



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



ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ Π. ΦΩΤΙΑΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΝΤΟΝΟΥ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

‘ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ’



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2024





ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ Π. ΦΩΤΙΑΔΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΝΤΟΝΟΥ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ
ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

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

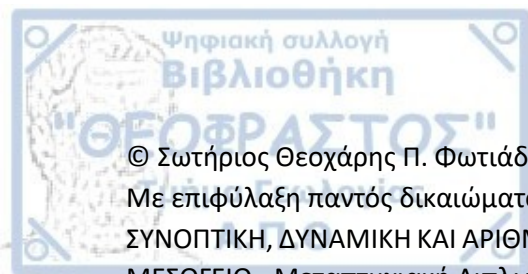
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 11/07/2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Ιωάννης Πυθαρούλης, Επιβλέπων

Καθηγητής Πρόδρομος Ζάνης, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Δρ. Δημήτριος Μπαμπζέλης, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής



© Σωτήριος Θεοχάρης Π. Φωτιάδης, Πτυχιούχος Γεωλόγος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΟΣ ΕΝΤΟΝΟΥ ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ - Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Sotirios Theocharis P. Fotiadis, BSc Geologist, 2024

All rights reserved

SYNOPTIC, DYNAMIC AND NUMERICAL STUDY OF AN INTENSE MEDITERRANEAN CYCLONE - Master Thesis

Citation

Φωτιάδης Σ. Θ. Π., 2024 - Συνοπτική, δυναμική και αριθμητική μελέτη ενός έντονου βαρομετρικού χαμηλού στη Μεσόγειο. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 126 σελ.

Fotiadis S. T. P., 2024 - Synoptic, dynamic and numerical study of an intense Mediterranean cyclone. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 126 pp.

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

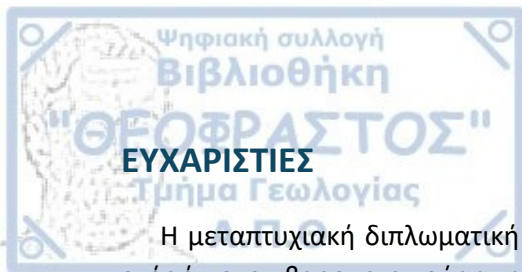
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Αστραπές, κεραυνοί και θυελλώδεις συνθήκες πάνω από τον κόλπο Να Τρανγκ στο Βιετνάμ (Πηγή: <https://www.worldatlas.com/>).



'There is no good or bad weather, only unique weather'
David Vivancos 2014

'Climate is what we expect, weather is what we get'
Mark Twain



Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα «Συνοπτική, δυναμική και αριθμητική μελέτη ενός έντονου βαρομετρικού χαμηλού στη Μεσόγειο» εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον» του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ στον τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.

Μετά από προσπάθεια και συνεχή ενασχόληση τους τελευταίους μήνες ολοκληρώθηκε με επιτυχία η συγκεκριμένη μελέτη. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας με βοήθησαν αποτελεσματικά κάποια άτομα. Αρχικά, ο επιβλέπων της εργασίας μου, κ. Ιωάννης Πυθαρούλης με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια όχι μόνο της μεταπτυχιακής μου διατριβής αλλά και των σπουδών μου συνολικά τόσο στο μεταπτυχιακό όσο και στο προπτυχιακό. Ήταν δίπλα μου σε κάθε απορία χωρίς ποτέ να δυσανασχετήσει για το οτιδήποτε. Μου έμαθε να ψάχνω με τον σωστό τρόπο για να βρίσκω απαντήσεις σε διάφορα ερευνητικά ερωτήματα.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ. Πρόδρομο Ζάνη και τον κ. Δημήτρη Μπαμπζέλη. Επίσης, ευχαριστώ πολύ και τα υπόλοιπα μέλη του τομέα, που μου έδωσαν πολύτιμες γνώσεις αλλά και με στήριξαν κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να κάνω στην κ. Χριστίνα Αναγνωστοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια του προγράμματος «Υποστήριξη των εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων του ΑΠΘ κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 με την ενσωμάτωση ενισχυτικής διδασκαλίας επιπρόσθετα των κύριων διαλέξεων». Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρήστο Σπύρου για την παροχή δεδομένων επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας του CMEMS. Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στη Ζωή Δημητριάδου, που με βοήθησε σε ορισμένα κομβικά σημεία της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους πολύτιμους φίλους μου, οι οποίοι με συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Αφιερώνω αυτή την προσπάθεια στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στη μητέρα μου και στη γιαγιά μου, που όλα αυτά τα χρόνια στάθηκαν δίπλα μου.

Η Μεσόγειος θάλασσα αποτελεί μία από τις βασικές περιοχές κυκλογένεσης παγκοσμίως. Πολλές από αυτές τις υφέσεις συνοδεύονται από έντονα καιρικά φαινόμενα, με σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη ζωή, δραστηριότητα και περιουσία όσο και στο φυσικό περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί ένα έντονο βαρομετρικό χαμηλό που επηρέασε την Ελλάδα στις 14-16 Οκτωβρίου 2021. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε να μελετηθεί το συγκεκριμένο σύστημα είναι οι έντονες πλημμύρες που προκάλεσε καθώς και η μεγάλη έκταση που επηρέασε. Πιο αναλυτικά, οι περιοχές που δέχτηκαν τα μεγαλύτερα ύψη βροχής ήταν τα νησιά του Ιονίου Πελάγους, η δυτική Στερεά Ελλάδα και Πελοπόννησος, η Κεντρική-Ανατολική Μακεδονία, η Χαλκιδική, η Αττική, καθώς και τμήμα της Νότιας Εύβοιας. Η ραγδαιότητα των βροχοπτώσεων ήταν ιδιαίτερα έντονη, προκαλώντας πολλές κατολισθήσεις, καταστροφές σε σπίτια καθώς και έναν θάνατο. Στις 14 Οκτωβρίου, οι μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στην Ιθάκη και στην περιοχή Πατήσια της Αθήνας κατέγραψαν 343.4 mm και 147.4 mm υετού, αντίστοιχα. Από την ΕΜΥ για το διάστημα από τις 13/10 06 UTC έως τις 17/10 06 UTC, μετρήθηκαν 190.6 mm βροχής στον σταθμό της Κεφαλονιάς, 148.9 mm στον σταθμό της Κέρκυρας και 136 mm στον σταθμό της Ανδραβίδας. Στο υπό μελέτη σύστημα δόθηκε η ονομασία «Μπάλλος». Επίσης, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι κατά την περίοδο εμφάνισης αυτής της έντονης ύφεσης, παρατηρήθηκαν στην Κεντρική και Ανατολική Μεσόγειο σχετικά υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας (ΕΘΘ) από τις κανονικές. Αυτό αποτελεί σημαντικό κίνητρο διερεύνησης του ρόλου τους στην ανάπτυξη του βαρομετρικού χαμηλού και της ευαισθησίας των προσομοιώσεων σε διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ.

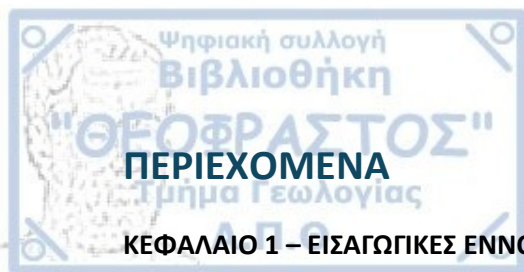
Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η συνοπτική και δυναμική ανάλυση αυτού του συστήματος, καθώς και η αριθμητική μελέτη της ευαισθησίας του στις διαφορετικές πηγές ΕΘΘ. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα παρατηρήσεων, δορυφορικές εκτιμήσεις, επιχειρησιακές πλεγματικές αναλύσεις από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF) και διαφορετικά προϊόντα ΕΘΘ. Αυτά τα δεδομένα συνδυάστηκαν με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το μη υδροστατικό αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού Weather Research and Forecasting (WRF) με τον δυναμικό πυρήνα Advanced Research σε δύο πλέγματα με χωρική διακριτοποίηση 6km x 6km και 2km x 2km. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς και χωρίς παραμετροποίησής της. Τα αποτελέσματα της στατιστικής αξιολόγησης ανέδειξαν πιο αξιόπιστο σχήμα ανωμεταφοράς το Kain-Fritsch, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ευαισθησίας. Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν πειράματα ευαισθησίας με δεδομένα ΕΘΘ από διαφορετικές πηγές και μεθοδολογίες δημιουργίας (NCEP RTG, CMEMS και ECMWF). Με βάση την σημειακή στατιστική αξιολόγηση των προσομοιώσεων των διαφορετικών δεδομένων ΕΘΘ, κρίθηκαν καλύτερες οι ΕΘΘ του NCEP με μικρή διαφορά από το CMEMS για τις συνεχείς μεταβλητές. Το ECMWF αναδείχθηκε ως δεύτερο πιο αξιόπιστο πείραμα στη σημειακή στατιστική αξιολόγηση του υετού. Σύμφωνα με τη συνοπτική ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζει η θερμοκρασία και το γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa, οι αισθητές και λανθάνουσες ροές θερμότητας καθώς και ο υετός στα διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ. Αντίθετα, μικρότερη ευαισθησία εμφανίζει η θερμοκρασία στα 500 hPa και η ταχύτητα του ανέμου.



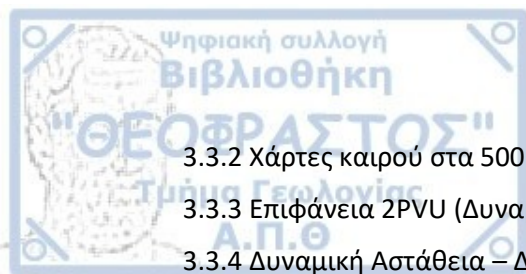
ABSTRACT

The Mediterranean Sea is one of the most cyclogenetic regions worldwide. Many of these depressions are accompanied by severe weather events, with significant impacts on human life, activity and property as well as on the natural environment. In this work, an intense low that affected Greece on October 14-16, 2021 will be studied. The reason why this particular system was chosen to be studied is the intense floods it caused as well as the large area it affected. More specifically, the areas that received the highest amounts of rain were the islands of the Ionian Sea, western Central Greece and Peloponnese, Central-Eastern Macedonia, Halkidiki, Attica, as well as part of Southern Evia. The rapidity of the rainfall was particularly intense, causing many landslides, destruction of houses and one death. On October 14, the weather stations of the National Observatory of Athens recorded 343.4 mm and 147.4 mm of rain in Ithaca and the Patisia area of Athens, respectively. According to EMY measurements, the rainfall reached 190.6 mm in Kefalonia, 148.9 mm in Corfu and 136 mm in Andravida from 13/10 06 UTC to 17/10 06 UTC. The system under study was named "Ballos". Also, it is important to mention that during the period of occurrence of this intense depression, relatively higher sea surface temperatures (SST) than normal were observed in the Central and Eastern Mediterranean. This is an important motivation to investigate their role in the development of the barometric low and the sensitivity of the simulations to different SST data.

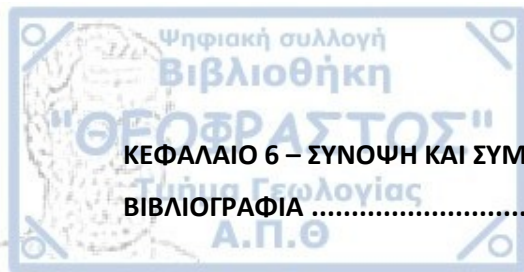
The aim of this study is the synoptic and dynamic analysis of this system, as well as the numerical investigation of its sensitivity to SSTs. In this work used observational data, satellite estimates, operational gridded analyses from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and different products of SSTs. These data were combined with simulations performed with the Weather Research and Forecasting (WRF) non-hydrostatic numerical model with the Advanced Research dynamical core on two grids with a spatial resolution of 6km x 6km and 2km x 2km. In the first place, simulations were performed with different cumulus schemes parameterizations and without cumulus scheme. The results of the statistical evaluation showed a more reliable cumulus scheme Kain-Fritsch, which was used in the sensitivity experiments. Next, sensitivity experiments were performed with SST data from different sources and generation methodologies (NCEP RTG, CMEMS, ECMWF). Based on the pointwise statistical evaluation of the simulations of the different SSTs data, the NCEP SSTs were judged better with a small difference than CMEMS for continuous variables. The dataset ECMWF emerged as the second most reliable experiment in the point statistical assessment of precipitation. According to the synoptic analysis of the model results, the temperature and geopotential height at 850 hPa, the sensible and latent heat fluxes as well as the precipitation show a greater sensitivity to the different SST datasets. Conversely, the temperature at 500 hPa and the wind speed show a lower sensitivity.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	1
1.1 Επεισόδια έντονων βροχοπτώσεων.....	1
1.2 Συνοπτικές συνθήκες και δυναμική των χαμηλών στην Ελλάδα.....	7
1.3 Επίδραση των επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας	9
1.4 Αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF-ARW	14
1.5 Σκοπός και δομή της εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	17
2.1 Κατηγορίες Δεδομένων.....	17
2.1.1 Δεδομένα παρατηρήσεων.....	17
2.1.2 Δεδομένα αναλύσεων.....	20
2.1.3 Δορυφορικά δεδομένα	21
2.1.4 Δεδομένα επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας.....	24
2.1.4.1 Δεδομένα ΕΘΘ του NCEP	24
2.1.4.2 Δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF	24
2.1.4.3 Δεδομένα ΕΘΘ του CMEMS	24
2.1.4.4 Δεδομένα reanalysis v5 του ECMWF (ERA5).....	24
2.2 Μεθοδολογία	25
2.2.1 Αριθμητικό μοντέλο WRF-ARW	25
2.2.2 Περιγραφή των σχημάτων ανωμεταφοράς	27
2.2.2.1 Σχήμα Kain-Fritsch.....	27
2.2.2.2 Σχήμα Grell-Freitas	27
2.2.3 Στατιστική Ανάλυση	28
2.2.3.1 Συνεχείς μεταβλητές	29
2.2.3.2 Διακριτές μεταβλητές	29
2.2.3.3 Επιλογή βέλτιστου πειράματος για τις συνεχείς μεταβλητές	31
2.2.3.4 Επιλογή βέλτιστου πειράματος για τις διακριτές μεταβλητές	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	32
3.1 Ανάλυση του υετού	32
3.1.1 Δεδομένα παρατηρήσεων.....	32
3.1.2 Δορυφορικά δεδομένα υετού IMERG.....	34
3.1.3 Σύγκριση παρατηρήσεων με δορυφορικές εκτιμήσεις	36
3.2 Χάρτες επιφανείας και θερμοδυναμικά διαγράμματα	38
3.3 Συνοπτικοί χάρτες από πλεγματικά δεδομένα του ECMWF.....	42
3.3.1 Χάρτες καιρού στα 850 hPa	42



