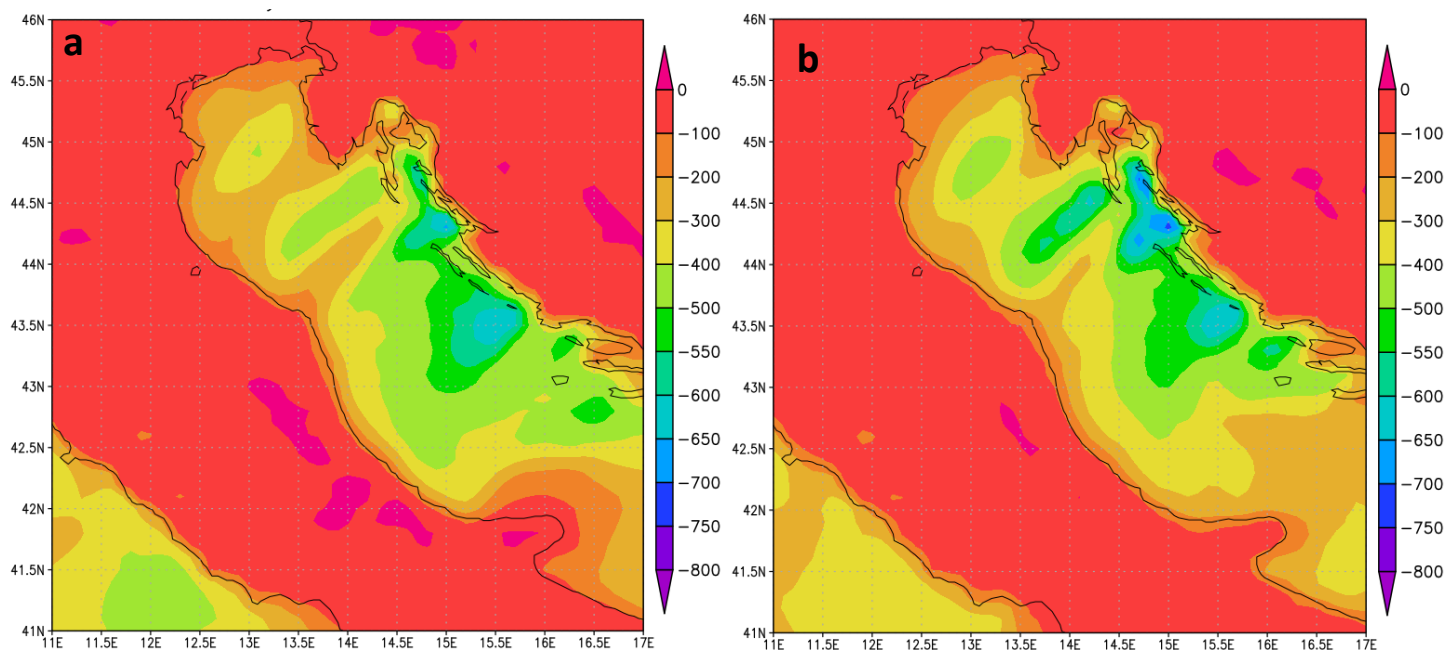


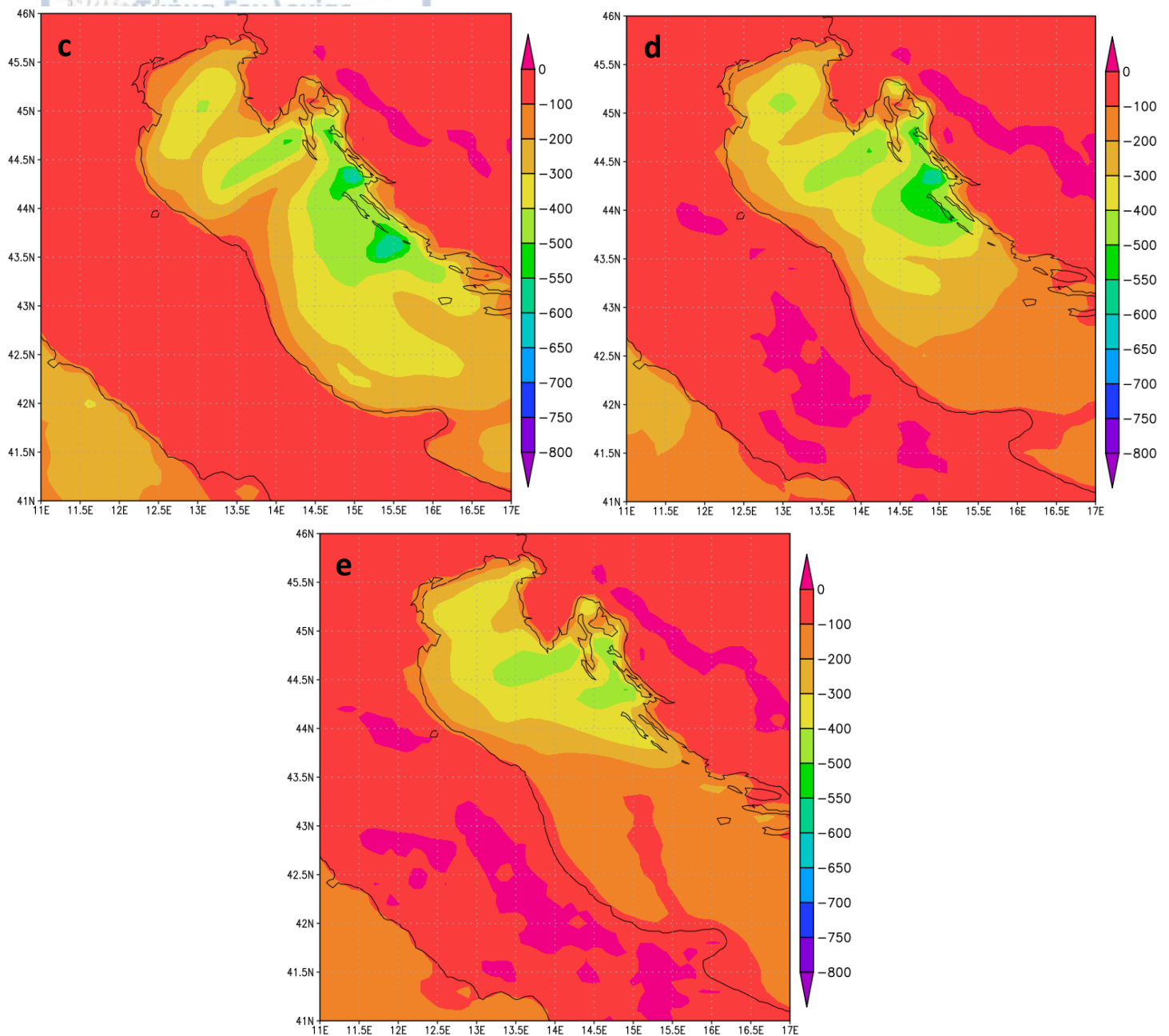
Σχήμα 3.7: Χάρτης της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας (°C) την 21^η Ιανουαρίου 00 UTC.

Οι υψηλές τιμές θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας οδηγούν σε αυξημένες ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας από την επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα (Noyelle et al., 2019). Η αισθητή θερμότητα είναι η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα χωρίς να υπάρχει αλλαγή φάσης. Αντίθετα, η λανθάνουσα θερμότητα είναι η ενέργεια που εκλύεται όταν το νερό μεταβαίνει από μία ενεργειακά υψηλότερη φάση σε μια χαμηλότερη (από υδρατμό σε υγρό) χωρίς όμως να μεταβληθεί η θερμοκρασία του (Παρανός-Λιόλιος, 2016). Οι Pytharoulis et al. (2000), από προσομοιώσεις του μεσογειακού κυκλώνα στις 15 Ιανουαρίου του 1995, κατέληξαν πως η αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα έχουν εξίσου σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της έντασης του συστήματος. Το παραπάνω χαρακτηριστικό έρχεται σε αντίθεση με τους τροπικούς κυκλώνες, στους οποίους η επιφανειακή ροή λανθάνουσας θερμότητας τροφοδοτεί εξ' ολοκλήρου τα συστήματα αυτά. Σε συμφωνία με τους τελευταίους, οι Tous και Romero (2013) έπειτα από την προσομοίωση 12 περιπτώσεων μεσογειακών κυκλώνων το χρονικό διάστημα 1983-2003, αναφέρουν πως, στα περισσότερα συστήματα οι ροές

θερμότητας (αισθητής και λανθάνουσας) από την επιφάνεια επηρεάζουν την ένταση και την πορεία τους.

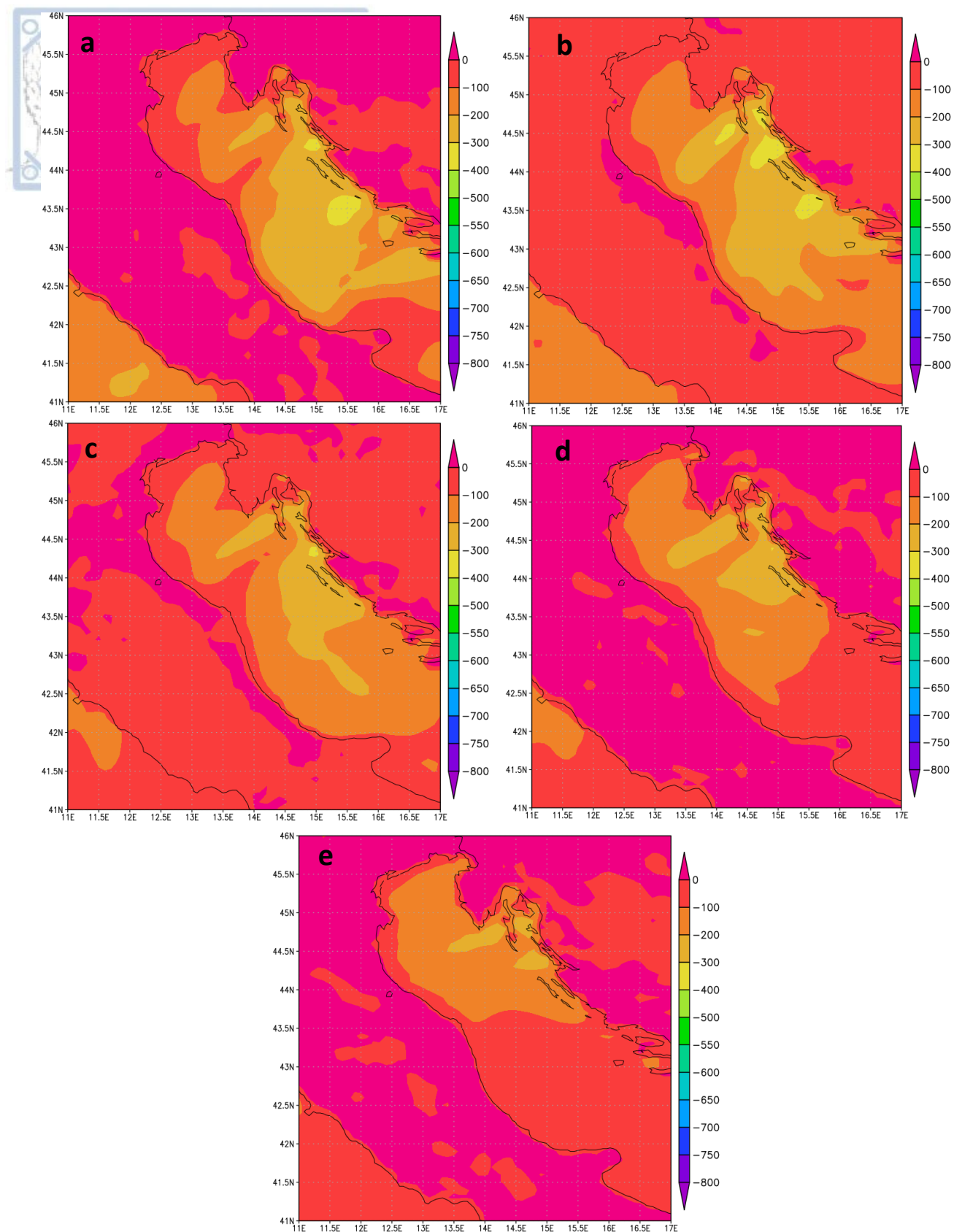
Στην περίπτωση του κυκλωνικού συστήματος που είναι το θέμα της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν προγνωστικά πλεγματικά δεδομένα του Integrated Forecast System (IFS) για την απεικόνιση των επιφανειακών ροών θερμότητας. Πιο αναλυτικά, οι χάρτες (Σχήμα 3.8 & Σχήμα 3.9) καλύπτουν την περιοχή της Αδριατικής θάλασσας και απεικονίζουν τις μέσες ροές θερμότητας σε εξάωρα χρονικά διαστήματα. Οι επιφανειακές ροές λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας προβάλλονται ξεχωριστά. Οι αρνητικές τιμές στους χάρτες δείχνουν πως η ροή έχει κατεύθυνση