3.3.2 Χάρτες καιρού στα 500 hPa	44
3.3.3 Επιφάνεια 2PVU (Δυναμική τροπόπαυση)	46
3.3.4 Δυναμική Αστάθεια – Διαγράμματα Hovmöller	47
3.3.5 Διαγράμματα ειδικής υγρασίας και ανέμου	51
3.3.6 Ανεμολογικό πεδίο στα 300 hPa	52
3.4 Επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	55
4.1 Μεμονωμένα κανάλια του MSG	55
4.1.1 Κανάλι 2 - Ορατό φάσμα με κέντρο στα 0.8 μm (VIS0.8)	55
4.1.2 Κανάλι 5 - Κανάλι υδρατμών (υπέρυθρο φάσμα) με κέντρο στα 6.2 μm (WV6.2)	57
4.1.3 Κανάλι 9 - Θερμικό υπέρυθρο φάσμα με κέντρο στα 10.8 μm (IR10.8) και ενισχυμένο θερμικό υπέρυθρο	59
4.2 Συνδυασμός καναλιών RGB	61
4.2.1 Συνδυασμός RGB 2-4-9 - Day Microphysics	61
4.2.2 Συνδυασμός RGB (9-10, 4-9, 9) - Night Microphysics	63
4.2.3 Συνδυασμός RGB (5-6, 8-9, 5) - Airmass	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	67
5.1 Περιοχές ολοκλήρωσης	67
5.2 Επιλογή του βέλτιστου πειράματος	68
5.2.1 Διαμόρφωση των πειραμάτων	68
5.2.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης	69
5.2.2.1 Συνεχείς μεταβλητές	69
5.2.2.2 Διακριτές μεταβλητές	73
5.3 Διερεύνηση της βέλτιστης βάσης δεδομένων ΕΘΘ	76
5.3.1 Εισαγωγή	76
5.3.2 Στατιστική ανάλυση	76
5.3.2.1 Συνεχείς μεταβλητές	76
5.3.2.2 Διακριτές μεταβλητές	80
5.4 Συνοπτική ανάλυση των αριθμητικών πειραμάτων	82
5.4.1 Θερμοκρασίες επιφάνειας της θάλασσας	82
5.4.2 Θερμοκρασία και Γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa	86
5.4.3 Θερμοκρασία και Γεωδυναμικό ύψος στα 500 hPa	89
5.4.4 Επιφανειακές ροές αισθητής θερμότητας	92
5.4.5 Επιφανειακές ροές λανθάνουσας θερμότητας	94
5.4.6 Υετός	96
5.4.7 Ταχύτητα ανέμου στα 10 m	101



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

Η Μεσόγειος Θάλασσα αποτελεί μία περιοχή του πλανήτη, στην οποία παρατηρείται αυξημένη κυκλογενετική δραστηριότητα (Pettersen, 1956; Maheras et al., 2001; Flaounas et al., 2022). Η γεωγραφική της θέση σε συνδυασμό με την πολύπλοκη μορφολογία του εδάφους ευνοεί την ανάπτυξη έντονων βαρομετρικών χαμηλών (Michaelides et al., 2018). Επίσης, σημαντικό ρόλο στη δημιουργία χαμηλών παίζουν και οι επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας (ΕΘΘ), οι οποίες όταν είναι αρκετά υψηλές ενισχύουν την δυναμική των βαρομετρικών συστημάτων που επηρεάζουν (Κατσαφάδος κ.ά, 2010).

Οι περιοχές που περιβάλλουν την Μεσόγειο Θάλασσα χαρακτηρίζονται από διαφορετική κάλυψη Γης, όπως για παράδειγμα οι μεγάλες ερημικές εκτάσεις νότια και ανατολικά της Μεσογείου με σχεδόν ελάχιστη βλάστηση σε αντίθεση με τις καλλιεργήσιμες περιοχές που παρατηρούνται βόρεια και δυτικά. Η διάκριση αυτή οφείλεται σαφώς στην επιρροή των ατμοσφαιρικών διαδικασιών (θερμοκρασία, υγρασία, επικρατούντες άνεμοι) επάνω στην επιφάνεια της Γης. Έτσι, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των ιδιοτήτων του εδάφους με τις διάφορες ατμοσφαιρικές διαδικασίες.

Διάφορα καιρικά συστήματα προερχόμενα από τη δυτική και κεντρική Μεσόγειο επηρεάζουν την Ελλάδα με φαινόμενα όπως ισχυρές βροχοπτώσεις, καταιγίδες και κεραυνούς. Τα φαινόμενα αυτά ορισμένες φορές είναι πολύ έντονα με αποτέλεσμα να προκαλούν καταστροφές σε σπίτια, περιουσίες και καλλιέργειες ενώ μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο και για την ανθρώπινη ζωή. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελεί και ο «Μπάλλος», που έπληξε την Ελλάδα το διάστημα 14 με 16 Οκτωβρίου 2021 με πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις προκαλώντας σοβαρές ζημιές και αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Οι αιτίες των φυσικών καταστροφών διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: γεωφυσικά αίτια που σχετίζονται κυρίως με σεισμούς, μετεωρολογικά αίτια με καταιγίδες, υδρολογικά αίτια με πλημμύρες και κατολισθήσεις και κλιματικά αίτια που περιλαμβάνουν ακραίες θερμοκρασίες, ξηρασία και πυρκαγιές (MunichRe, 2012). Μετεωρολογικά φαινόμενα με σοβαρές επιπτώσεις παρατηρούνται συχνότερα κατά τον Οκτώβριο και Νοέμβριο (Paragiannaki et al., 2013). Αυτό είναι αναμενόμενο, αν σκεφτεί κανείς ότι η ανατολική Μεσόγειος δέχεται μεγάλα ποσά υετού κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου (Katsanos et al., 2007; Lolis et al., 1999), τα οποία προκαλούν πλημμύρες (Lagouvardos et al., 1996). Οι ξαφνικές πλημμύρες αποτελούν το 64% των συνολικών επιπτώσεων που συμβαίνουν τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο εξαιτίας ακραίων φαινομένων (Paragiannaki et al., 2013).

Με βάση την μελέτη των Paragiannaki et al. (2013), στην οποία χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων με 201 καιρικά φαινόμενα που προκάλεσαν σοβαρές επιπτώσεις στην Ελλάδα την περίοδο 2001-2011, σημειώθηκαν 84 θάνατοι λόγω ακραίων φαινομένων. Οι ανθρώπινες απώλειες που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες ήταν κυρίως θύματα από πλημμύρες και κεραυνούς και λιγότερο από ανεμοθύελλες ή ανεμοστρόβιλους. Οι περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο από ακραία φαινόμενα την περίοδο 2001-2011 αποτελούν η Αθήνα, η Θεσσαλονίκη, η Ηλεία και η Χαλκιδική. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι οι ίδιες περιοχές συγκέντρωσαν τα μεγαλύτερα ποσά υετού και στην περίπτωση του «Μπάλλου».

Προηγούμενα γεγονότα ισχυρών βροχοπτώσεων που έπληξαν την Ελλάδα έχουν μελετηθεί τόσο με τη βοήθεια παρατηρήσεων όσο και με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, όπως για παράδειγμα στις εργασίες των Kallos and Pytharoulis (2005), Kotroni et al. (1997, 1999), Lagouvardos et al. (1996), Papadopoulos (2001), Pytharoulis et al. (2016) και Spyrou et al. (2020). Έχει δειχθεί ότι οι ζώνες σύγκλισης πυροδοτούν τη δραστηριότητα των θερινών καταιγίδων στην Ελλάδα, αλλά με ασθενή συνοπτική ροή (Kotroni et al., 1997). Επίσης, έχει επισημανθεί ο ρόλος των ανοδικών κινήσεων λόγω ορογραφίας στην πρόκληση έντονων βροχοπτώσεων και καταιγίδων στην περιοχή της ανατολικής ηπειρωτικής Ελλάδας (Lagouvardos et al., 1996; Kotroni et al., 1999).

Η βροχόπτωση μπορεί να μετρηθεί είτε άμεσα χρησιμοποιώντας όργανα επίγειων μετρήσεων, όπως για παράδειγμα βροχογράφους και βροχόμετρα, είτε έμμεσα με τη χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης, όπως ραντάρ καιρού, δορυφόρους και GPM (Global Precipitation Measurement). Σχετικά με τη διαδικασία αφομοίωσης δεδομένων, αυτή περιλαμβάνει έναν στατιστικό συνδυασμό παρατηρήσεων και βραχυπρόθεσμων προγνώσεων. Συνεπώς, η κατάσταση της ατμόσφαιρας εκτιμάται από έναν συνδυασμό προσομοιώσεων και πραγματικών δεδομένων.

Σημαντικά γεγονότα με μεγάλα ποσά υετού ή/και κεραυνούς αποτελούν τα συστήματα που επηρέασαν κατά κύριο λόγο την Θεσσαλονίκη στις 17-18 Ιουνίου 2009 (Πυθαρούλης κ.ά., 2012) και στις 15 Ιουλίου 2014 (Pytharoulis et al., 2016). Τα επεισόδια αυτά προκάλεσαν σημαντικά προβλήματα, όπως πλημμύρες και ζημιές τόσο σε καλλιέργειες όσο και σε υποδομές της πόλης της Θεσσαλονίκης αλλά και των γύρω περιοχών (Pytharoulis et al., 2016). Σχετικά με το σύστημα του Ιουνίου 2009, χαρακτηριστικό στοιχείο αποτέλεσε ο πολύ μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών εκκενώσεων. Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι διακόπηκε η παροχή ρεύματος στη Θεσσαλονίκη για περίπου μία ώρα τη νύχτα της 17^{ης} Ιουνίου, λόγω χτυπήματος κεραυνού σε υποσταθμό της ΔΕΗ. Επίσης, παρατηρήθηκε σημαντική χωρική μεταβλητότητα του υετού, με τον σταθμό του ΑΠΘ να καταγράφει 14.7 mm από τις 18 UTC στις 17/6 έως τις 06 UTC στις 18/6, ενώ το αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης (LGTS) μέτρησε μόνο 0.4 mm για το ίδιο χρονικό διάστημα (Πυθαρούλης κ.ά., 2012).