Σχήμα 3.8: Χάρτες της μέσης επιφανειακής ροής λανθάνουσας θερμότητας (W/m^2) στην περιοχή της Αδριατικής θάλασσας για τα χρονικά διαστήματα α) 00-06 UTC, β) 06-12 UTC, γ) 12-18 UTC, δ) 18-00 UTC στις 21/01/2023 και ε) 00-06 UTC στις 22/01/2023.

από την επιφάνεια της Γης προς την ατμόσφαιρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 γ και Σχήμα 3.9 γ, για το χρονικό διάστημα όπου το σύστημα εμφάνισε χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα (21/01/2023 12-18 UTC), οι ροές λανθάνουσας θερμότητας έφταναν στα $550-600 W/m^2$ και η



Σχήμα 3.9: Χάρτες της μέσης επιφανειακής ροής αισθητής θερμότητας (W/m^2) για τα χρονικά διαστήματα α) 00-06 UTC, β) 06-12 UTC, γ) 12-18 UTC, δ) 18-00 UTC στις 21/01/2023 και ε) 00-06 UTC στις 22/01/2023.

αισθητή στα $300-400 W/m^2$. Παρόλο που η λανθάνουσα θερμότητα είναι σχεδόν διπλάσια της

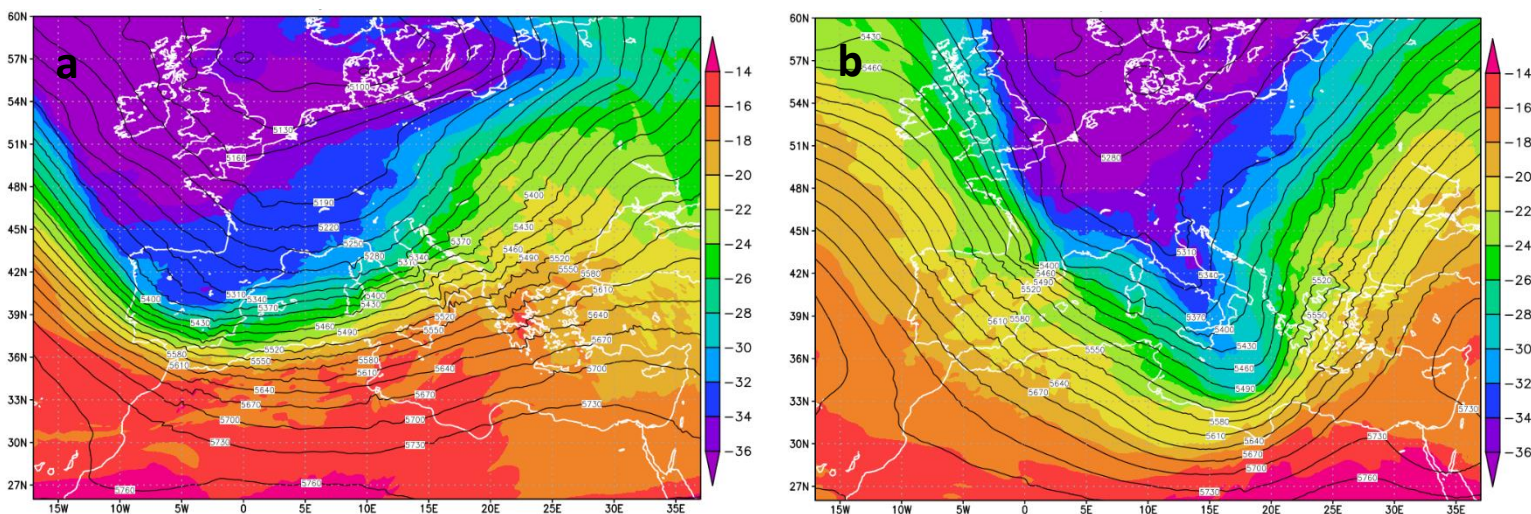
[32]

αισθητή στα , τα δύο μεγέθη είναι συγκρίσιμα καθώς είναι στην ίδια τάξη μεγέθους. Συνεπώς το σύστημα ενισχύθηκε και από τις δύο πηγές ενέργειας, παρουσιάζοντας έτσι ακόμα ένα κοινό χαρακτηριστικό με τους μεσογειακούς κυκλώνες.

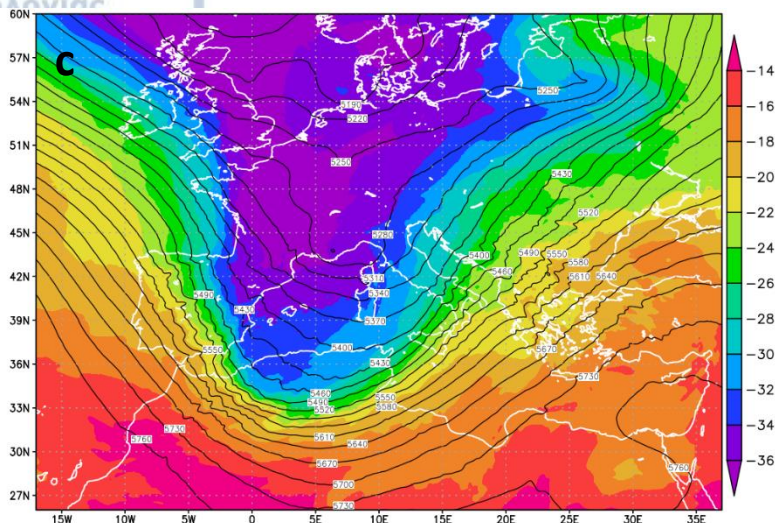
3.3 Γεωδυναμικό ύψος και θερμοκρασία στα 500 hPa και 850 hPa

Γεωδυναμικό ορίζεται ως η δυναμική ενέργεια που απαιτείται για την ανύψωση μιας αέριας μάζας από την επιφάνεια της θάλασσας έως ένα συγκεκριμένο υψόμετρο. Διαιρώντας το με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , προκύπτει το γεωδυναμικό μέτρο (gpm) με το οποίο εκφράζουμε το ύψος μιας ισοβαρικής επιφάνειας (Minzner et al., 1976). Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το γεωδυναμικό ύψος των ισοβαρικών επιφανειών των 500 και 850 hPa για το διάστημα που εμφανίστηκε το βαρομετρικό χαμηλό στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.

Η ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa έχει γενικά μέσο ύψος στα 5500 gpm. Οι χάρτες που την απεικονίζουν χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον εντοπισμό αυλώνων (troughs) και ραχών (ridges), καθώς είναι συστήματα που ρυθμίζουν τον καιρό στην επιφάνεια της Γης (Καρακώστας, 2013). Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται το γεωδυναμικό ύψος και η θερμοκρασία της ισοβαρικής επιφάνειας των 500 hPa, για την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης και της Μεσογείου, τρεις ημέρες πριν εμφανίσει το βαρομετρικό χαμηλό χαρακτηριστικά Μεσογειακού κυκλώνα. Πιο αναλυτικά, στις 18/01/2023 00 UTC υπάρχει ήδη μια διαταραχή στη ροή της κυκλοφορίας στη μέση τροπόσφαιρα, η οποία φτάνει μέχρι και την δυτική Μεσόγειο, συνοδευόμενη από ψυχρές αέρειες μάζες με θερμοκρασία περίπου -26°C . Στις 19/01/2023 00 UTC, ο αυλώνας εκτείνεται πάνω από



[33]

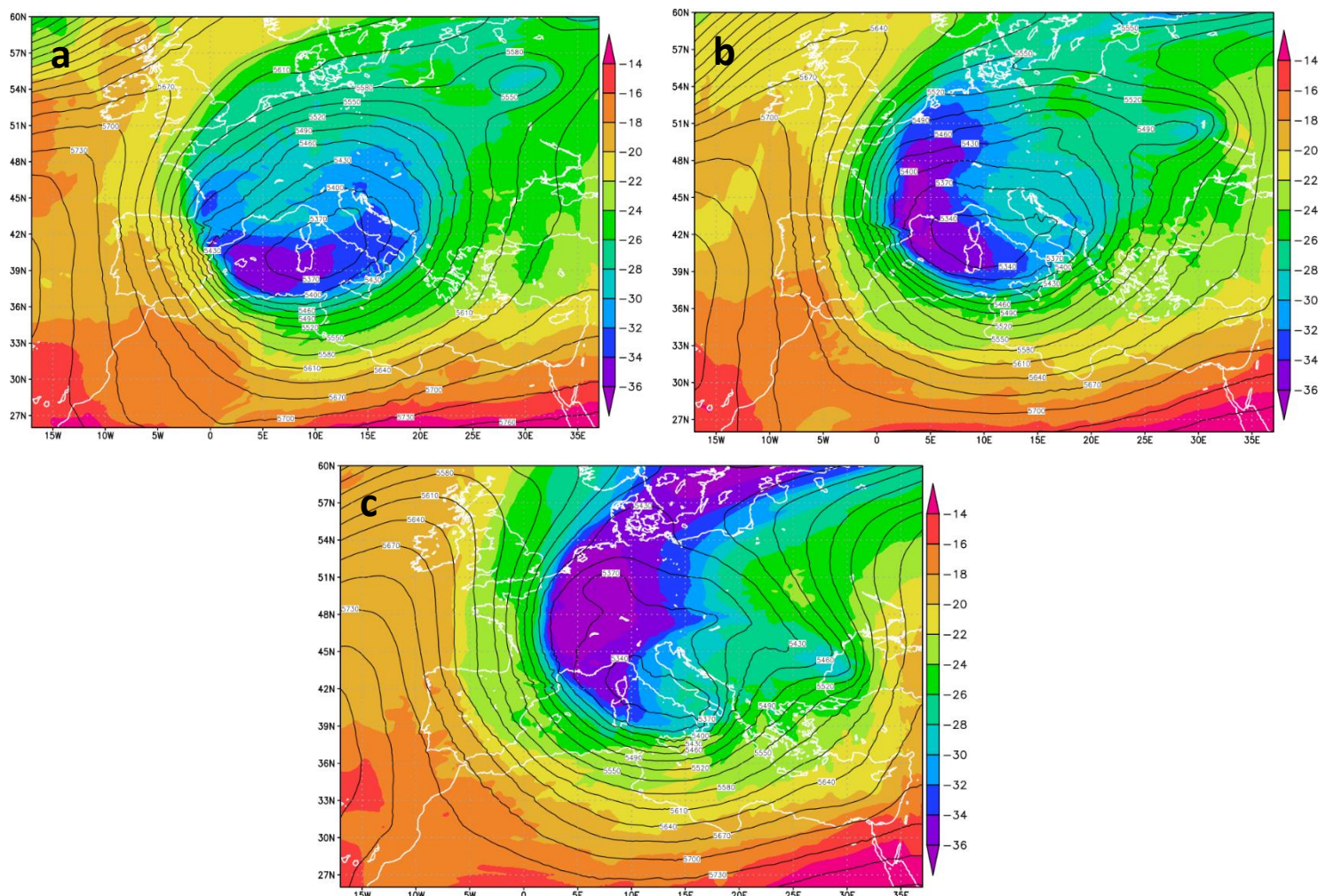


Σχήμα 3.10: Χάρτες που απεικονίζουν το γεωδυναμικό ύψος (gpm, ισοϋψείς καμπύλες) και τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) της ισοβαρικής επιφάνειας των 500 hPa. στις α) 18/01/2023 00 UTC, β) 19/01/2023 00 UTC και γ) 20/01/2023 00 UTC.

την Ιταλική χερσόνησο και την Αδριατική θάλασσα, φτάνοντας σε ύψος 5310-5400 gpm και η θερμοκρασία της αέριας μάζας κυμαίνεται μεταξύ -34° και -36°C . Στις 20/01/2023 00 UTC, το σύστημα μετατοπίστηκε ελαφρώς προς τα ανατολικά συνεχίζοντας όμως να καλύπτει την δυτική Μεσόγειο.

Στο διάστημα των δύο επόμενων ημερών ο κυματισμός της ζωνικής ροής που είχε σχηματιστεί στη μέση τροπόσφαιρα άρχισε να αποκόπτεται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11 στις 21/01/2023 00 UTC ο αυλώνας βρίσκεται πάνω από την κεντρική Ευρώπη και την Τυρρηνική θάλασσα όπου το βάθος του φτάνει τα 5340 gpm. Δώδεκα ώρες αργότερα (21/01/2023 12 UTC) ο κυματισμός έχει πλέον αποκοπεί και παρατηρείται μια ψυχρή λίμνη, με τη θερμοκρασία της αέριας μάζας πάνω από την Κεντρική Μεσόγειο να βρίσκεται μεταξύ -34° και -36°C . Αυτή τη χρονική στιγμή το βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια έχει περάσει στην Αδριατική θάλασσα και η πίεση στο κέντρο του ήταν 993.5 hPa ενώ ο άνεμος στα 10 μέτρα, περίπου 20.3 m/s (Σχήμα 3.1). Στις 22/01/2023 00 UTC το κλειστό χαμηλό των γεωδυναμικών υψών βρίσκεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου πάνω από τη Μεσόγειο θάλασσα με τις ψυχρές αέριες μάζες που το συνοδεύουν να εκτείνονται από τη δυτική πλευρά της λεκάνης έως και την Αδριατική θάλασσα. Ο αυλώνας είχε ήδη αρχίσει να εξασθενεί, με το γεωδυναμικό του ύψος να αυξάνεται από τη στιγμή που αποκόπηκε από την κυκλοφορία. Πιο συγκεκριμένα, στις 22/01/2023 00 UTC η ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa

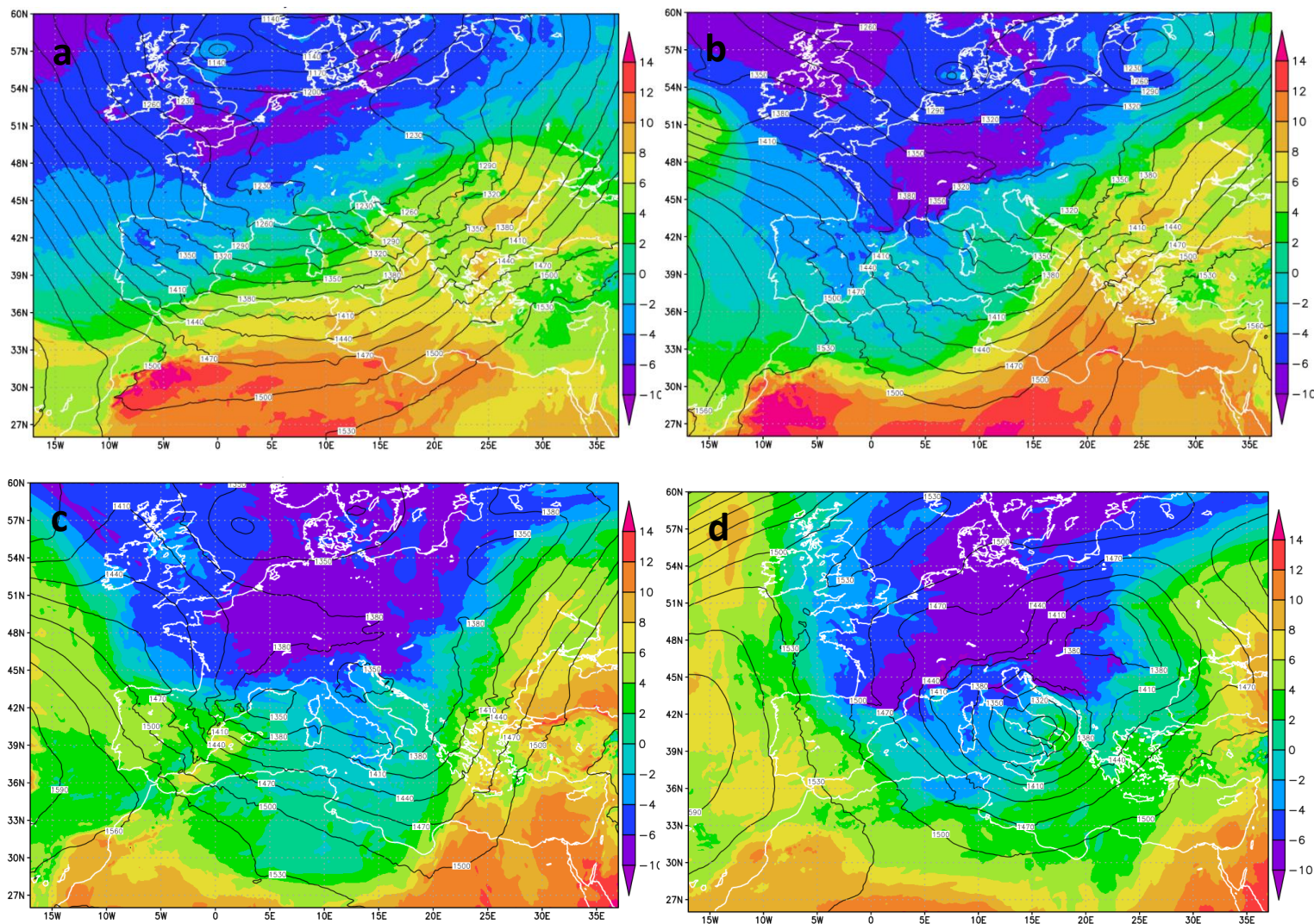
βρίσκóταν σε ύψος 5370 grm (Σχήμα 3.11) και στις 23/01/2023 00 UTC στα 5400 grm (δεν παρουσιάζεται).

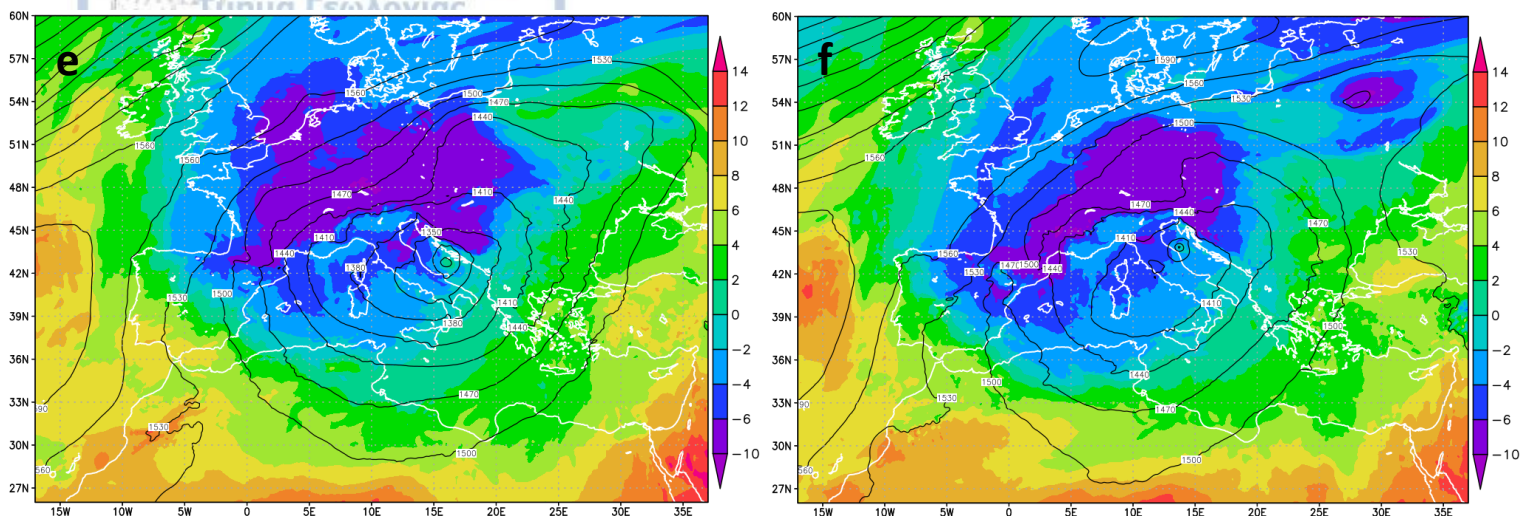


Σχήμα 3.11: Χάρτες που απεικονίζουν το γεωδυναμικό ύψος (grm, ισοϋψείς καμπύλες) και τη θερμοκρασία (°C, χρωματική κλίμακα) της ισοβαρικής επιφάνειας των 500 hPa, στις a) 21/01/2023 00 UTC, b) 21/01/2023 12 UTC και c) 22/01/2023 00 UTC.