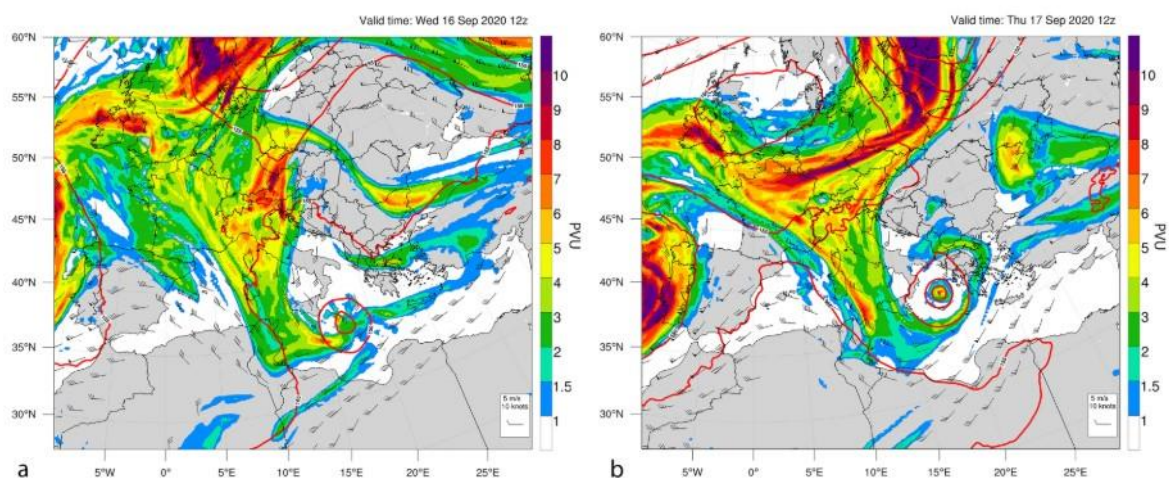
Το σύστημα που επηρέασε την Θεσσαλονίκη στις 15 Ιουλίου 2014, είχε σαν βασικό χαρακτηριστικό τα πολύ μεγάλα ποσά υετού, που αποτέλεσαν ρεκόρ για την πόλη της Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα, ο σταθμός του ΑΠΘ κατέγραψε 98.5 mm από τις 21 UTC στις 14/7 έως τις 12 UTC στις 15/7, δηλαδή σε διάστημα 15 ωρών. Ολόκληρη σχεδόν η ποσότητα της βροχής σημειώθηκε μετά τις 00 UTC, ενώ η μέγιστη ραγδαιότητα ήταν 41 mm μέσα σε 3 ώρες. Αντίστοιχα για το χρονικό διάστημα από τις 00 UTC έως τις 12 UTC στις 15/7, ο σταθμός στο αεροδρόμιο της Θεσσαλονίκης (LGTS) μέτρησε 61 mm (Pytharoulis et al., 2016).

Πέρα από τις ισχυρές βροχοπτώσεις, παρατηρήθηκε και αυξημένη κεραυνική δραστηριότητα στην περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου και στη Χαλκιδική στις 15/7. Ο μέγιστος ωριαίος αριθμός χτυπημάτων ήταν 341 και σημειώθηκε σε διάστημα μίας ώρας μεταξύ 06 και 07 UTC σε αυτή την περιοχή (Pytharoulis et al., 2016). Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη μελέτη και την πρόβλεψη των κεραυνών εξαιτίας της διαθεσιμότητας σύγχρονων συστημάτων, όπως για παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα ZEUS, Arrival Time Difference (ATD) και Hellenic National Meteorological Service - Precision Lightning Network (HNMS-PLN) (Katsanos et al., 2007; Katsanos et al., 2009; Nastos et al., 2014).

Μεγάλο ενδιαφέρον αποτελούν και οι Μεσογειακοί κυκλώνες, που επηρεάζουν ολοένα και πιο συχνά την Ελλάδα τα τελευταία χρόνια. Στις 15 Σεπτεμβρίου 2020, ένας επιφανειακός κυκλώνας

σχηματίστηκε πάνω από τα θερμά νερά του κόλπου της Σύρτης. Οι ΕΘΘ στον κόλπο είχαν ξεπεράσει τους 28°C με βάση δορυφορικές παρατηρήσεις. Επίσης, οι ανωμαλίες ΕΘΘ στο Ιόνιο Πέλαγος ήταν υψηλότερες από 2°C (Lagouvardos et al., 2022). Αλλαγές των ΕΘΘ κατά -2°C έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο σχηματισμό και την ενδυνάμωση των κυκλώνων καθώς επίσης μεταβάλλουν και τη διαδρομή τους (Varlas et al., 2023). Το σύστημα αυτό εμφάνισε τροπικά χαρακτηριστικά όπως συμμετρική δομή και παρουσία θερμού πυρήνα στις 17/9 στις 03 UTC πάνω από το Ιόνιο Πέλαγος και του δόθηκε η ονομασία «Ιανός». Η ελάχιστη ατμοσφαιρική πίεση καταγράφηκε στο σταθμό της Κεφαλονιάς με τιμή 984.3 hPa. Η 48ωρη αθροιστική βροχόπτωση σε Κεφαλονιά και Ζάκυνθο έφτασε τα 769 mm και 250 mm, αντίστοιχα. Άλλες περιοχές που επηρεάστηκαν έντονα με μεγάλα ύψη βροχής ήταν η Καρδίτσα, το Περούλι και το Μουζάκι στην κεντρική Ελλάδα. Τα υψηλά ποσά υετού στην κεντρική Ελλάδα προκάλεσαν εκτεταμένες πλημμύρες και ζημιές σε αστικές και αγροτικές περιοχές καθώς και τέσσερις θανάτους (Lagouvardos et al., 2022).

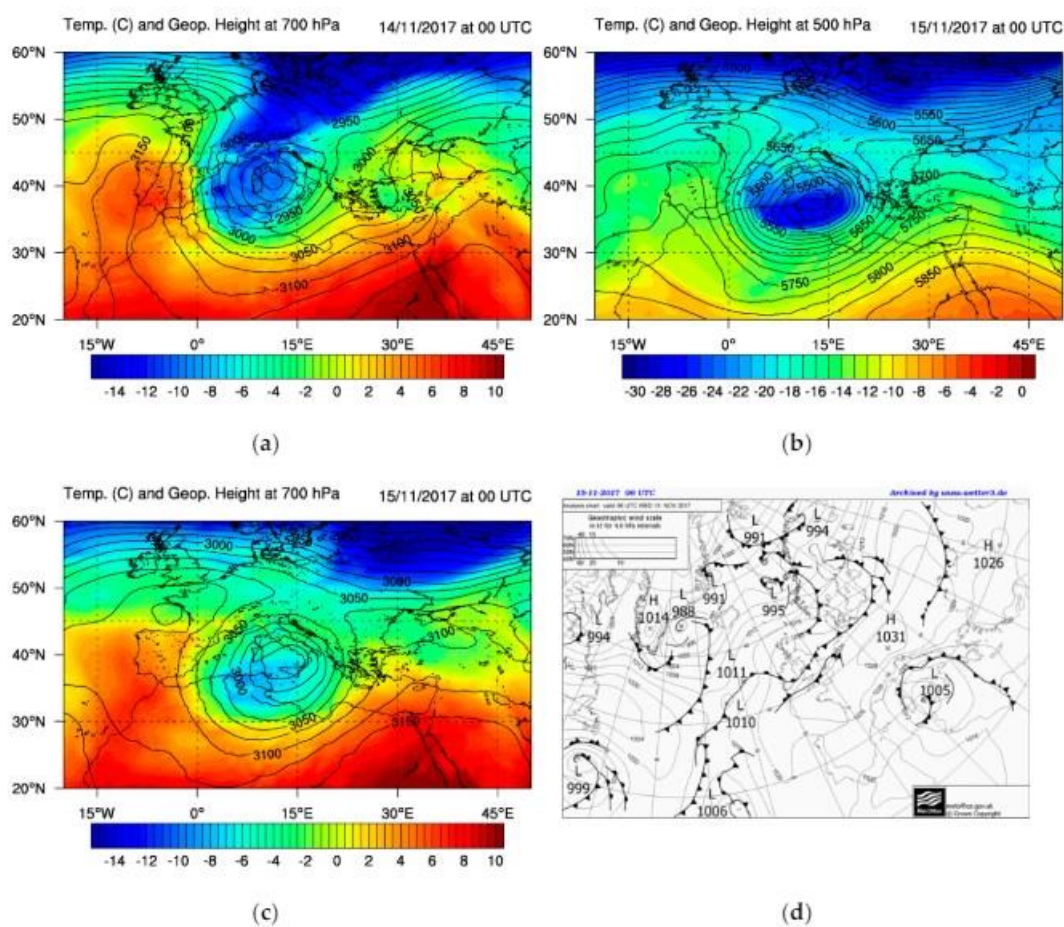
Οι συνοπτικές συνθήκες που δημιούργησαν τον «Ιανό» συνδέονται με ένα αποκομμένο χαμηλό στην κεντρική Μεσόγειο στην ισοβαρική στάθμη των 500 hPa. Στις 17/10, το χαμηλό στα 500 hPa ευθυγραμμίστηκε κάθετα με το χαμηλό στην κατώτερη τροπόσφαιρα αποτελώντας μια τυπική δομή ώριμης φάσης του κυκλώνα. Επίσης, από τη μελέτη του δυναμικού στροβιλισμού διαπιστώθηκε διείσδυση ξηρού στρατοσφαιρικού αέρα κοντά στο κέντρο του συστήματος στις 16/9 στις 12 UTC (Σχήμα 1.1). Αυτή η στρατοσφαιρική εισβολή με τη μορφή «άγκιστρου» αποτελεί ένα πρόδρομο περιβάλλον για την εξέλιξη και ανάπτυξη του κυκλώνα κατά την πρώτη φάση σχηματισμού του (Cioni et al., 2016; Miglietta et al., 2017).



Σχήμα 1.1: Δυναμικός στροβιλισμός (σκίαση, PVT), ταχύτητα ανέμου στην ισημερινική επιφάνεια των 335 K και γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa (κόκκινες ισοϋψείς ανά 50 dam) στις (a) 12 UTC 16/9/2020 και (b) 12 UTC 17/9/2020 (Lagouvardos et al., 2022).

Ένα πολύ σημαντικό γεγονός καταστροφικής πλημμύρας, αποτελεί η περίπτωση της Μάνδρας στη Δυτική Αττική στις 15 Νοεμβρίου 2017. Ο απολογισμός μετά το πέρας του συστήματος που έπληξε την περιοχή ήταν 24 ανθρώπινες απώλειες και σοβαρές εκτεταμένες ζημιές αξίας εκατομμυρίων ευρώ σε ακίνητα και υποδομές. Το φαινόμενο αυτό αποτέλεσε την πιο φονική πλημμύρα στη χώρα τα τελευταία 40 χρόνια (Spyrou et al., 2020). Ο σημαντικότερος ατμοσφαιρικός μηχανισμός που οδήγησε στις ισχυρές βροχοπτώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους προκάλεσαν πλημμύρες ήταν η σύγκλιση του υγρού ΝΑ αέρα πάνω από τις ανατολικές πλαγιές του όρους Πατέρα (Spyrou et al., 2020).

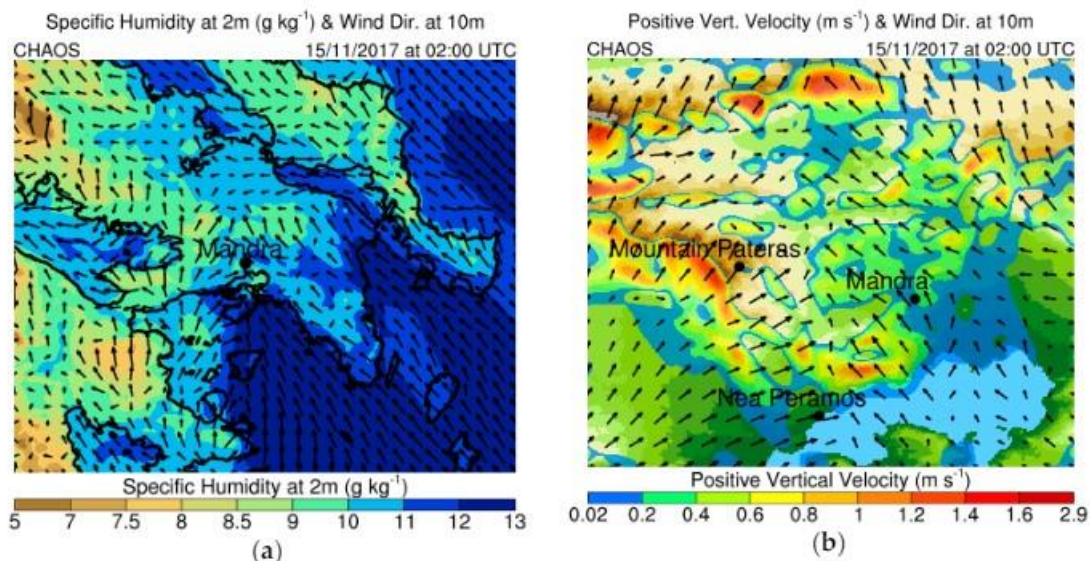
Πιο αναλυτικά, στις 13/11 μία ψυχρή αέρια μάζα συνοδευόμενη από έναν καλά σχηματισμένο αυλώνα εκτείνεται από τη ΒΔ Ευρώπη έως την Κεντρική Μεσόγειο οδηγώντας στη δημιουργία ενός βαθύ βαρομετρικού χαμηλού στη βόρεια Ιταλία και ενός δευτερεύοντος χαμηλού ΝΑ της Σικελίας. Στις 14/11, τα δύο χαμηλά συγχωνεύθηκαν πάνω από την Τυρρηνική θάλασσα συνοδεία εκτεταμένων θερμών και ψυχρών μετώπων (Σχήμα 1.2). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο αυλώνας αποκόπηκε και στη συνέχεια ενισχύθηκε ο πυρήνας του χαμηλού με πολύ ψυχρές αέριες μάζες πάνω από τα θερμά νερά της Μεσογείου. Στις 15/11, η ύπαρξη ενός καλά οργανωμένου χαμηλού παρουσία μετώπων είχε ως αποτέλεσμα τις πλημμύρες στη Μάνδρα (Σχήμα 1.2). Η βροχόπτωση είχε διάρκεια περίπου 5 ώρες ανατολικά του όρους Πατέρα (Spyrou et al., 2020; Varlas et al., 2019).