Η ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa βρίσκεται συνήθως σε γεωδυναμικό ύψος 1400-1600 grm. Οι χάρτες που απεικονίζουν το γεωδυναμικό ύψος αυτής σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό περιοχών με βροχόπτωση ή χιονόπτωση, θερμικής μεταφοράς καθώς και για τον εντοπισμό μετώπων (Καρακώστας, 2013). Στο Σχήμα 3.12, στις 18/01/2023 00 UTC, διακρίνεται η αρχική διαταραχή που παρατηρήθηκε και στον χάρτη των 500 hPa, που αποτελεί την επέκταση του αυλώνα προς τα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 850 hPa πάνω από το βόρειο τμήμα της

Ιταλικής χερσονήσου έφτανε τα 1230 grm. Μια ημέρα αργότερα (19/01/2023 00 UTC), ο αυλώνας μετακινήθηκε νοτιότερα και το ύψος της ισοβαρικής έφτασε τα 1320 grm πάνω από την Ιταλία και την Αδριατική θάλασσα. Στις 20/01/2023 00 UTC παρατηρούνται δύο κέντρα χαμηλού γεωδυναμικού (1350 grm) στον Κόλπο του Λέοντα και το βόρειο τμήμα της Αδριατικής. Από τα δύο αυτά κέντρα μόνο το δεύτερο διατηρήθηκε και μετατοπίστηκε νότια (στη Νότια Ιταλία) στις 21/01/2023 00 UTC. Την ίδια χρονική στιγμή το κέντρο είχε βαθύνει περαιτέρω, φτάνοντας σε ελάχιστο ύψος τα 1290 grm και αποτελούσε πλέον ένα κλειστό σύστημα. Παράλληλα, το βαρομετρικό χαμηλό στη μέση στάθμη της θάλασσας βρισκόταν στην ίδια θέση με το χαμηλό στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa. Στο διάστημα των επόμενων 24 ωρών (21/01/2023 12 UTC, 22/01/2023 00 UTC), το σύστημα κινήθηκε από τη νότια Ιταλία κατά μήκος της Αδριατικής





Σχήμα 3.12: Χάρτες που απεικονίζουν το γεωδυναμικό ύψος (gpm, ισοϋψείς καμπύλες) και τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$, χρωματική κλίμακα) της ισοβαρικής επιφάνειας των 850 hPa, στις α) 18/01/2023 00 UTC, β) 19/01/2023 00 UTC, γ) 20/01/2023 00 UTC, δ) 21/01/2023 00 UTC, ε) 21/01/2023 12 UTC και ς) 22/01/2023 00 UTC.

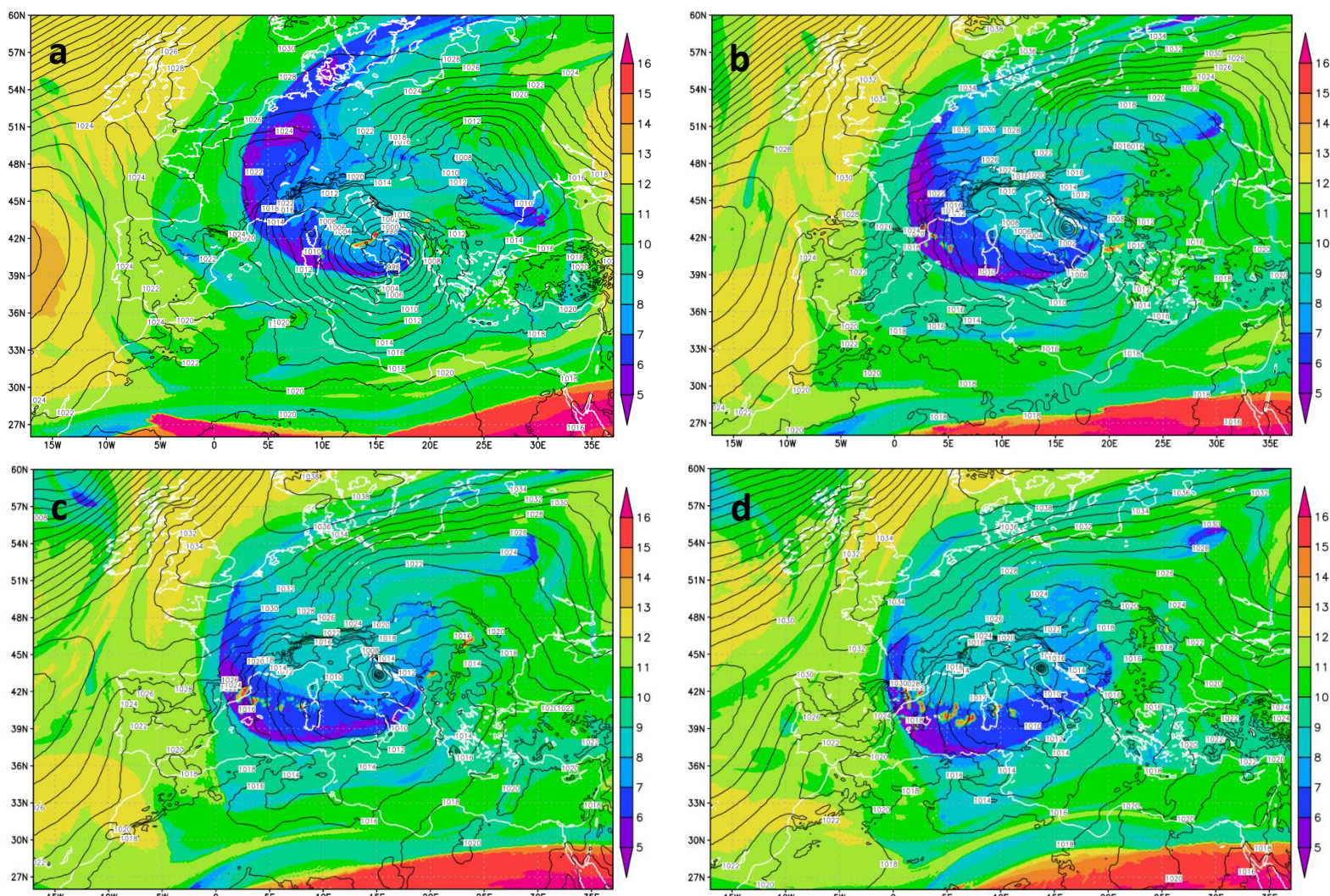
θάλασσας χάνοντας σταδιακά βάθος. Τέλος, στις 23/01/2023 00 UTC το κλειστό σύστημα διαλύθηκε, με τον αυλώνα να παραμένει πάνω από την Αδριατική θάλασσα και το γεωδυναμικό ύψος της ισοβαρικής επιφάνειας των 850 hPa να φτάνει στα 1410 gpm (δεν παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12).

3.4 Δυναμική Τροπόπαυση

Η τροπόπαυση αποτελεί το οριακό στρώμα μεταξύ της τροπόσφαιρας και την υπερκείμενης στρατόσφαιρας. Το στρώμα αυτό δεν είναι συνεχές και το ύψος του μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος, έτσι η τροπόπαυση διακρίνεται σε πολική και τροπική (Σαχσαμάνογλου & Μακρογιάννης, 2004). Η δημιουργία χαρτών που απεικονίζουν το ύψος της τροπόπαυσης βασίζεται στον δυναμικό στροβιλισμό (Potential Vorticity). Οι τιμές του δυναμικού στροβιλισμού στην τροπόσφαιρα είναι συνήθως χαμηλές (≤ 1 PVU), ενώ αντίθετα, στην στρατόσφαιρα είναι σχετικά υψηλές (> 2 PVU). Εφόσον η τροπόπαυση βρίσκεται μεταξύ αυτών των δύο στρωμάτων, και χαρακτηρίζεται από μια ενδιάμεση τιμή δυναμικού στροβιλισμού (1.5-2 PVU). Στην παρούσα εργασία, θεωρήθηκε πως οι δύο μονάδες δυναμικού στροβιλισμού ($\text{PV} = 2 \text{ PVU}$) θα αντιπροσωπεύουν την τροπόπαυση σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (π.χ. Pytharoulis 2018). Η παρουσία ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης, δηλαδή η ελάττωση του ύψους της,

είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον σχηματισμό των Μεσογειακών κυκλώνων (Flaounas et al., 2022; Miglietta et al., 2017).

Στους παρακάτω χάρτες (Σχήμα 3.13) παρουσιάζεται το ύψος της δυναμικής τροπόπαυσης σε συνδυασμό με την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας. Στις 21/01/2023 00 UTC, πριν το



Σχήμα 3.13: Χάρτες που απεικονίζουν το ύψος της δυναμικής τροπόπαυσης ($PV=2$ PVU) σε χιλιόμετρα (χρωματική κλίμακα) και την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (ισοϋψής καμπύλες, hPa), στις α) 21/01/2023 00 UTC, β) 21/01/2023 12 UTC, γ) 21/01/2023 18 UTC και δ) 22/01/2023 00 UTC.

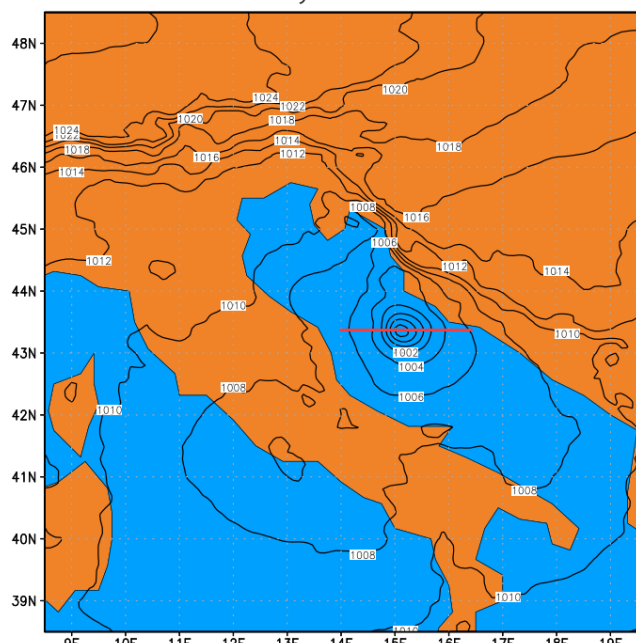
βαρομετρικό χαμηλό εμφανίσει χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα, το κέντρο χαμηλής πίεσης συμπίπτει με την ανωμαλία της τροπόπαυσης η οποία φτάνει μέχρι το ύψος των 5 χιλιομέτρων από την επιφάνεια. Έπειτα, στις 12 και 18 UTC της ίδιας ημέρας, το ύψος της τροπόπαυσης στην

περιοχή του βαρομετρικού χαμηλού κυμαίνεται μεταξύ 8 και 9 χιλόμετρα από την επιφάνεια, ενώ το μέγιστο βάθος της ανωμαλίας βρίσκεται κυρίως πάνω από την Κεντρική Μεσόγειο και τη Νότια Αδριατική αρκετά κοντά στο επιφανειακό χαμηλό. Η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης σε μικρότερα υψόμετρα από ότι συνήθως ευνοεί την αύξηση του στροβιλισμού στη μέση και κατώτερη τροπόσφαιρα, ενώ συγχρόνως οδηγεί σε μείωση της στατικής ευστάθειας της κατώτερης τροπόσφαιρας. Ο συνδυασμός των παραπάνω ευνοεί την ανάπτυξη των επιφανειακών χαμηλών. Επίσης, η εμφάνιση ανωμαλιών της δυναμικής τροπόπαυσης έχει παρατηρηθεί σε αρκετές περιπτώσεις Μεσογειακών Κυκλώνων με χαρακτηριστικά τροπικών κυκλώνων (Miglietta et al., 2017; Pytharoulis, 2018). Τέλος, στις 22/01/2023 00 UTC, η τροπόπαυση βρίσκεται στο ίδιο υψόμετρο ενώ το βαρομετρικό χαμηλό στην επιφάνεια έχει αρχίσει να πλησιάζει την ξηρά.