Σχήμα 1.2: (a) Θερμοκρασία (°C) και γεωδυναμικό ύψος (gpm) από αναλύσεις του μοντέλου GFS στις 00 UTC 14/11/2017 στα 700 hPa, (b) 15/11 στα 500 hPa και (c) 15/11 στα 700 hPa; (d) Συνοπτικός χάρτης επιφάνειας του Met Office στις 06 UTC 15/11 (Varlas et al., 2019).

Παρόλα αυτά, το χαμηλό και τα μέτωπα τοποθετούνται σχετικά μακριά από την πλημμυρισμένη περιοχή (Σχήμα 1.2d). Ο κύριος ατμοσφαιρικός μηχανισμός που τελικά προκάλεσε τις πλημμύρες ήταν η ορογραφική σύγκλιση υγρών θαλάσσιων αερίων μαζών στις ΝΑ πλαγιές του όρους Πατέρα (Σχήμα 1.3). Επίσης, παρατηρήθηκε οριζόντια μεταφορά υγρασίας κατά μήκος του ρέματος Σούρες (Μάνδρα δυτικής Αττικής) και του όρους Πατέρα. Η τοπική σύγκλιση συνδυάστηκε με τα ξηρά καθοδικά ρεύματα στις δυτικές πλαγιές του όρους και αυτό ενέτεινε την επιμονή των βροχοπτώσεων στα ανατολικά του όρους. Ουσιαστικά στη δυτική πλευρά του όρους επικρατούσαν καθοδικά ρεύματα και στην ανατολική ανοδικά. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί απότομα η

απορροή των επιφανειακών υδάτων και να οδηγήσει στην υπερχειλίση/εκροή του ρέματος (Varlas et al., 2019).



Σχήμα 1.3: (α) Ειδική υγρασία στα 2 m και διανύσματα του ανέμου στα 10 m και (β) θετική κατακόρυφη ταχύτητα και διανύσματα ανέμου στα 10 m στις 15/11/2017 02 UTC. Οι χάρτες βασίζονται σε αριθμητικές προσομοιώσεις του μοντέλου CHAOS (Varlas et al., 2019).

Όσον αφορά τις ακραίες βροχοπτώσεις, έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες κλιματικές μελέτες. Μία ανάλυση αναφέρει επεισόδια ημερήσιας ακραίας βροχόπτωσης για τη χειμερινή περίοδο του έτους (Οκτώβριος-Μάρτιος) σε 20 παράκτιες περιοχές της Μεσογείου για τα έτη 1950-2006 (Toreti et al., 2010). Σε έξι από αυτές τις περιοχές εντοπίστηκε πτωτική τάση κατά τη διάρκεια της περιόδου 1950-2006. Επίσης, τα ακραία ημερήσια επεισόδια υετού αποτελούν το 60% περίπου του συνολικού υετού των εποχικών συνόλων (Toreti et al., 2010). Οι ακραίες βροχοπτώσεις συνδέονται κυρίως με κυκλογενετική δραστηριότητα, η οποία σχετίζεται με ποσοστό μεγαλύτερο από 50% των ετήσιων βροχοπτώσεων στη Μεσόγειο (Flaounas et al., 2015). Ωστόσο, ορισμένοι σταθμοί σε Ελλάδα, Κύπρο και Ιταλία παρουσιάζουν αρνητική τάση στην εμφάνιση ακραίων επεισοδίων βροχής (Michaelides et al., 2018).

Άλλοι ερευνητές μελέτησαν την τάση της βροχόπτωσης σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου. Από αρχεία βροχοπτώσεων για μια περίοδο 150 ετών για την περιοχή της Αθήνας, συμπεραίνεται ότι ο αριθμός των βροχερών ημερών ανά δεκαετία εμφανίζει αρνητικές ανωμαλίες τις τελευταίες τρεις δεκαετίες σε σχέση με την κλιματολογία ολόκληρης της περιόδου (Founda et al., 2013). Μια άλλη έρευνα διαπίστωσε ότι στην ευρύτερη περιοχή της Πορτογαλίας, οι βροχοπτώσεις εμφανίζουν φθίνουσα τάση την άνοιξη, ενώ το φθινόπωρο τείνουν να εκδηλώνονται ακραία επεισόδια βροχής ως προς την ένταση και με μεγάλη συχνότητα (de Lima et al., 2013). Στα βόρεια Βαλκάνια και ιδιαίτερα στις ΝΔ περιοχές του Μαυροβούνιου διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των βροχερών ημερών μειώθηκε καθώς η ένταση των βροχοπτώσεων αυξήθηκε (Buric et al., 2015). Επίσης, για την περιοχή της κεντρικής Ιταλίας αναμένεται ότι τα επόμενα 30 χρόνια η πιθανότητα εμφάνισης ενός επεισοδίου ακραίας ξηρασίας διπλασιάζεται (Vergni et al., 2016).

Όσον αφορά την Ελλάδα, σημειώνεται αρνητική τάση για τη χειμερινή βροχόπτωση (Maheras et al., 2004). Παρόμοια τάση εμφανίζεται και κατά το φθινόπωρο και την άνοιξη, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Επίσης, πτωτική τάση διαπιστώθηκε από τους Chorlaki et al. (2000) κυρίως για την βόρεια,

δυτική και ανατολική Ελλάδα. Από τη μελέτη των Feidas et al. (2007) προέκυψε μείωση της χειμερινής και συνολικά της ετήσιας βροχόπτωσης μέσα από την ανάλυση των χρονοσειρών σε πολλούς Ελληνικούς σταθμούς.

Από τη διατριβή του Καραγιαννίδη (2009) για τις ακραίες βροχοπτώσεις διαπιστώθηκε ότι την περίοδο 1960-1975 σημειώθηκε μία σημαντική αρνητική τάση συνολικά στην Ευρώπη, ενώ από το 1975 μέχρι το 2000 δεν καταγράφηκε κάποια τάση. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα μεγαλύτερη πτωτική τάση καταγράφηκε την περίοδο 1983-2000. Στην Ιβηρική χερσόνησο παρατηρήθηκε μείωση των επεισοδίων από το 1960 μέχρι το 2000. Αντίθετα, αύξηση της εξαιρετικής βροχόπτωσης σημειώνεται στην Ελβετία περίπου από το 1975 έως το 1995 (Καραγιαννίδης, 2009). Τα κατώφλια υετού που ορίζουν την εξαιρετική ημερήσια βροχόπτωση διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή (New et al., 2001). Για περιοχές που βρίσκονται στα μέσα γεωγραφικά πλάτη είναι 25.4 mm/day, ενώ σε βορειότερα είναι 50.8 mm/day (Groisman et al., 1999). Μία άλλη τοποθέτηση αναφέρει ως ισχυρή την βροχόπτωση, της οποίας η ραγδαιότητα ξεπερνά τα 7.62 mm/hr (Husche, 1959).

Επιπλέον, το μετεωρολογικό σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή θα μπορούσε να ενταχθεί στην κατηγορία των «εξαιρετικών βροχοπτώσεων». Τέτοιες βροχοπτώσεις απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα και εξετάζονται σε τρία αντικείμενα. Το πρώτο αφορά την μελέτη των συνοπτικών και δυναμικών χαρακτηριστικών τους με σκοπό την καλύτερη βραχυπρόθεσμη πρόγνυσή τους μέσω των αριθμητικών μοντέλων. Το δεύτερο σχετίζεται με την κλιματολογική τους μελέτη και τη μακροπρόθεσμη πρόγνυσή τους και το τρίτο με τους τρόπους προστασίας και την αποκατάσταση των καταστροφών που προκαλούνται από αυτές (Καραγιαννίδης, 2009).

Σχετικά με τη συνοπτική και δυναμική μελέτη περιπτώσεων «εξαιρετικής βροχόπτωσης», έχει εκπονηθεί μεγάλο πλήθος εργασιών. Οι Junker et al. (1999) ομαδοποίησαν και μελέτησαν 85 επεισόδια ισχυρών βροχοπτώσεων στις Η.Π.Α. για την θερινή περίοδο του 1993. Μία άλλη μελέτη εντόπισε την σημαντική συνεισφορά των ανοδικών κινήσεων στις ισχυρές καταιγίδες της 25ης και 26ης Ιουλίου του 1985 στην Β. Ιρλανδία (Betts, 2003). Άλλη έρευνα επιβεβαίωσε τους σημαντικούς παράγοντες εκδήλωσης καταιγίδας κατά την μελέτη του πλημμυρικού επεισοδίου στις 6 Αυγούστου του 1986 στο Μιλγουόκι των ΗΠΑ (Elsner et al., 1989). Τέτοιοι παράγοντες είναι η επαρκής ποσότητα υγρασίας, η ατμοσφαιρική αστάθεια και οι ανοδικές κινήσεις με σύγκλιση στα κατώτερα επίπεδα και απόκλιση στα ανώτερα.

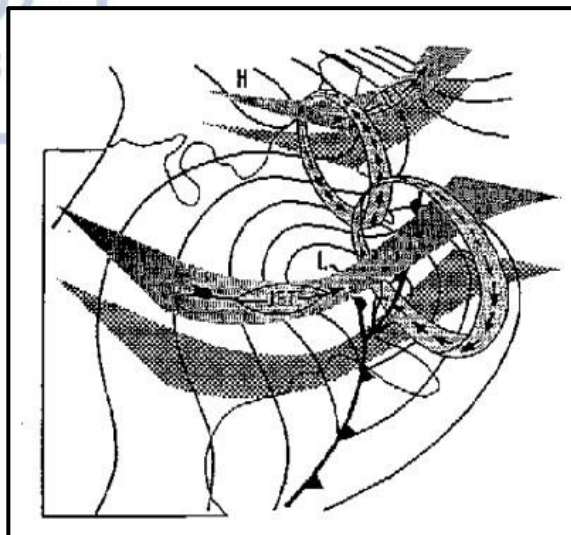
1.2 Συνοπτικές συνθήκες και δυναμική των χαμηλών στην Ελλάδα

Έχει πραγματοποιηθεί μεγάλο πλήθος εργασιών για τη σύνδεση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας με την εκδήλωση υετού στην Ελλάδα (Maheras et al., 2004; Anagnostopoulou et al., 2009; Michailidou et al., 2009). Οι Karakostas et al. (1992) και Maheras et al. (2000) έχουν προτείνει μοτίβα για την συνοπτική κυκλοφορία στην Ελλάδα που σχετίζονται με έντονα φαινόμενα. Στις περιοχές που επικρατεί οριζόντια σύγκλιση και θετική κατακόρυφη βαθμίδα σχετικού στροβιλισμού αναμένονται ανοδικές κατακόρυφες κινήσεις του αέρα (Holton, 1992; Pytharoulis et al., 2016). Η ύπαρξη αυλώνα συνδυαστικά με τη σύγκλιση στα 500 hPa προκαλούν κατακόρυφες ταχύτητες που φτάνουν έως 35 cm/sec (Doswell and Bosart, 2001).

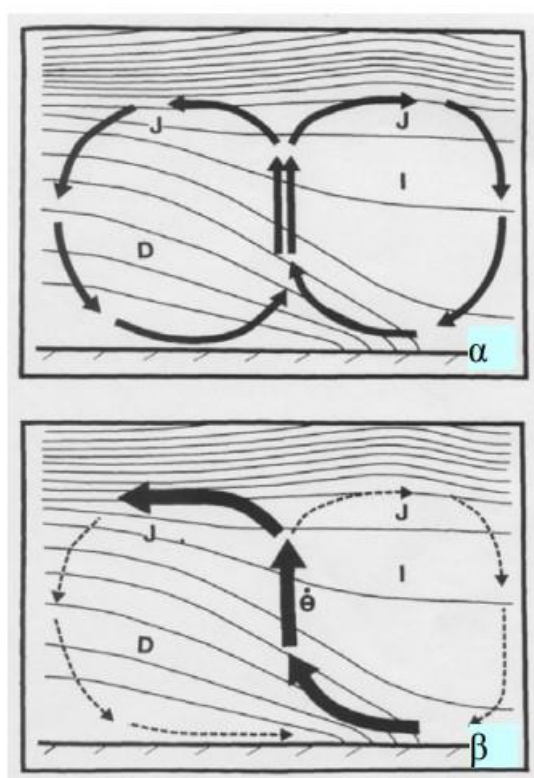
Υπάρχουν δύο διαδικασίες που μπορεί να πυροδοτήσουν την κυκλογένεση στο Ιόνιο και Αιγαίο Πέλαγος. Η πρώτη σχετίζεται με αυλώνες που περνάνε πάνω από την κεντρική Ευρώπη και καταλήγουν πάνω από τα θερμότερα ύδατα της κεντρικής και ανατολικής Μεσογείου. Η δεύτερη αφορά κυκλωνικά συστήματα από τον κόλπο της Γένοβας ή τη νότια Ιταλία, τα οποία καθώς μετατοπίζονται ανατολικά της Μεσογείου ενισχύονται από την ύπαρξη κάποιου αυλώνα (Prezerakos and Flocas, 1996).

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη χαμηλών παίζει η επίδραση του αεροχειμάρρου. Δύο αεροχειμάρροι είναι αυτοί που συμβάλλουν στον καθορισμό της συνοπτικής κατάστασης για την περιοχή της Ελλάδας, ο υποτροπικός και ο πολικός. Μία θέση των αεροχειμάρρων που ευνοεί την κυκλογένεση ονομάζεται «κλειδώμα αεροχειμάρρων» (Σχήμα 1.4). Στην είσοδο (έξοδο) του πολικού (υποτροπικού) λαμβάνει χώρα θερμικά εγκάρσια κυκλοφορία. Η κυκλοφορία των δύο αεροχειμάρρων στο σημείο τομής συντελεί στην οριζόντια απόκλιση και την απομάκρυνση μάζας από τη στήλη του χαμηλού. Με αυτό τον τρόπο παρατηρείται βάθυνση του χαμηλού και βροχοπτώσεις.

Διάφοροι επιστήμονες έχουν μελετήσει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αεροχειμάρρων για τη δημιουργία έντονων ανοδικών ρευμάτων (Hakim and Uccellini, 1992; Cox et al., 2004). Ο Μπρίκας (2006) έδειξε τη σημασία του «κλειδώματος» των δύο αεροχειμάρρων στην μετεωρολογική βόμβα του Ιανουαρίου 2004 στην Ανατολική Μεσόγειο. Έχει παρατηρηθεί πως εξαιτίας της έκλυσης λανθάνουσας θερμότητας κατά τη διαδικασία συμπίκνωσης των υδρατμών, ενισχύονται οι ανοδικές κινήσεις κατά την έξοδο του ενός αεροχειμάρρου και της εισόδου του άλλου, χωρίς αλλαγή στις καθοδικές κινήσεις. Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται μία τέτοια κατάσταση του ανοδικού κλάδου των κατακόρυφων κυκλοφοριών μεταξύ των δύο αεροχειμάρρων.



Σχήμα 1.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση «κλειδώματος» υποτροπικού και πολικού αεροχειμάρρου (Uccellini and Kocin, 1987).



Σχήμα 1.5: Εγκάρσιες κλειδωμένες κυκλοφορίες αεροχειμάρρων (α) χωρίς και (β) με διαβατική θέρμανση. Τα βέλη υποδηλώνουν την κατακόρυφη κυκλοφορία και οι γραμμές τη δυναμική θερμοκρασία (Uccellini and Kocin, 1987).

1.3 Επίδραση των επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την σημασία των επιφανειακών συνθηκών στον καιρό και το κλίμα (Pytharoulis, 2018; Stathopoulos et al., 2020). Έχειδειχθεί ότι οι αριθμητικές προσομοιώσεις ενός βαρομετρικού χαμηλού παρουσιάζουν ευαισθησία στον διαφορετικό τρόπο ορισμού των ΕΘΘ, δηλαδή αν προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα ή από δεδομένα επανανάλυσης (Yamamoto and Hirose 2007). Επίσης, οι Katsafados et al. (2011) έδειξαν ότι τα διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ είχαν επίδραση στην κατανομή του υετού στο φαινόμενο της μετεωρολογικής «βόμβας» που έπληξε το Αιγαίο Πέλαγος στις 21-22 Ιανουαρίου 2004.

Με βάση την παραπάνω παράγραφο, εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι οι επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας επηρεάζουν την ατμόσφαιρα και την ανάπτυξη των καιρικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να μελετηθεί η ευαισθησία του συστήματος «Μπάλλος» στις ΕΘΘ, δεδομένου ότι το επεισόδιο αναπτύχθηκε και εκδηλώθηκε σε περιοχές που περιβάλλονται από θάλασσα. Ο βασικότερος όμως λόγος που θα εξεταστεί η ευαισθησία σε αυτόν τον παράγοντα οφείλεται στις υψηλότερες ΕΘΘ τις ημέρες του φαινομένου.

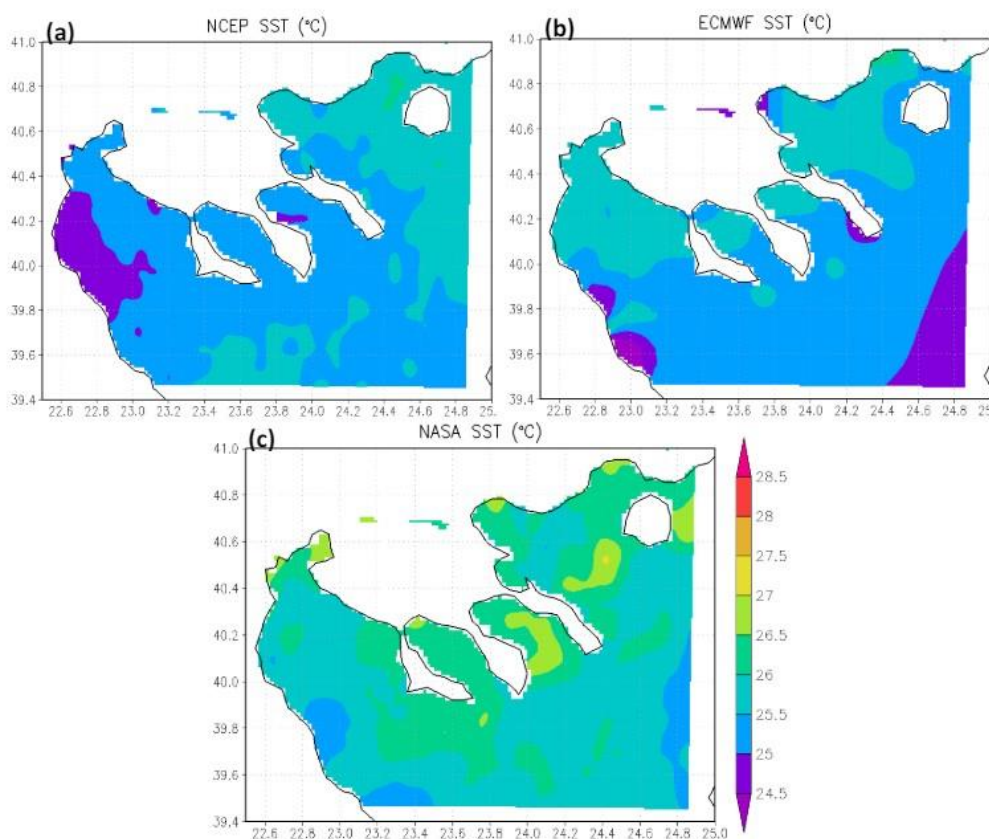
Παλαιότερες μελέτες έχουν εξετάσει την επίδραση των ΕΘΘ στην ανάπτυξη Μεσογειακών Κυκλώνων. Οι Reed et al. (2001) έδειξαν ότι οι ανωμαλίες ΕΘΘ είχαν αμελητέα επίδραση στον κυκλώνα του Ιανουαρίου 1982. Άλλη έρευνα έδειξε ότι αν οι ΕΘΘ ήταν ψυχρότερες, τότε ο κυκλώνας τον Σεπτέμβριο του 1996 θα ήταν ασθενέστερος και με καθυστερημένη ανάπτυξη (Homar et al. 2003). Επίσης, οι επιφανειακές ροές ασκούν διαφορετική επίδραση στην πορεία και στην ένταση του κάθε κυκλώνα ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αναπτύσσεται (Tous et al. 2013).

Έχει προταθεί ότι μόνο η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης (και όχι άλλες παράμετροι όπως η ένταση) είναι ευαίσθητη στις αλλαγές των ΕΘΘ σε κάποια συστήματα, όπως για παράδειγμα στην μετεωρολογική βόμβα τον Ιανουάριο του 2004 (Katsafados et al., 2011). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι επιφανειακές ροές δεν έπαιξαν σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη της μετεωρολογικής βόμβας (Lagouvardos et al., 2007). Για τον Μεσογειακό κυκλώνα που έπληξε την κεντρική Μεσόγειο στις 7/11/2014 προσομοιώθηκε ένας ασθενέστερος κυκλώνας όταν ενσωματώθηκαν ψυχρές ανωμαλίες ΕΘΘ (Pytharoulis 2018a). Οι ΕΘΘ μπορούν να επηρεάζουν την ατμόσφαιρα με διάφορους τρόπους. Η αλλαγή των ΕΘΘ μπορεί να μεταβάλλει τις ανοδικές κατακόρυφες κινήσεις, την υγρασία της ατμόσφαιρας και την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης. Αυτό είναι σημαντικό, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν διαφορετικές βάσεις δεδομένων ΕΘΘ, οι οποίες προκύπτουν με διαφορετικές τεχνικές, εξάγοντας με αυτόν τον τρόπο χρήσιμα συμπεράσματα.

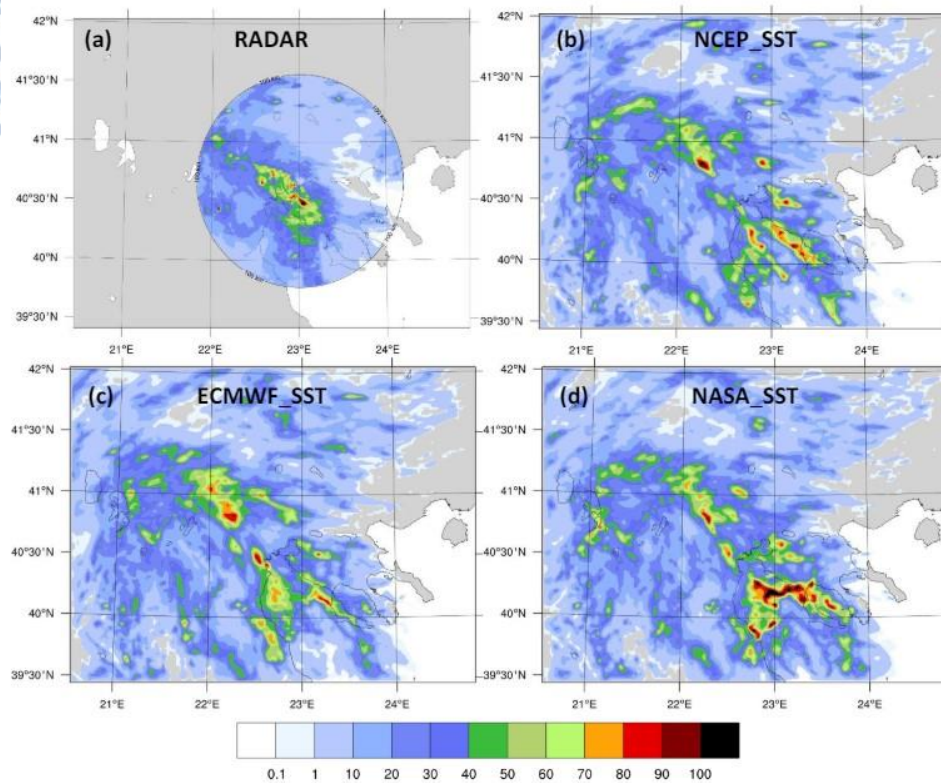
Ειδικότερα, έχουν πραγματοποιηθεί περιορισμένες μελέτες σχετικές με την επίδραση των ΕΘΘ στα χαμηλά της Μεσογείου (Miglietta et al., 2011; Pytharoulis, 2018a; Varlas et al., 2023; Δημητριάδου, 2023), ενώ ελάχιστες είναι εκείνες που αφορούν την επίδραση διαφορετικών δεδομένων ΕΘΘ στις έντονες βροχοπτώσεις (Pytharoulis, 2018b; Stathopoulos et al., 2020; Katsafados et al., 2011). Ο Pytharoulis (2018b) διερεύνησε την επίδραση διαφορετικών ΕΘΘ στην εξέλιξη του φαινομένου που επηρέασε τη βόρεια Ελλάδα στις 15/7/2014, εστιάζοντας στη βροχόπτωση και στην κεραυνική δραστηριότητα. Οι Stathopoulos et al. (2020) μελέτησαν τα αποτελέσματα που δίνουν τα μοντέλα κατά την προσομοίωση τριών μεσογειακών κυκλώνων χρησιμοποιώντας διαφορετικές πηγές ΕΘΘ. Παρόμοια ανάλυση πραγματοποιήθηκε και από τους

Katsafados et al. (2011), οι οποίοι διερεύνησαν την ευαισθησία της μετεωρολογικής βόμβας, που έλαβε χώρα στις 21-22/1/2004 στη βόρεια Ελλάδα, στις διάφορες πηγές ΕΘΘ. Τέλος, οι Miglietta et al. (2011) πραγματοποίησαν ορισμένες προσομοιώσεις του μεσογειακού κυκλώνα που έπληξε την ΝΑ Ιταλία στις 26/9/2006, αλλάζοντας συστηματικά μόνο τις ΕΘΘ (με χρήση τεχνητών ανωμαλιών) και κρατώντας ίδιες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Το επεισόδιο ισχυρής βροχόπτωσης που επηρέασε τη βόρεια Ελλάδα στις 15 Ιουλίου 2014 προσομοιώθηκε ως προς την ευαισθησία του σε διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ, τα οποία επηρέασαν τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης και της κεραυνικής δραστηριότητας (Pytharoulis, 2018b). Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι βάσεις δεδομένων ΕΘΘ του NCEP (National Centers for Environmental Predictions), του ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) και της NASA/JPL (National Aeronautics and Space Administration / Jet Propulsion Laboratory). Οι ΕΘΘ του ECMWF (NASA) ήταν θερμότερες από αυτές του NCEP κατά περίπου 1°C - 1.5°C (1.5°C - 2°C) στον Θερμαϊκό Κόλπο, όπου σημειώθηκε η εντονότερη βροχόπτωση καθώς και το μεγαλύτερο μέρος των κεραυνών (Σχήμα 1.6). Επίσης, όλα τα πειράματα προσομοίωσαν υψηλά ποσά υετού με τιμή >40 mm σε διάστημα μίας ημέρας. Ο ισχυρότερος υετός με πάνω από 100 mm σε 24 ώρες στον Θερμαϊκό Κόλπο και στη Χαλκιδική προσομοιώθηκε από τα δεδομένα της NASA, τα οποία παρουσίασαν και τις υψηλότερες ΕΘΘ (Σχήμα 1.7). Τέλος, το πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF σημείωσε καλύτερα αποτελέσματα ως προς την χωρική κατανομή του υετού σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα (Pytharoulis, 2018b).