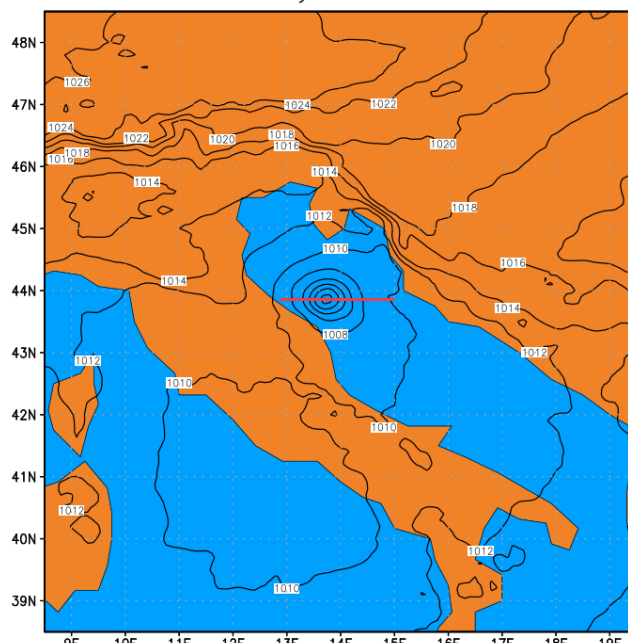
3.5 Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας

Στη μελέτη κυκλωνικών συστημάτων γίνεται χρήση κατακόρυφων τομών της ατμόσφαιρας προκειμένου να μελετηθεί η καθ' ύψος δομή τους. Για την ανάλυση του βαρομετρικού χαμηλού που εμφανίστηκε στην Αδριατική θάλασσα στις 21/01/2023, δημιουργήθηκαν τομές της

Location of vertical cross section & MSLP (hPa)
21 January 2023 18 UTC



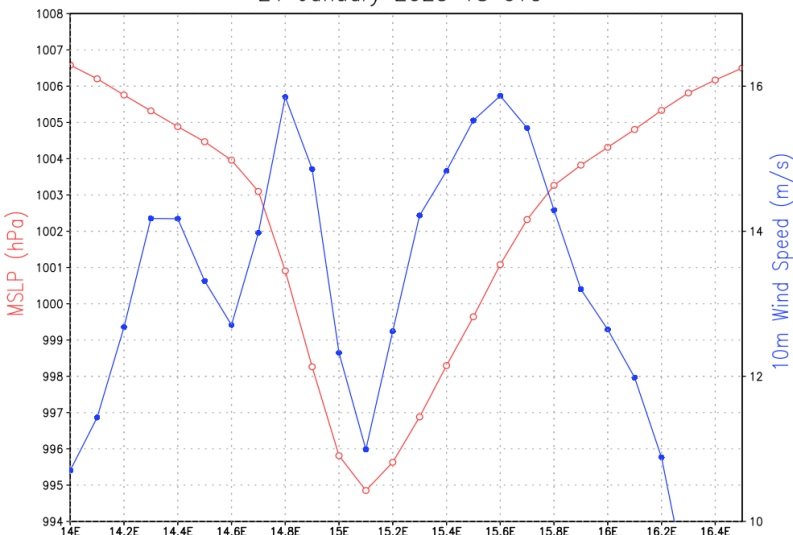
Location of vertical cross section & MSLP (hPa)
22 January 2023 00 UTC



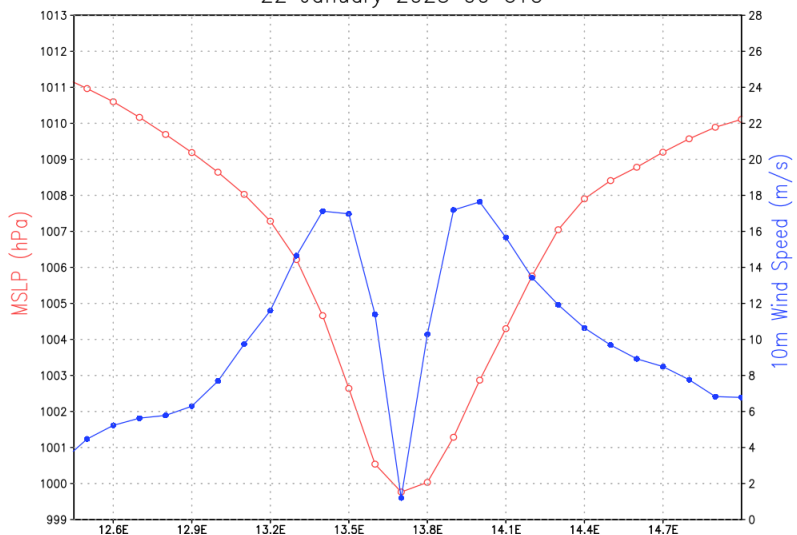
Σχήμα 3.14: Χάρτες που δείχνουν τη θέση των κατακόρυφων τομών της ατμόσφαιρας (κόκκινη γραμμή) και την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa). Οι τομές έχουν διεύθυνση Α-Δ και επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη θέση του κέντρου χαμηλής πίεσης στις χρονικές στιγμές 21/01/2023 18 UTC και 22/01/2023 00 UTC.

ατμόσφαιρα σε δύο χρονικές στιγμές ακολουθώντας τη θέση της ελάχιστης πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (Σχήμα 3.14). Οι τομές έχουν προσανατολισμό ανατολή-δύση και περνούν από το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού στις 21/01/2023 18 UTC και 22/01/2023 00 UTC. Κατά μήκος αυτών δημιουργήθηκαν διαγράμματα της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα (Σχήμα 3.15). Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, στις 21/01/2023 18 UTC η ελάχιστη πίεση στο κέντρο του συστήματος ήταν 994.8 hPa και στις 22/01/2023 00 UTC έφτασε στα 999.4 hPa. Η ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα από την επιφάνεια εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της γύρω από το κέντρο χαμηλής πίεσης του συστήματος, στις περιοχές που αντιστοιχούν στο τοίχωμα του ματιού. Συγκεκριμένα, στις 21/01 18 UTC η

10m Wind Speed (m/s) & MSLP (hPa)
21 January 2023 18 UTC



10m Wind Speed (m/s) & MSLP (hPa)
22 January 2023 00 UTC



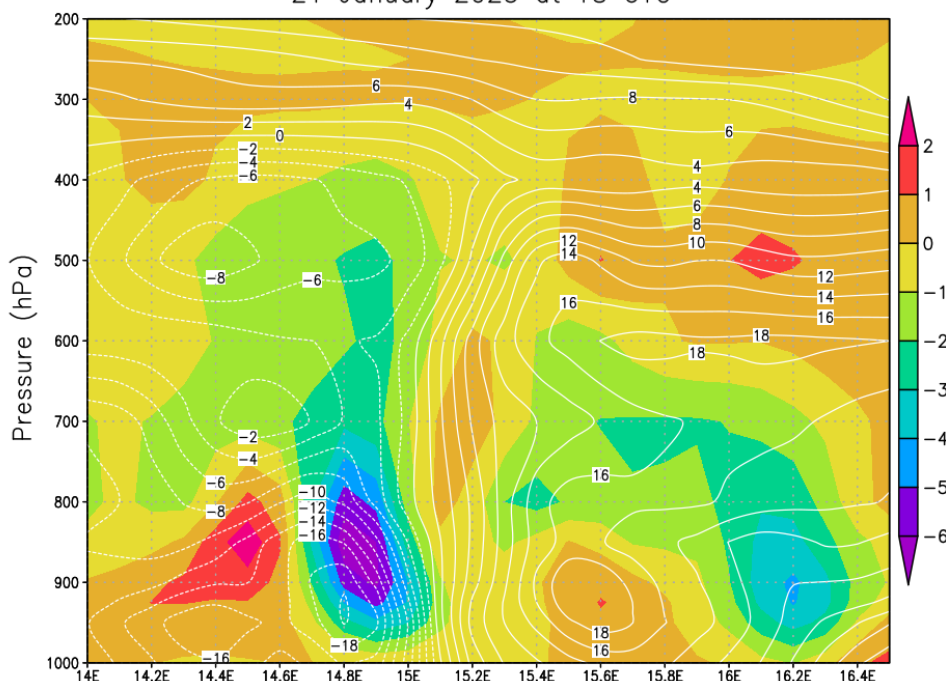
Σχήμα 3.15: Διαγράμματα της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας και της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα κατά μήκος των δύο τομών της ατμόσφαιρας.

μέγιστη ταχύτητα του ανέμου ήταν 15.8 m/s και στις 22/01 00 UTC στα 17.5 m/s. Οι κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας του ανέμου είναι σε συμφωνία με αυτές των τροπικών κυκλώνων και με προηγούμενες μελέτες Μεσογειακών Κυκλώνων (Pytharoulis, 2018).

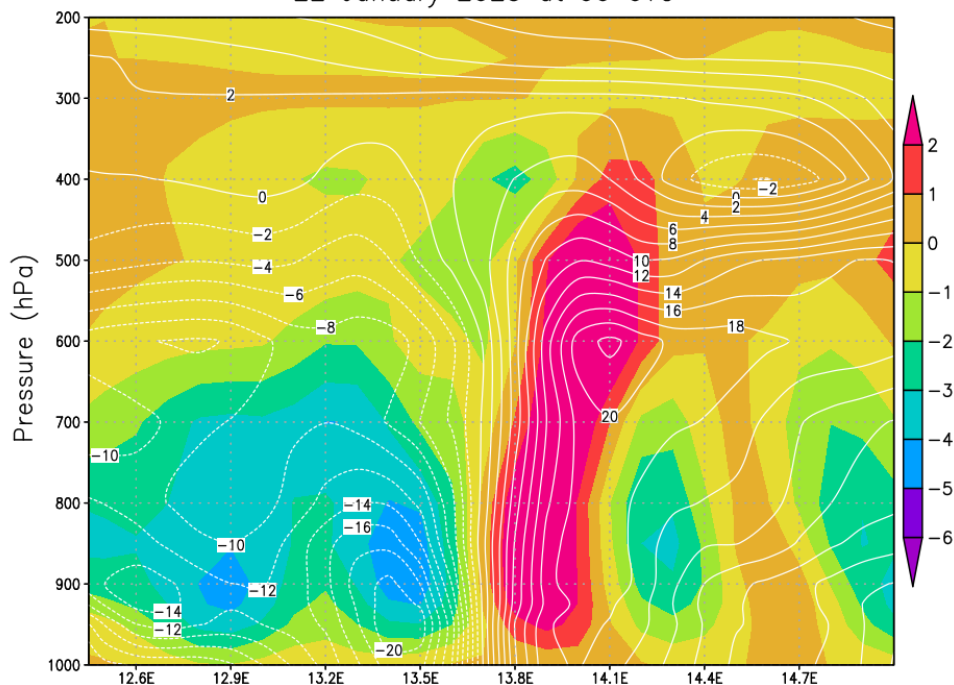
Τις ίδιες χρονικές στιγμές δημιουργήθηκαν και τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν την κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου ωμέγα (ω) και την οριζόντια μεσημβρινή συνιστώσα (V) του ανέμου (Σχήμα 3.16). Η κατακόρυφη ταχύτητα ω ($=\partial p/\partial t$), παίρνει θετικές τιμές όταν η κίνηση της αέριας μάζας είναι καθοδική και αρνητικές τιμές όταν η κίνηση είναι ανοδική. Παρόμοια, η