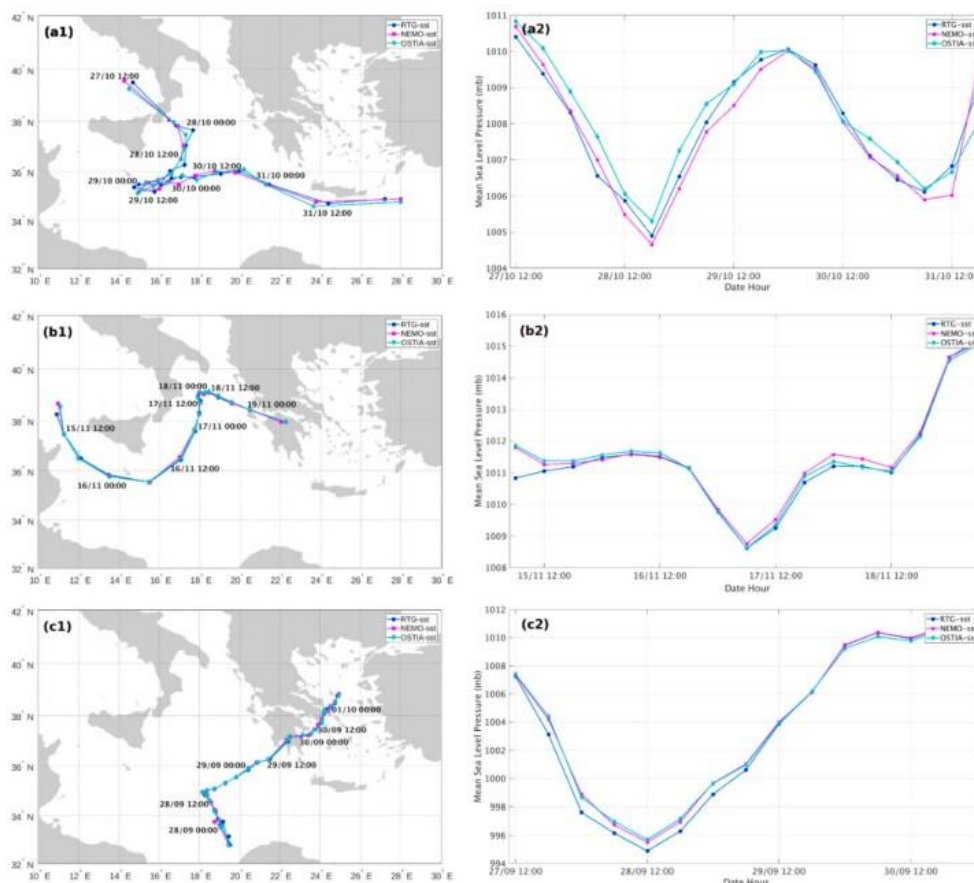


Σχήμα 1.6: Επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας (ΕΘΘ) στην περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου για τις βάσεις δεδομένων (a) NCEP, (b) ECMWF και (c) NASA από τα πειράματα του WRF με αρχικοποίηση στις 14/7/2014 12 UTC (Pytharoulis, 2018b).



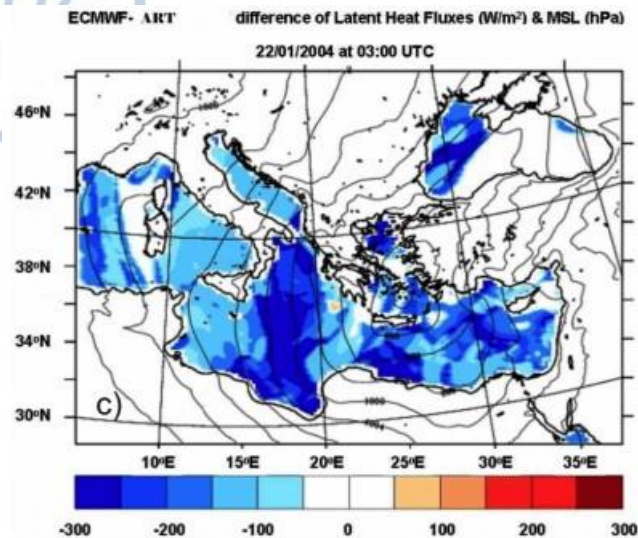
Σχήμα 1.7: Αθροιστικός υετός (mm) (a) από εκτίμηση ραντάρ και προσομοιώσεων του μοντέλου WRF-ARW των δεδομένων (b) NCEP_SST, (c) ECMWF_SST και (d) NASA_SST από τις 14/7/2014 18 UTC έως τις 15/7/2014 18 UTC (Pytharoulis, 2018b).

Στη μελέτη των Stathopoulos et al. (2020) χρησιμοποιήθηκαν οι βάσεις δεδομένων ΕΘΘ Real Time Global (RTG) του NCEP, Operational SST and Sea Ice Ocean Analysis (OSTIA) και Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO), οι οποίες έχουν ευρεία εφαρμογή. Αναλύθηκαν τρεις μεσογειακοί κυκλώνες και συγκεκριμένα οι Trixi (26/10/2016-1/11/2016), Numa (15-20/11/2017) και Zorbas (27-30/9/2018). Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου οφείλονται στις χωροχρονικές αποκλίσεις των ΕΘΘ, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις μέγιστες/ελάχιστες τιμές. Οι αποκλίσεις ΕΘΘ δεν διαφοροποίησαν ιδιαίτερα τις διαδρομές των κυκλώνων, την ένταση αλλά και την ταχύτητα του ανέμου. Αισθητές διαφορές στην επιφανειακή πίεση εμφάνισαν οι κυκλώνες Trixi και Zorbas, ενώ ο Numa δεν έδωσε διαφορετικά αποτελέσματα (Σχήμα 1.8). Τα προϊόντα RTG ήταν πιο ευαίσθητα στην εμφάνιση τροπικών χαρακτηριστικών στους κυκλώνες Trixi και Zorbas (Stathopoulos et al. 2020). Επίσης, η πηγή RTG παρουσίασε θερμότερες ΕΘΘ σε σχέση με τις πηγές OSTIA και NEMO. Οι πιο σημαντικές διαφορές βρέθηκαν στον υετό τόσο χωρικά όσο και στην ένταση των κυκλώνων. Οι θερμότερες ΕΘΘ που παρουσίασαν τα προϊόντα RTG παρείχαν μεγάλες ποσότητες υδρατμών στα κυκλωνικά συστήματα και κατ' επέκταση υψηλά ποσά υετού. Τέλος, μικρότερα ποσά υετού παρατηρήθηκαν από τις προσομοιώσεις του μοντέλου σε σχέση με τα δορυφορικά προϊόντα (Stathopoulos et al. 2020).



Σχήμα 1.8: Διαδρομές των κυκλώνων στις προσομοιώσεις RTG-sst, NEMO-sst και OSTIA-sst με βάση τις ωρες αναλύσεις MSLP (Mean Sea Level Pressure) και της εξέλιξης της MSLP για τους κυκλώνες (a1-2) Trixi, (b1-2) Numa και (c1-2) Zorba (Stathopoulos et al., 2020).

Οι Katsafados et al. (2011) μελέτησαν την μετεωρολογική «βόμβα» που έλαβε χώρα στις 21-22/1/2004 ως προς την ευαισθησία του σε διάφορα δεδομένα ΕΘΘ. Αυτό το έντονο χαμηλό αναπτύχθηκε σε θαλάσσιο περιβάλλον και επηρέασε τις παράκτιες περιοχές του Αιγαίου. Τα πειράματα που διενεργήθηκαν είχαν τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες, αλλά διαφορετικές ΕΘΘ. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά σύνολα δεδομένων ΕΘΘ και συγκεκριμένα αναλύσεις του ECMWF, δορυφορικά δεδομένα τύπου AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), δεδομένα re-analysis GOS (Gruppo di Oceanografia da Satellite), μηνιαία κλιματολογικά δεδομένα 30 ετών (1971-2000) ClimOI (Optimum Interpolation) και ομοιόμορφες τεχνητές ανωμαλίες ΕΘΘ (Artificially constructed SST) με τιμές +3 K. Τα αποτελέσματα των τεσσάρων πρώτων πηγών ΕΘΘ παρήγαγαν διαφορετικές πιέσεις στη μέση στάθμη της θάλασσας με διαφορές μεταξύ 0.1 έως 0.8 hPa (Katsafados et al., 2011). Η διαδρομή του συστήματος παρέμεινε σχεδόν ίδια και στις τέσσερις προσομοιώσεις. Το πείραμα με τα τεχνητά δεδομένα προκάλεσε ισχυρότερες ανοδικές ροές λανθάνουσας θερμότητας με διαφορές μεγαλύτερες από 300 W/m² σε σχέση με το πείραμα ECMWF και πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας κατά 1.5 hPa χαμηλότερη (Σχήμα 1.9). Χαρακτηριστικές είναι οι χωροχρονικές διαφορές στην κατανομή του υετού στα αποτελέσματα των πειραμάτων. Η στατιστική ανάλυση έδειξε υπερεκτίμηση της πίεσης και του ανέμου στα 10 m, καθώς και υποεκτίμηση του υετού σε κατώφλια μεγάλης ραγδιότητας (>8 mm/6 hr) σε όλα τα πειράματα. Τέλος, οι προσομοιώσεις των ECMWF και ClimOI σημείωσαν ελαφρώς καλύτερα σκορ σε σχέση με το πείραμα AVHRR (Katsafados et al., 2011).



Σχήμα 1.9: Διαφορές ροών λανθάνουσας θερμότητας (W/m^2) μεταξύ των προσομοιώσεων ECMWF και ART στις 22/1/2004 03 UTC και πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (ισοβαρείς ανά 4 hPa). Οι τιμές στο εύρος $\pm 50 W/m^2$ έχουν λευκή σκίαση (Katsafados et al., 2011).

Οι παραπάνω τρεις μελέτες αποτελούν μία πρώτη προσέγγιση της επίδρασης που μπορεί να έχουν τα διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ στα βαρομετρικά χαμηλά της Μεσογείου. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων στις προαναφερθείσες εργασίες, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές σε ορισμένες μετεωρολογικές μεταβλητές μεταξύ των διαφορετικών πηγών ΕΘΘ, όπως στην πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας και στον υετό. Συνεπώς, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν επιπλέον μελέτες ευαισθησίας διαφορετικών προϊόντων ΕΘΘ σε κυκλωνικά συστήματα, ώστε να εξαχθούν πιο χρήσιμα και αξιόπιστα συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία να δοθεί έμφαση στην επίδραση που μπορεί να έχουν οι διάφορες πηγές ΕΘΘ στο υπό μελέτη επεισόδιο έντονης βροχόπτωσης.

1.4 Αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης WRF-ARW

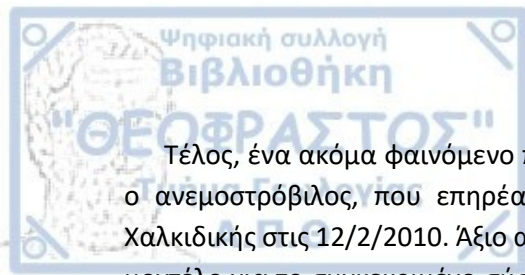
Το αριθμητικό ατμοσφαιρικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF (Weather Research and Forecasting) με τον δυναμικό πυρήνα ARW (Advanced Research WRF) που αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο της παρούσας εργασίας, είναι ένα σύγχρονο σύστημα πρόγνωσης/προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών συνθηκών (WRF-ARW version 4.3; Skamarock et al., 2021). Το WRF-ARW είναι σχεδιασμένο τόσο για ατμοσφαιρική έρευνα και ακαδημαϊκές δραστηριότητες όσο και για εφαρμογές επιχειρησιακής πρόγνωσης. Αποτελείται από δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων και ένα λογισμικό που υποστηρίζει παράλληλους υπολογισμούς (<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>).

Το μοντέλο WRF εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η προσπάθεια για την ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και δημιουργήθηκε ως μία συλλογική συνεργασία διαφόρων φορέων. Ορισμένοι από αυτούς τους φορείς είναι το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικής Έρευνας (NCAR), η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA), το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων (NCEP) και η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ. Το WRF μπορεί να παράγει προσομοιώσεις με βάση είτε πραγματικές (παρατηρήσεις και αναλύσεις) είτε εξιδανικευμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το μοντέλο αντικατοπτρίζει τις σύγχρονες εξελίξεις στη φυσική, στις αριθμητικές τεχνικές και στην αφομοίωση δεδομένων. Το WRF βρίσκεται σε επιχειρησιακή χρήση από το NCEP και άλλα εθνικά μετεωρολογικά κέντρα, καθώς και σε προσομοιώσεις πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο σε εργαστήρια, πανεπιστήμια και εταιρείες.

Ο κώδικας του μοντέλου είναι σε γλώσσα Fortran και βασίζεται σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους σε σχέση με τον χρόνο, που έχουν ως στόχο την πρόγνωση της κίνησης των αερίων μαζών λαμβάνοντας υπόψη την διατήρηση της ορμής, της μάζας και της ενέργειας. Η λειτουργία του μοντέλου WRF ξεκινάει από ένα σύστημα προ-επεξεργασίας (WPS) των δεδομένων. Στη συνέχεια, το WRF ολοκληρώνει την περιοχή ενδιαφέροντος με βάση τα δεδομένα που παράχθηκαν στο στάδιο προ-επεξεργασίας και παράγει τα αποτελέσματα. Τέλος, το μοντέλο καταλήγει σε ένα σύστημα μετ-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων (Post Processing).

Το μοντέλο WRF έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την προσομοίωση διαφόρων φαινομένων ως προς την ευαισθησία τους στις αλλαγές της τοπογραφίας, των ΕΘΘ και άλλων παραγόντων. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες βασισμένες σε πειράματα ευαισθησίας του WRF. Μία τέτοια περίπτωση αποτελεί το φαινόμενο έντονης βροχόπτωσης που επηρέασε τη βόρεια Ελλάδα και ιδιαίτερα την πόλη της Θεσσαλονίκης στις 15 Ιουλίου 2014. Τα πειράματα ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι ο υετός και η κεραυνική δραστηριότητα επηρεάστηκαν από την τοπογραφία (Pytharoulis et al., 2016).

Ένα επιπλέον καιρικό γεγονός με επιτυχή χρήση του WRF αποτελεί η προσομοίωση του Μεσογειακού κυκλώνα Qendresa. Το σύστημα αυτό επηρέασε τη Μάλτα και τη Σικελία στις 7 Νοεμβρίου 2014 με έντονες βροχοπτώσεις, μέγιστη ταχύτητα ανέμου 23.7 m/s και ελάχιστη πίεση 984 hPa (Pytharoulis, 2018). Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με θερμές και ψυχρές ανωμαλίες ΕΘΘ. Παρατηρήθηκε βάθυνση του χαμηλού κατά 9 hPa και αύξηση του χρόνου ζωής του κυκλώνα με επιβολή θερμών ανωμαλιών ΕΘΘ. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα ανέμου ξεπέρασε την πραγματική ένταση του κυκλώνα σε όλες τις προσομοιώσεις (Pytharoulis, 2018).



Τέλος, ένα ακόμα φαινόμενο που προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του μοντέλου WRF αποτελεί ο ανεμοστρόβιλος, που επηρέασε τη βόρεια Ελλάδα και συγκεκριμένα το χωριό Βράσταμα Χαλκιδικής στις 12/2/2010. Άξιο αναφοράς είναι η σωστή πρόβλεψη της ανακλαστικότητας από το μοντέλο για το συγκεκριμένο σύστημα. Συγκεκριμένα, η μέγιστη ανακλαστικότητα είχε τιμές 49.5 και 52 dBz στις 17:40 και 17:50 UTC, οι οποίες συμφωνούν με τις τιμές από τα προϊόντα radar (44-50 dBz) (Matsangouras et al., 2011).

1.5 Σκοπός και δομή της εργασίας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται ολοένα πιο έντονα καιρικά φαινόμενα τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες περιοχές του πλανήτη. Συνεπώς, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για την μελέτη τέτοιων φαινομένων, ώστε να αναδειχθούν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, που μπορεί να βοηθήσουν στη διαδικασία της πρόγνωσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό σε πρώτη φάση τη συνοπτική και δυναμική μελέτη ενός βαρομετρικού χαμηλού που επηρέασε την Ελλάδα το διάστημα από 14 έως 16 Οκτωβρίου 2021, με την ονομασία «Μπάλλος». Το συγκεκριμένο σύστημα επιλέχθηκε, επειδή προκλήθηκαν έντονες βροχοπτώσεις αλλά και πλημμύρες σε διάφορα μέρη της Ελλάδας και συγκεκριμένα στα νησιά του Ιονίου, στην Αττική και στην ανατολική Μακεδονία. Χαρακτηριστικά ποσά υετού αποτελούν τα 460 mm στην Ιθάκη, τα 182 mm στα Πατήσια και τα 297 mm στο Βατοπέδι Χαλκιδικής (<https://www.meteo.gr/>). Σε αυτό το στάδιο, γίνεται ανάλυση με δεδομένα παρατηρήσεων και πλεγματικών αναλύσεων του ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts), για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του μετεωρολογικού συστήματος. Επίσης, πραγματοποιείται δορυφορική ανάλυση με εικόνες από διάφορα κανάλια του MSG, ενώ γίνεται σύγκριση των ΕΘΘ των ημερών του φαινομένου με την κλιματολογία του Οκτωβρίου.

Στη συνέχεια, γίνεται η αριθμητική μελέτη του φαινομένου, με την υλοποίηση προσομοιώσεων του αριθμητικού ατμοσφαιρικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού Weather Research and Forecasting - Advanced Research (WRF-ARW). Σε πρώτο στάδιο, έγιναν προσομοιώσεις με διαφορετικές παραμετροποιήσεις ανωμεταφοράς, με στόχο την επιλογή της βέλτιστης διαμόρφωσης του μοντέλου, η οποία θα αναπαριστά όσο γίνεται καλύτερα τις πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στη συνέχεια, με βάση το πιο «αξιόπιστο» σχήμα ανωμεταφοράς, πραγματοποιήθηκαν και αναλύθηκαν πειράματα ευαισθησίας ΕΘΘ που προέρχονται από διαφορετικές πηγές δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του μετεωρολογικού συστήματος «Μπάλλος» μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα δεδομένα παρατηρήσεων τόσο επιφανείας όσο και ανώτερης ατμόσφαιρας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα δεδομένα μετεωρολογικών αναλύσεων που είναι οι πλεγματικές αναλύσεις του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF) καθώς και οι χάρτες του UKMET (United Kingdom METeorological office). Στην τρίτη συγκαταλέγονται τα δορυφορικά δεδομένα από τα οποία αντλούνται πληροφορίες μέσω δορυφορικών εικόνων καθώς και IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) δεδομένων GPM (Global Precipitation Measurement Mission). Τέλος, γίνεται χρήση δεδομένων επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας από διάφορες πηγές.

2.1.1 Δεδομένα παρατηρήσεων

Τα δεδομένα παρατηρήσεων περιλαμβάνουν μετρήσεις επιφανείας από επίγειους σταθμούς καθώς και παρατηρήσεις ανώτερης ατμόσφαιρας στις οποίες εντάσσονται οι ραδιοβολίσεις. Όσον αφορά τις παρατηρήσεις επιφανείας έχει αντληθεί πλήθος μετρήσεων από διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελλάδας. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY).

Ορισμένοι από τους σταθμούς της EMY που χρησιμοποιήθηκαν από τα δυτικά προς τα ανατολικά είναι η Κέρκυρα, η Κεφαλονιά, το Άκτιο, τα Ιωάννινα, η Ανδραβίδα, η Λάρισα, η Θεσσαλονίκη, η Ελευσίνα, η Αθήνα, το Τατόι, η Σούδα, η Σκύρος, η Χρυσούπολη, το Ηράκλειο, η Λήμνος, το Καστέλι, η Αλεξανδρούπολη, η Χίος, η Μυτιλήνη, η Κως, η Κάρπαθος και η Ρόδος (Σχήμα 2.1). Στην πλειονότητα των σταθμών περιλαμβάνονται επίσης και σταθμοί κρατικών αεροδρομίων (ξεκινούν με LG), ενώ τρεις αποτελούν αυτόματους σταθμούς (FLOR, ERES και LAMI) (Σχήμα 2.1). Οι συντεταγμένες των σταθμών αναγράφονται στον Πίνακα 2.1 από δυτικά προς ανατολικά. Αυτά τα δεδομένα παρατηρήσεων από τους σταθμούς της EMY διαθέτουν ένα πλήθος μετεωρολογικών μεταβλητών. Αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι η θερμοκρασία (K), η βροχόπτωση (mm), η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa), η ταχύτητα του ανέμου (m/s) και η νεφοκάλυψη (%).

Σχετικά με τις παρατηρήσεις ανώτερης ατμόσφαιρας, γίνεται χρήση των ραδιοβολίσεων, οι οποίες είναι διαθέσιμες από το πανεπιστήμιο του Wyoming στις Η.Π.Α. (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Από τις ραδιοβολίσεις αντλούνται πληροφορίες για τη θερμοκρασία και την υγρασία (μέσω της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου) σε διάφορες ισοβαρικές επιφάνειες της τροπόσφαιρας. Επίσης, είναι εφικτό να βγούνε συμπεράσματα για τις συνθήκες ευστάθειας και αστάθειας που επικρατούσαν στα διάφορα στρώματα.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση των επίγειων σταθμών στην Ελλάδα. Οι κωδικοί FLOR, ERES και LAMI δεν είναι επίσημοι κωδικοί ICAO (Πηγή: Google Earth).

Πίνακας 2.1: Ονομασίες επίγειων Ελληνικών μετεωρολογικών σταθμών, κωδικοί ICAO, Γεωγραφικό μήκος (°N) και πλάτος (°E).

A/A	ΣΤΑΘΜΟΙ	ΚΩΔΙΚΟΙ ICAO	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ
1	Κέρκυρα	LGKR	19.92	39.62
2	Κεφαλονιά	LGKF	20.5	38.12
3	Άκτιο	LGPZ	20.77	38.92
4	Ιωάννινα	LGIO	20.82	39.69
5	Καστοριά	LGKA	21.28	40.45
6	Ανδραβίδα	LGAD	21.28	37.92
7	Άραξος	LGRX	21.42	38.15
8	Φλώρινα	FLOR	21.43	40.8
9	Κοζάνη	LGKZ	21.84	40.29
10	Καλαμάτα	LGKL	22.02	37.07
11	Τρίπολη	LGTP	22.39	37.52
12	Λαμία	LAMI	22.44	38.88
13	Λάρισα	LGLR	22.46	39.65
14	Αγχίαλος	LGBL	22.79	39.22
15	Θεσσαλονίκη	LGTS	22.97	40.52
16	Τανάγρα	LGTG	23.32	38.19
17	Σέρρες	ERES	23.53	41.08
18	Ελευσίνα	LGEL	23.55	38.07
19	Αθήνα	LGAT	23.73	37.9
20	Τατόι	LGTT	23.78	38.1
21	Σούδα	LGSA	24.14	35.53
22	Σκύρος	LGSY	24.48	38.97
23	Χρυσούπολη	LGKV	24.6	40.92
24	Ηράκλειο	LGIR	25.18	35.33
25	Λήμνος	LGLM	25.23	39.92
26	Καστέλι	LGTL	25.32	35.18
27	Αλεξανδρούπολη	LGAL	25.92	40.85
28	Σητεία	LGST	26.1	35.22
29	Χίος	LGHI	26.14	38.35
30	Μυτιλήνη	LGMT	26.6	39.05
31	Κως	LGKO	27.09	36.8
32	Κάρπαθος	LGKP	27.14	35.43
33	Ρόδος	LGRP	28.09	36.4

Τα δεδομένα αναλύσεων διακρίνονται στα πλεγματικά δεδομένα από το ECMWF καθώς και στους έτοιμους χάρτες επιφανείας από το UKMET. Σχετικά με το ECMWF, αυτό αποτελεί έναν παγκόσμιο μετεωρολογικό οργανισμό, που μέλος του είναι και η Ελλάδα, και έχει σαν στόχο την αφομοίωση και επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων και την παραγωγή προγνώσεων καιρού. Οι χάρτες του UKMET προέρχονται από το Met Office που είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία του Ηνωμένου Βασιλείου.

Ο λόγος της αφομοίωσης των δεδομένων από το ECMWF είναι να καθοριστεί η καλύτερη δυνατή αναπαράσταση της ατμόσφαιρας κάνοντας χρήση τόσο των παρατηρήσεων όσο και των βραχυπρόθεσμων προγνώσεων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται συνδυάζοντας μία βραχυπρόθεσμη πρόγνωση με πρόσφατες μετρήσεις, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η ενημέρωση του μοντέλου για να δείξει την κατάσταση της ατμόσφαιρας που επικρατεί την χρονική στιγμή που γίνεται η ενημέρωση. Αυτή η διαδικασία έχει ένα σταθερό χρονικό βήμα και δίνει τις αναλύσεις των δεδομένων ανά 6 ώρες (<https://www.ecmwf.int/>).