οριζόντια συνιστώσα V του ανέμου έχει θετικές (αρνητικές) τιμές όταν ο άνεμος έχει κατεύθυνση προς το βορρά (νότο). Στο Σχήμα 3.16 η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην κατακόρυφη ταχύτητα ω και οι καμπύλες γραμμές στην οριζόντια συνιστώσα V . Παρατηρείται πως στις 21/01/2023 18 UTC, υπάρχει μια έντονη κυκλωνική κυκλοφορία κοντά στην επιφάνεια με τη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου να ξεπερνάει τα 18 m/s, σε αντίθεση με τις 22/01 00 UTC όπου ο στρόβιλος δεν είναι καλοσχηματισμένος καθώς το σύστημα είχε φτάσει την ξηρά. Από τα παραπάνω και σύμφωνα με την εξίσωση του θερμικού ανέμου, στις 21/01 18 UTC το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί θερμού πυρήνα καθώς ο μέγιστος κυκλωνικός στροβιλισμός είναι κοντά στην επιφάνεια. Επιπρόσθετα, στις 22/01 00 UTC, διακρίνουμε καθοδικές κινήσεις της αέριας μάζας (πορτοκαλί και κόκκινες αποχρώσεις) ελαφρώς μετατοπισμένες από το κέντρο του συστήματος προς τα ανατολικά, καθώς και ανοδικές κινήσεις (μπλε και πράσινες αποχρώσεις) εκατέρωθεν. Αντίστοιχα στις 21/01 18 UTC, οι καθοδικές κινήσεις στο κέντρο του συστήματος είναι ασθενείς και οι ανοδικές φαίνεται να επικρατούν κυρίως στα δυτικά του κέντρου του βαρομετρικού χαμηλού. Οι καθοδικές κινήσεις στο κέντρο αντιστοιχούν στην περιοχή του 'ματιού' του κυκλώνα, ενώ οι ανοδικές δείχνουν την περιοχή με την έντονη καταιγιδοφόρο δράση

Omega vertical velocity (Pa/s) & V component of wind velocity (m/s)
21 January 2023 at 18 UTC



Omega vertical velocity (Pa/s) & V component of wind velocity (m/s)
22 January 2023 at 00 UTC

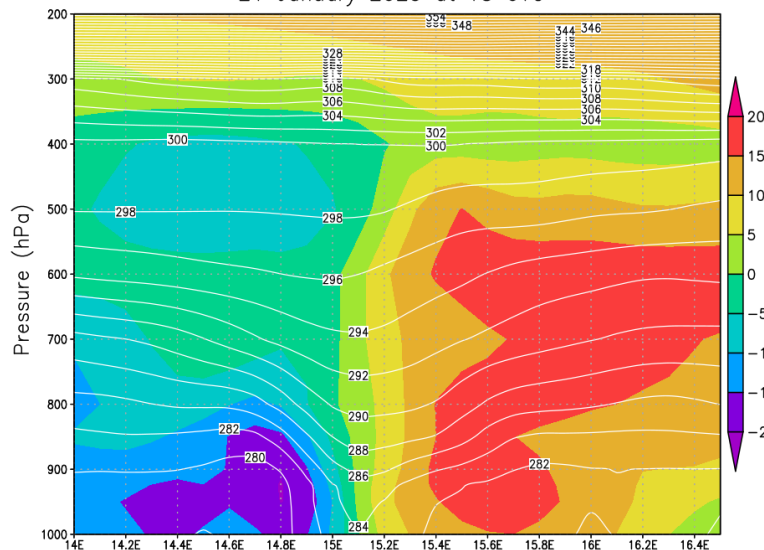


Σχήμα 3.16: Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν την κατακόρυφη ταχύτητα ω (Pa/s, χρωματική κλίμακα) και την οριζόντια συνιστώσα του ανέμου V (m/s, καμπύλες γραμμές) σε δυο χρονικές στιγμές ακολουθώντας το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού.

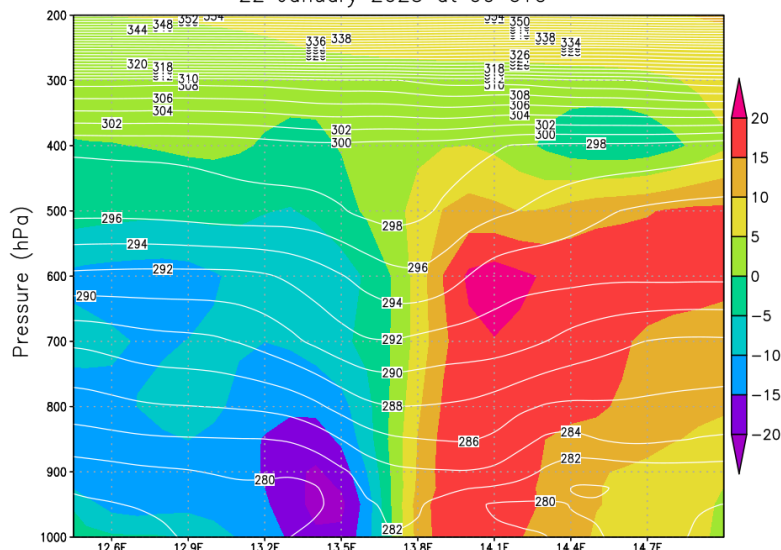
στο τοίχωμα του ματιού. Η χωρική ανάλυση των δεδομένων σε συνδυασμό με τη μικρή έκταση του χαμηλού είναι πιθανές αιτίες για τη μη-εμφάνιση ενός καλοσχηματισμένου 'ματιού'.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σύστημα χαρακτηρίστηκε θερμού πυρήνα στις 21/01 18 UTC από τις κατακόρυφες τομές της ταχύτητας ω και της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου V . Η παρουσία όμως θερμού πυρήνα παρατηρείται εξίσου και στις 22/01 00 UTC από τις αντίστοιχες τομές της δυνητικής θερμοκρασίας και της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου V (Σχήμα 3.17). Η δυνητική θερμοκρασία, θ (K) προκύπτει από την ξηρή και αδιαβατική αναγωγή των αέριων μαζών στο επίπεδο αναφοράς των 1000 hPa και η τιμή της, υπό κανονικές συνθήκες, αυξάνεται καθ' ύψος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, στο κέντρο περιστροφής του χαμηλού που απεικονίζεται μέσω της συνιστώσας V του ανέμου, παρατηρούνται θερμότερες, ως προς την δυνητική θερμοκρασία, αέριες μάζες μέχρι τα 400-500 hPa. Συνεπώς, η ύπαρξη θερμότερων αέριων μαζών μεταξύ άλλων ψυχρότερων, αποτελεί ένδειξη της παρουσίας θερμού πυρήνα σε αυτές τις δύο χρονικές στιγμές.

V component of wind velocity (m/s) & Potential Temperature (K)
21 January 2023 at 18 UTC



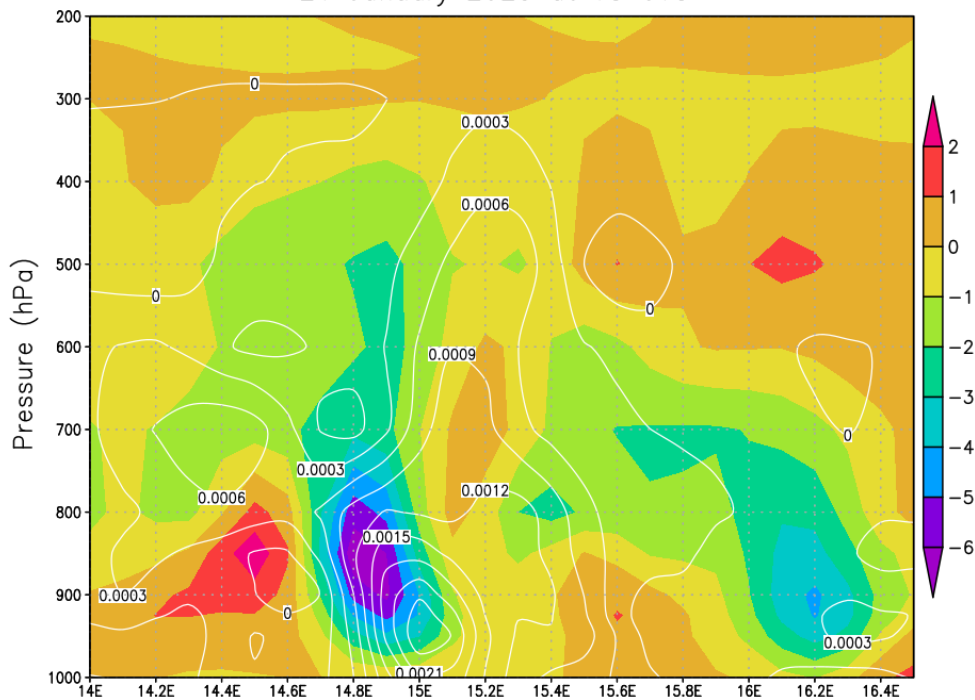
V component of wind velocity (m/s) & Potential Temperature (K)
22 January 2023 at 00 UTC



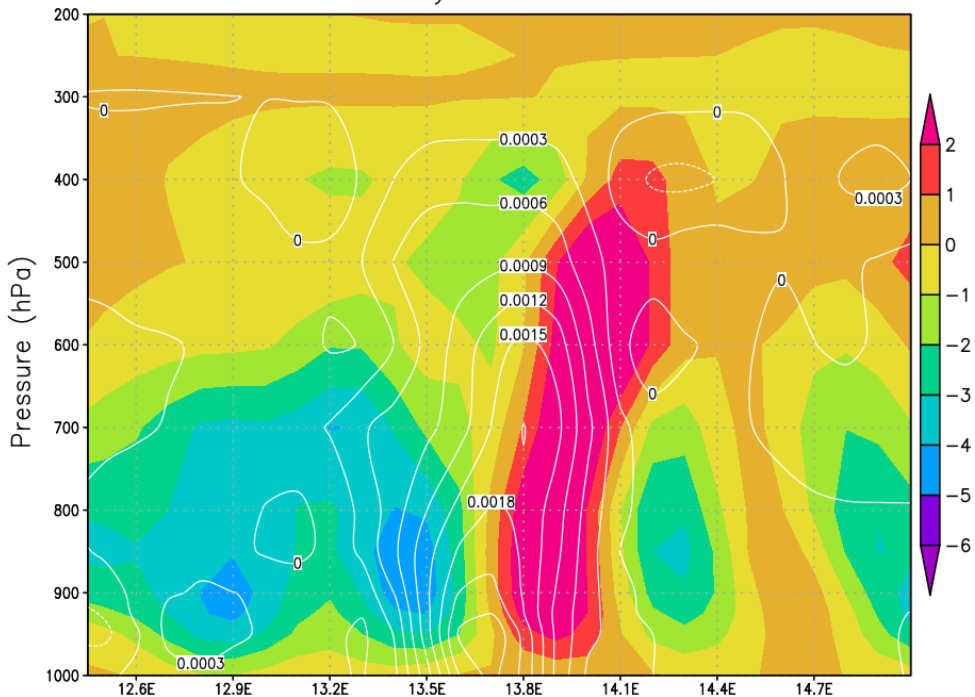
Σχήμα 3.17: Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν την οριζόντια συνιστώσα του ανέμου V (m/s, χρωματική κλίμακα) και τη δυνητική θερμοκρασία (K, καμπύλες γραμμές) σε δύο χρονικές στιγμές ακολουθώντας το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού.

Ακόμη μια σημαντική παράμετρος είναι αυτή του σχετικού στροβιλισμού. Ο σχετικός στροβιλισμός συνδυάζει τις δύο οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου (U και V) προκειμένου να προσδιοριστεί η περιστροφή σε οποιοδήποτε σημείο της ατμόσφαιρας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της δύναμης Coriolis που οφείλεται στην περιστροφή της Γης. Αναμένεται συνεπώς ο σχετικός στροβιλισμός να έχει μεγάλες τιμές στο σημείο με την εντονότερη περιστροφή, που στα κυκλωνικά συστήματα συναντάται στο κέντρο τους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, και συγκεκριμένα στις 21/01 18 UTC, υπάρχει ένα κέντρο σχετικού στροβιλισμού κοντά στην επιφάνεια με μέγιστη τιμή $2.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Την ίδια χρονική στιγμή, σύμφωνα με τις τιμές της κατακόρυφης ταχύτητας ω , φαίνεται πως έχουμε καθοδικές κινήσεις πάνω από το κέντρο περιστροφής. Στις 22/01 00 UTC οι καθοδικές κινήσεις είναι μετατοπισμένες στα ανατολικά της περιοχής μέγιστου στροβιλισμού. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εικόνα του συστήματος φαίνεται να αποκλίνει μερικώς από αυτή των πιο ισχυρών Μεσογειακών κυκλώνων, γεγονός που αναμένεται από συστήματα μικρής έντασης όπως το συγκεκριμένο.

Omega vertical velocity (Pa/s) & Relative Vorticity (s^{-1})
21 January 2023 at 18 UTC



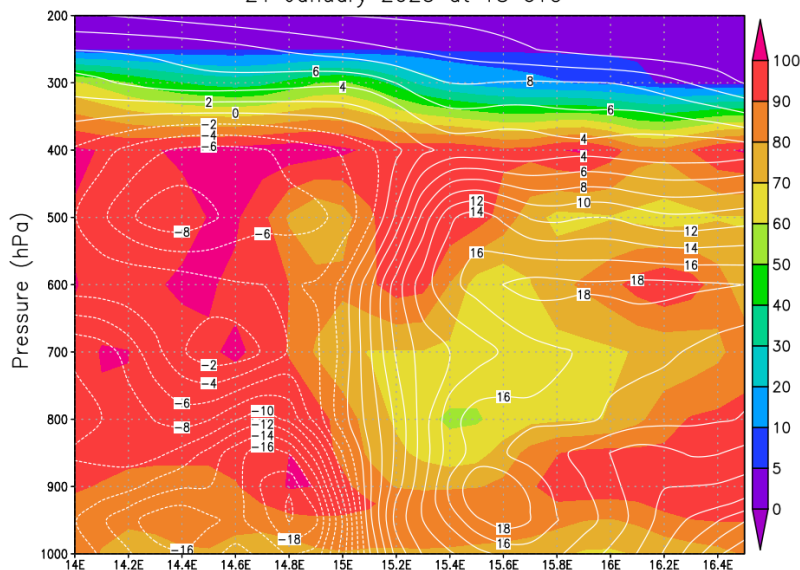
Omega vertical velocity (Pa/s) & Relative Vorticity (s^{-1})
22 January 2023 at 00 UTC



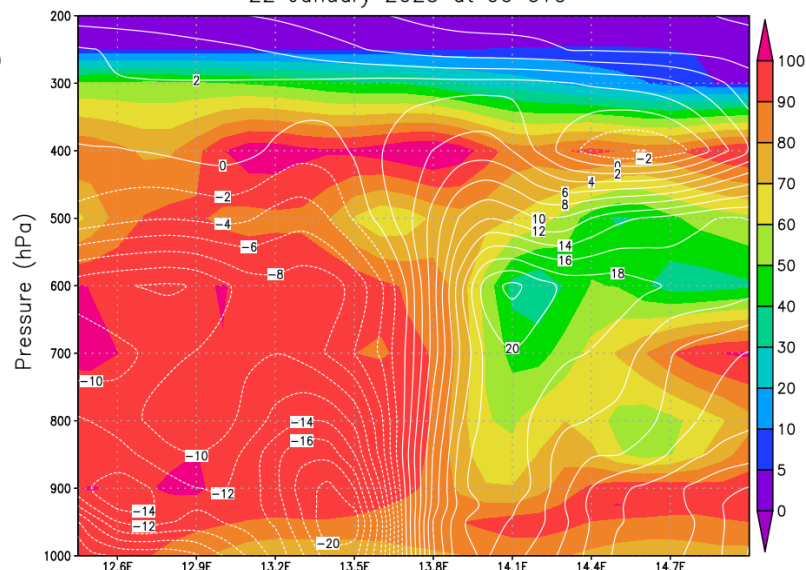
Σχήμα 3.18: Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν την κατακόρυφη ταχύτητα ω (Pa/s, χρωματική κλίμακα) και τον σχετικό στροβιλισμό (s^{-1} , καμπύλες γραμμές) σε δυο χρονικές στιγμές ακολουθώντας το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού.

Η κατακόρυφη κατανομή της σχετικής υγρασίας στο κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού κατά μήκος των δύο τομών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19. Στις 21/01 18 UTC είναι εμφανές πως υπάρχει μια περιοχή με χαμηλή σχετική υγρασία, μεταξύ 50-60% κοντά στο κέντρο του κυκλώνα. Αντίθετα, στις 22/01 00 UTC δεν υπάρχει αέρια μάζα με χαμηλή σχετική υγρασία στο κέντρο, όμως παρατηρείται μετατοπισμένη προς τα ανατολικά, με τη σχετική υγρασία να κυμαίνεται μεταξύ 30-40%. Πρέπει να σημειωθεί πως αυτή η δομή της υγρασίας αποκλίνει από την αναμενόμενη εικόνα που θα συναντούσαμε σε έναν Μεσογειακό κυκλώνα.

Relative Humidity (%) & V component of wind velocity (m/s)
21 January 2023 at 18 UTC



Relative Humidity (%) & V component of wind velocity (m/s)
22 January 2023 at 00 UTC



Σχήμα 3.19: Κατακόρυφες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν την σχετική υγρασία (% , χρωματική κλίμακα) και την οριζόντια συνιστώσα του ανέμου V (m/s, καμπύλες γραμμές) σε δυο χρονικές στιγμές ακολουθώντας το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού.

Στην παρούσα εργασία έγινε συνοπτική μελέτη ενός βαρομετρικού χαμηλού που εμφανίστηκε στη λεκάνη της Μεσογείου και απέκτησε χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στην περιοχή της Αδριατικής θάλασσας τον Ιανουάριο του 2023. Το σύστημα εισήλθε στη Μεσόγειο στις 20 Ιανουαρίου στην Ιβηρική θάλασσα και κατευθύνθηκε ανατολικά προς την Ιταλική χερσόνησο, την οποία και διέσχισε στις 21 Ιανουαρίου 00 UTC. Έπειτα, ακολουθώντας αρχικά βόρειο-βορειοανατολική πορεία που στη συνέχεια έγινε βόρειο-βορειοδυτική, κατά μήκος της Αδριατικής, εμφάνισε ορισμένα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα όπως η σπείρα νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης και 'μάτι' (για περιορισμένο χρονικό διάστημα). Τέλος, τις πρώτες ώρες της 22^{ης} Ιανουαρίου το σύστημα διαλύθηκε στο βόρειο τμήμα της Ιταλικής χερσονήσου.

Η μελέτη του συστήματος έγινε κυρίως με τη χρήση πλεγματικών δεδομένων επιχειρησιακών αναλύσεων και προγνώσεων του ECMWF που επεξεργάστηκαν και οπτικοποιήθηκαν κάνοντας χρήση του λογισμικού GrADS. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δορυφορικά δεδομένα υετού IMERG-GPM (από την εφαρμογή Giovanni της NASA) και υπέρυθρων εικόνων του MSG (μέσω του EUMeTrain-ePort).

Ο σχηματισμός και η πορεία του βαρομετρικού χαμηλού στην επιφάνεια σχετίζεται με την παρουσία ενός αυλώνα στη μέση τροπόσφαιρα. Ο αυλώνας προέκυψε εξαιτίας της έντονης μεσημβρινής ροής των κυμάτων Rossby, που εν συνεχεία οδήγησε στην αποκοπή του χαμηλού και τη δημιουργία ψυχρής λίμνης πάνω από την ανατολική Μεσόγειο. Ο μετασχηματισμός του αρχικού βαρομετρικού χαμηλού σε Μεσογειακό Κυκλώνα με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα φαίνεται πως πραγματοποιήθηκε υπό την παρουσία ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης. Στις 21/01 00 UTC, η τροπόπαυση έφτασε σε ύψος 5-6 χιλιόμετρα από την επιφάνεια, πάνω από το κέντρο του βαρομετρικού χαμηλού. Συνεπώς, η είσοδος στρατοσφαιρικού αέρα με μεγάλες τιμές δυναμικού στροβιλισμού σε συνδυασμό με τον ήδη υπάρχον αυλώνα οδήγησε στην ενίσχυση του κυκλωνικού συστήματος.

Όταν το βαρομετρικό χαμηλό απέκτησε τα χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα, στις 12 UTC της 21^{ης} Ιανουαρίου η ελάχιστη πίεση στο κέντρο του ήταν 993.5 hPa και η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στα 10 μέτρα έφτανε τα 20 m/s. Η πίεση έπειτα αυξανόταν διαρκώς μέχρι και τις 22

Ιανουαρίου 00 UTC που το σύστημα σημείωσε 999.4 hPa και ταχύτητα ανέμου 21.5 m/s. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας στην περιοχή της Αδριατικής κυμαινόταν στους 14°-18° C καθ' όλη την διάρκεια ζωής του βαρομετρικού χαμηλού. Οι επιφανειακές ροές λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, όπως προβλέφθηκαν από το μοντέλο του ECMWF, ήταν μεταξύ 550-600 W/m² και 300-400 W/m², αντίστοιχα. Η μέγιστη αθροιστική βροχόπτωση που σχετίζεται με το σύστημα ήταν 24.5 mm σε διάστημα 1.5 ωρών (17.00-18.30 UTC 21/01) σύμφωνα με δορυφορικά δεδομένα IMERG-GPM της NASA.

Ο σχετικός στροβιλισμός κοντά στην επιφάνεια στο κέντρο του χαμηλού προσέγγισε τα $2.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, ενώ συγχρόνως η ύφεση εμφάνισε θερμό πυρήνα στη μέση και κατώτερη τροπόσφαιρα. Η εικόνα που παρουσίασε όμως το σύστημα στις κατακόρυφες τομές του απέκλινε σε κάποια σημεία από τους πιο καλοσχηματισμένους Μεσογειακούς κυκλώνες που έχουν μελετηθεί στην βιβλιογραφία. Επιπρόσθετα, η σχετική υγρασία της αέριας μάζας στο κέντρο του συστήματος ήταν σε υψηλά επίπεδα (50-60%) χωρίς να σχηματίζει μια οργανωμένη περιοχή χαμηλής υγρασίας στη μέση τροπόσφαιρα. Τα παραπάνω δημιουργούν μια λιγότερο ξεκάθαρη εικόνα ως προς την κατηγοριοποίηση του βαρομετρικού χαμηλού ως Μεσογειακό κυκλώνα.

Ως μελλοντική εργασία, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη αυτού του συστήματος με τη χρήση εξειδικευμένων δορυφορικών δεδομένων (Panegrossi et al., 2023) για τον πιο ξεκάθαρο καθορισμό της ύπαρξης θερμού πυρήνα, καθώς και η πραγματοποίηση αριθμητικών προσομοιώσεων και πειραμάτων με υψηλή χωρική ανάλυση για την πληρέστερη μελέτη των χαρακτηριστικών του χαμηλού και τη διερεύνηση του ρόλου των επιφανειακών ροών ενέργειας, των επιφανειακών θερμοκρασιών της θάλασσας και της τοπογραφίας στην εμφάνιση και ανάπτυξή του.



5. Βιβλιογραφία

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alpert, P., & Ziv, B. (1989). The Sharav Cyclone: Observations and some theoretical considerations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D15), 18495–18514. <https://doi.org/10.1029/JD094iD15p18495>

Ammar, K., El-Metwally, M., Almazroui, M., & Wahab, M. (2013). A climatological analysis of Saharan cyclones. *Climate Dynamics* 43, 483–501 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2025-0>

Businger, S., & Reed, R. J. (1989). Cyclogenesis in Cold Air Masses. *Weather and Forecasting*, 4(2), 133–156. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1989\)004<0133:CICAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1989)004<0133:CICAM>2.0.CO;2)

Campins, J., Genovés, A., Picornell, M. A., & Jansà, A. (2011). Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset. *International Journal of Climatology*, 31(11), 1596–1614. <https://doi.org/10.1002/joc.2183>

Cavicchia, L., Von Storch, H., & Gualdi, S. (2013). A long-term climatology of medicanes. *Climate Dynamics*, 43. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7>

Cioni, G., Malguzzi, P., & Buzzi, A. (2016). Thermal structure and dynamical precursor of a Mediterranean tropical-like cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1757–1766. <https://doi.org/10.1002/qj.2773>

Emanuel, K. (2005). Genesis and maintenance of “Mediterranean hurricanes.” *Advances in Geosciences*, 2, 217–220. <https://doi.org/10.5194/adgeo-2-217-2005>

Flaounas, E., Davolio, S., Raveh-Rubin, S., Pantillon, F., Miglietta, M., Gaertner, M., Hatzaki, M., Homar, V., Khodayar Pardo, S., Korres, G., Kotroni, V., Kushta, J., Reale, M., & Ricard, D. (2022). Mediterranean cyclones: Current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather and Climate Dynamics*, 3, 173–208. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>

Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Kazadzis, S., Gkikas, A., & Hatzianastassiou, N. (2015). Cyclone contribution to dust transport over the Mediterranean region. *Atmospheric Science Letters*, 16(4), 473–478. <https://doi.org/10.1002/asl.584>

Gačić, M., Marullo, S., Santoleri, R., & Bergamasco, A. (1997). Analysis of the seasonal and interannual variability of the sea surface temperature field in the Adriatic Sea from AVHRR data (1984–1992). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C10), 22937–22946. <https://doi.org/10.1029/97JC01720>

Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, Jackson Tan (2023), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V07, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data [48]

Kouroutzoglou, J., Flocas, H. A., Keay, K., Simmonds, I., & Hatzaki, M. (2011). Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1785–1802. <https://doi.org/10.1002/joc.2203>

Kouroutzoglou, J., Samos, I., Flocas, H. A., Hatzaki, M., Lamaris, C., Mamara, A., & Emmannouil, A. (2021). Analysis of the Transition of an Explosive Cyclone to a Mediterranean Tropical-like Cyclone. *Atmosphere*, 12(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/atmos12111438>

Lagouvardos, K., Karagiannidis, A., Dafis, S., Kalimeris, A., & Kotroni, V. (2022). Ianos—A Hurricane in the Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(6), E1621–E1636. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0274.1>

Lagouvardos, K., Kotroni, V., Nickovic, S., Jovic, D., Kallos, G., & Tremback, C. J. (1999). Observations and model simulations of a winter sub-synoptic vortex over the central Mediterranean. *Meteorological Applications*, 6(4), 371–383. <https://doi.org/10.1017/S1350482799001309>

Liberato, M. L. R., Pinto, J. G., Trigo, I. F., & Trigo, R. M. (2011). Klaus – an exceptional winter storm over northern Iberia and southern France. *Weather*, 66(12), 330–334. <https://doi.org/10.1002/wea.755>

Ma, Z., & Fei, J. (2022). A Comparison between Moist and Dry Tropical Cyclones: The Low Effectiveness of Surface Sensible Heat Flux in Storm Intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(1), 31–49. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-21-0014.1>

Michaelides, S., Karacostas, T., Sánchez, J. L., Retalis, A., Pytharoulis, I., Homar, V., Romero, R., Zanis, P., Giannakopoulos, C., Bühl, J., Ansmann, A., Merino, A., Melcón, P., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bruggeman, A., López-Moreno, J. I., Berthet, C., Katragkou, E., ... Nisantzi, A. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric Research*, 208, 4–44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>

Miglietta, M. M. (2019). Mediterranean Tropical-Like Cyclones (Medicanes). *Atmosphere*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/atmos10040206>

Miglietta, M. M., Buscemi, F., Dafis, S., Papa, A., Tiesi, A., Conte, D., Davolio, S., Flaounas, E., Levizzani, V., & Rotunno, R. (2023). A high-impact meso-beta vortex in the Adriatic Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(751), 637–656. <https://doi.org/10.1002/qj.4432>

Miglietta, M. M., Cerrai, D., Laviola, S., Cattani, E., & Levizzani, V. (2017). Potential vorticity patterns in Mediterranean “hurricanes.” *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2537–2545. <https://doi.org/10.1002/2017GL072670>

Miglietta, M. M., Laviola, S., Malvaldi, A., Conte, D., Levizzani, V., & Price, C. (2013). Analysis of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea through a combined modeling and satellite approach. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2400–2405. <https://doi.org/10.1002/grl.50432>

- Miglietta, M. M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., & Rotunno, R. (2011). Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature. *Atmospheric Research*, 101(1), 412–426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.006>
- Miglietta, M., & Rotunno, R. (2019). Development Mechanisms for Mediterranean Tropical-Like Cyclones (Medicanes). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145. <https://doi.org/10.1002/qj.3503>
- Minzner, R. A., Reber, C. A., Jacchia, L. G., Huang, F. T., Cole, A. E., Kantor, A. J., Keneshea, T. J., Zimmerman, S. P., & Forbes, J. M. (1976). *Defining constants, equations, and abbreviated tables of the 1975 US Standard Atmosphere (G-7659)*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19760017709>
- Nastos, P. T., Karavana Papadimou, K., & Matsangouras, I. T. (2018). Mediterranean tropical-like cyclones: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic patterns. *Atmospheric Research*, 208, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.023>
- Noyelle, R., Ulbrich, U., Becker, N., & Meredith, E. P. (2019). Assessing the impact of sea surface temperatures on a simulated medicanes using ensemble simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(4), 941–955. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-941-2019>
- Panegrossi, G., D'Adderio, L. P., Dafis, S., Rysman, J.-F., Casella, D., Dietrich, S., & Sanò, P. (2023). Warm Core and Deep Convection in Medicanes: A Passive Microwave-Based Investigation. *Remote Sensing*, 15(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs15112838>
- Portmann, R., González-Alemán, J. J., Sprenger, M., & Wernli, H. (2020). How an uncertain short-wave perturbation on the North Atlantic wave guide affects the forecast of an intense Mediterranean cyclone (Medicane Zorbas). *Weather and Climate Dynamics*, 1(2), 597–615. <https://doi.org/10.5194/wcd-1-597-2020>
- Pytharoulis, I. (2018). Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface temperatures. *Atmospheric Research*, 208, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.009>
- Pytharoulis, I., Craig, G. C., & Ballard, S. P. (2000). The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995. *Meteorological Applications*, 7(3), 261–279. <https://doi.org/10.1017/S1350482700001511>
- Rasmussen, E., & Zick, C. (1987). A subsynoptic vortex over the Mediterranean with some resemblance to polar lows. *Tellus A*, 39A(4), 408–425. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.1987.tb00318.x>
- Romem, M., Ziv, B., & Saaroni, H. (2007). Scenarios in the development of Mediterranean cyclones. *Advances in Geosciences*, 12, 59–65. <https://doi.org/10.5194/adgeo-12-59-2007>
- SWE, A. (2018, September 30). *Medicane aftermath in Greece and Turkey: Severe winds, torrential rainfall, major flooding and tornadoes*. Severe Weather Europe. <https://www.severe-weather.eu/event->

Tory, K. J., & Dare, R. A. (2015). Sea Surface Temperature Thresholds for Tropical Cyclone Formation. *Journal of Climate*, 28(20), 8171–8183. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00637.1>

Tous, M., & Romero, R. (2013). Meteorological environments associated with medicane development. *International Journal of Climatology*, 33(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/joc.3428>

Trigo, I. F., Bigg, G. R., & Davies, T. D. (2002). Climatology of Cyclogenesis Mechanisms in the Mediterranean. *Monthly Weather Review*, 130(3), 549–569. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2)

Trigo, I. F., Davies, T. D., & Bigg, G. R. (1999). Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region. *Journal of Climate*, 12(6), 1685–1696. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1685:OCOCIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1685:OCOCIT>2.0.CO;2)

Varlas, G., Pytharoulis, I., Steeneveld, G.-J., Katsafados, P., & Papadopoulos, A. (2023). Investigating the impact of sea surface temperature on the development of the Mediterranean tropical-like cyclone “Ianos” in 2020. *Atmospheric Research*, 291, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106827>

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημητριάδου, Κ. Δ. (2017). Δορυφορική μελέτη βαρομετρικών χαμηλών με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στη Μεσόγειο. In *Aristotle University of Thessaloniki Institutional Repository—IKEE* (GRI-2017-20238, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης). <https://doi.org/10.26262/heal.auth.ir.294318>

Παρανός-Λιόλιος, Χ. Α. (2016). Συνοπτική και Δυναμική μελέτη βαρομετρικών χαμηλών με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στη Μεσόγειο. In *Aristotle University of Thessaloniki Institutional Repository—IKEE* (GRI-2016-17356, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης). <https://doi.org/10.26262/heal.auth.ir.284902>

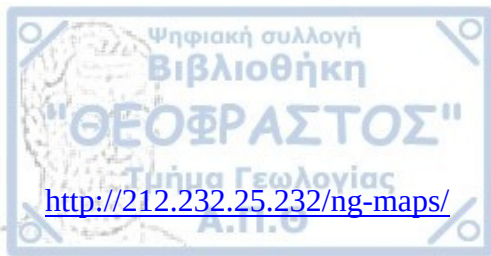
Σαχσαμάνογλου, Χ. Σ., & Μακρογιάννης, Τ. Ι. (2004). *Μαθήματα γενικής μετεωρολογίας*. ΧΑΡΙΣ Ε.Π.Ε.

Καρακώστας, Θ. (2013). Σημειώσεις Συνοπτικής και Δυναμικής Μετεωρολογίας. Σημειώσεις Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών στο μάθημα «Συνοπτική και Δυναμική Μετεωρολογία». Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<https://www.severe-weather.eu/event-analysis/medicane-aftermath-in-greece-and-turkey-severe-winds-torrential-rainfall-major-flooding-and-tornadoes/>

<https://pics.eumetsat.int/viewer/index.html>



<http://212.232.25.232/ng-maps/>

<https://resources.eumetrain.org/satmanu/CMs/Medicane/navmenu.php?page=4.0.0>

<http://meteorologia.uib.eu/medicanes/>