Οι αναλύσεις αποτελούν πλεγματικά δεδομένα, τα οποία μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για αρκετές μετεωρολογικές παραμέτρους. Οι παράμετροι που είναι διαθέσιμες για την επιφάνεια και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι η θερμοκρασία (K), η θερμοκρασία σημείου δρόσου (K), οι συνιστώσες του ανέμου u και v (m/s), η πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa) και το γεωδυναμικό ύψος (gpm), ενώ για τα υπόλοιπα στρώματα της τροπόσφαιρας είναι η απόκλιση (s^{-1}), η ειδική (kg/kg) και σχετική υγρασία (%), η θερμοκρασία (K), οι συνιστώσες του ανέμου u , v (m/s) και ω (Pa/s), ο σχετικός στροβιλισμός (s^{-1}) και το γεωδυναμικό (m^2/s^2). Η περιοχή των αναλύσεων που ανακτήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία καλύπτει από χερσαίες εκτάσεις την Ευρώπη, την βόρεια Αφρική, τη Μέση Ανατολή και τμήμα της Ρωσίας, ενώ από θαλάσσιες περιοχές περιλαμβάνει τη Μεσόγειο Θάλασσα και μεγάλο μέρος του βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού (15°N-70°N, 50°W-60°E). Τα σημεία πλέγματος των δεδομένων είναι ανά 0.1° σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος.

Το Met Office δίνοντας πληροφορίες για τον καιρό και το κλίμα, βοηθάει διάφορους επιστημονικούς φορείς αλλά και κάθε πολίτη μεμονωμένα μέσω της αναζήτησης των ημερήσιων προγνώσεων (<https://www.metoffice.gov.uk/>). Οι μετεωρολογικοί χάρτες του UKMET, που ανακτήθηκαν από τη βάση δεδομένων της ιστοσελίδας <http://www.wetter3.de> απεικονίζουν διάφορα χρήσιμα στοιχεία για τον καιρό που επικρατεί σε ολόκληρη την Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, είναι χαραγμένες οι ισοβαρείς καμπύλες της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας ανά 4 hPa καθώς επίσης απεικονίζονται τα βαρομετρικά χαμηλά (L) και υψηλά (H) καθώς και η ελάχιστη και μέγιστη πίεσή τους, αντίστοιχα. Επίσης, σκιαγραφούνται και ορισμένοι αυλώνες που έχουν σχηματιστεί στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Επιπλέον, είναι δυνατό να αντληθούν πληροφορίες για την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου μέσω της αναπαράστασης των ισοβαρών καμπυλών. Ακόμα, διακρίνονται τα μέτωπα (θερμά, ψυχρά, συνεσφικμένα και στάσιμα), αλλά και η φάση της δημιουργίας ή διάλυσης των μετώπων.

2.1.3 Δορυφορικά δεδομένα

Στα δορυφορικά δεδομένα συγκαταλέγονται τόσο δορυφορικές εικόνες όσο και IMERG δεδομένα GPM (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM). Σχετικά με τα τελευταία, αυτά αποτελούν δορυφορικές εκτιμήσεις υετού μέσω της ακτινοβολίας που λαμβάνει ο δορυφόρος. Οι δορυφορικές εικόνες λήφθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα του Eumetrain ePort (<http://212.232.25.232/ng-maps/>). Αποτελούν προϊόν του δορυφόρου Meteosat 2ης γενιάς (MSG), ο οποίος παράγει πολυφασματικές εικόνες της επιφάνειας της Γης και των νεφών. Διαθέτει πολύ καλή γεωμετρική ανάλυση (1 km για το ορατό κανάλι υψηλής ευκρίνειας και 3 km για τα υπόλοιπα κανάλια) (<https://www.esa.int/>).

Τα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία διακρίνονται στα μεμονωμένα κανάλια του MSG και στους συνδυασμούς καναλιών RGB. Τα μεμονωμένα κανάλια είναι το κανάλι 2 (ορατό φάσμα, VIS0.8), το κανάλι 5 (κανάλι υδρατμών, WV6.2) και το κανάλι 9 (θερμικό υπέρυθρο και ενισχυμένο θερμικό υπέρυθρο, IR10.8). Οι συνδυασμοί καναλιών RGB που αναλύθηκαν είναι οι RGB 2-4-9 Day Microphysics, RGB (9-10, 4-9, 9) Night Microphysics και RGB (5-6, 8-9, 5) Airmass.

Από τα μεμονωμένα κανάλια χρησιμοποιήθηκε αρχικά το κανάλι 2 που αντιπροσωπεύει τη φασματική περιοχή του ορατού από τα 0.7 έως τα 0.9 μm με κέντρο τα 0.8 μm . Η πληροφορία που καταγράφεται σε αυτό το κανάλι αφορά την ανακλώμενη και σκεδαζόμενη ηλιακή ακτινοβολία από διάφορες επιφάνειες, όπως τα νέφη, το έδαφος και η θάλασσα. Τα δεδομένα που εξάγουμε αφορούν το είδος και το πάχος των νεφών, την χιονοκάλυψη και σε ορισμένες περιπτώσεις την τοπογραφία του εδάφους. Η λαμπρότητα στις VIS εικόνες εκφράζει τη λευκαύγεια της Γης. Περιοχές με μεγάλη λευκαύγεια απεικονίζονται με ανοικτές αποχρώσεις του γκρι στις δορυφορικές εικόνες, ενώ περιοχές με μικρή λευκαύγεια απεικονίζονται με σκούρες αποχρώσεις του γκρι (Φείδας, 2010). Σε αυτό το κανάλι τα νέφη παρουσιάζουν μεγάλη ανακλαστικότητα, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του νέφους και το περιεχόμενο σε νερό ή πάγο και όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος των υδροσταγόνων (π.χ. νέφη Stratocumulus). Επίσης, οι υδροσταγόνες σε ένα νέφος εμφανίζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από τους παγοκρυστάλλους (<http://eumetrain.org/>).

Επίσης, αντλήθηκαν δορυφορικές εικόνες από το κανάλι 5 που καταγράφει στην φασματική περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει η Γη και η ατμόσφαιρα από τα 5.5 έως τα 6.5 μm περίπου με κέντρο στα 6.2 μm . Σε αυτά τα μήκη κύματος οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας εκπέμπουν-ακτινοβολούν και απορροφούν πολύ έντονα την ακτινοβολία. Η μέγιστη συνεισφορά στο κανάλι 5 των υδρατμών προέρχεται από τη στάθμη των 350 hPa. Τα υψηλά ποσά υγρασίας της ανώτερης τροπόσφαιρας στις εικόνες των υδρατμών απεικονίζονται με ανοικτές-φωτεινές αποχρώσεις του γκρι, ενώ τα χαμηλά ποσά υγρασίας-υδρατμών φαίνονται με σκούρες αποχρώσεις του γκρι (Φείδας, 2010).

Το τελευταίο από τα μεμονωμένα κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν είναι το κανάλι 9 που καταγράφει τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια της Γης και η ατμόσφαιρα στην φασματική περιοχή του ατμοσφαιρικού παραθύρου από τα 10 έως τα 11.5 μm με κέντρο τα 10.8 μm . Η λαμπρότητα στις δορυφορικές εικόνες του θερμικού υπέρυθρου εκφράζει τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Η ερμηνεία των εικόνων στο συγκεκριμένο κανάλι βασίζεται στη θερμοκρασία λαμπρότητας και η διάκριση γίνεται συνεπώς ανάλογα με το αν υπάρχει μια θερμή ή ψυχρή περιοχή. Οι ψυχρές περιοχές με τις χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται με ανοικτές

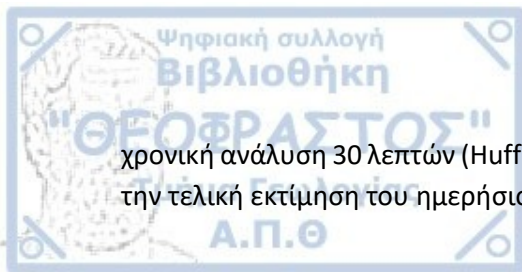
αποχρώσεις του γκρι, ενώ οι θερμές περιοχές με τις υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζονται με σκούρες αποχρώσεις του γκρι (<http://eumetrain.org/>). Για το λόγο αυτό, τα ψυχρά νέφη απεικονίζονται με λευκές αποχρώσεις και βρίσκονται υψηλά στην τροπόσφαιρα, ενώ τα θερμά νέφη απεικονίζονται με σκούρες αποχρώσεις και βρίσκονται στην κατώτερη τροπόσφαιρα (Φείδας, 2010).

Από τους συνδυασμούς καναλιών RGB χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο συνδυασμός 2-4-9 – Day Microphysics, στον οποίο αντιστοιχίζεται το κανάλι 2 (VIS0.8) με το κόκκινο χρώμα, το κανάλι 4 (MIR3.9) με το πράσινο χρώμα και το κανάλι 9 (IR10.8) με το μπλε χρώμα. Αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη διάκριση των νεφών ανάλογα με την σύστασή τους (υδροσταγόνες και παγοκρύσταλλοι) και τα μικροφυσικά τους χαρακτηριστικά καθώς και για τον εντοπισμό νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης. Επίσης, επειδή ο συνδυασμός αυτός περιέχει ένα κανάλι του ορατού φάσματος, δίνει δορυφορικές εικόνες μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Ο επόμενος συνδυασμός είναι ο RGB (9-10, 4-9, 9) – Night Microphysics, ο οποίος αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς καναλιών του υπέρυθρου φάσματος και συγκεκριμένα από δύο διαφορές καναλιών και ένα μεμονωμένο κανάλι. Πιο αναλυτικά, με το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύεται η διαφορά δύο καναλιών του θερμικού υπέρυθρου (IR10.8-IR12.0), που αποτελεί έναν καλό δείκτη του οπτικού πάχους του νέφους και είναι αποτελεσματικός στο διαχωρισμό παχίων σωρειτόμορφων νεφών από λεπτά νέφη cirrus. Με το πράσινο χρώμα αντιπροσωπεύεται η διαφορά του θερμικού υπέρυθρου από το εγγύς υπέρυθρο (IR3.9-IR10.8), η οποία χρησιμοποιείται για την μελέτη της μικροφυσικής των νεφών. Το μεμονωμένο κανάλι 9 του θερμικού υπέρυθρου εκφράζεται με το μπλε χρώμα από το οποίο μπορούν να αντληθούν δεδομένα για τη θερμοκρασία της κορυφής των νεφών (<http://eumetrain.org/>).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός RGB (5-6, 8-9, 5) – Airmass, ο οποίος περιλαμβάνει τον συνδυασμό των διαφορών δύο καναλιών και ενός μεμονωμένου καναλιού. Συγκεκριμένα, η διαφορά των δύο καναλιών των υδρατμών (WV6.2-WV7.3) αντιστοιχεί στο κόκκινο χρώμα και μας δίνει πληροφορίες για την περιεχόμενη υγρασία στα στρώματα της μέσης και ανώτερης τροπόσφαιρας. Η διαφορά των καναλιών του θερμικού υπέρυθρου (IR8.7-IR10.8) αντιστοιχεί στο πράσινο χρώμα και λαμβάνονται πληροφορίες για την συγκέντρωση του όζοντος, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τις ψυχρές (πολικές) (υψηλή συγκέντρωση όζοντος – χαμηλή τροπόπαυση) και τις θερμές (μέσα και υποτροπικά γεωγραφικά πλάτη) (χαμηλή συγκέντρωση όζοντος – υψηλή τροπόπαυση) αέριες μάζες. Το κανάλι 5 των υδρατμών (WV6.2) αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα και εξάγονται συμπεράσματα για την υγρασία και τους υδρατμούς της ανώτερης τροπόσφαιρας (Lensky and Rosenfeld 2008).

Όσον αφορά τα δορυφορικά δεδομένα IMERG, αυτά αποτελούν έναν ενιαίο αλγόριθμο των ΗΠΑ, που παρέχει προϊόντα υετού από πολλούς δορυφόρους (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Ειδικότερα, παράγονται τρία προϊόντα υετού με διαφορετικούς χρόνους δημιουργίας. Τα δύο πρώτα παρέχονται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, IMERG-Early και IMERG-Late με λανθάνων χρόνο ~4 και ~14 ώρες μετά τον χρόνο παρατήρησης, αντίστοιχα, ενώ το τρίτο IMERG-Final αποτελεί ένα ερευνητικό προϊόν που παρέχεται ~3.5 μήνες μετά τον μήνα παρατήρησης και λαμβάνει υπόψη μηνιαίες αναλύσεις βροχομέτρων (Huffman et al., 2020). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εκτίμηση της αθροιστικής βροχόπτωσης μισάωρου (Half-hourly accumulated multi-satellite precipitation estimate with gauge calibration) του Final Run με χωρική ανάλυση 0.1° x 0.1° και



χρονική ανάλυση 30 λεπτών (Huffman et al., 2023). Το αποτέλεσμα που προκύπτει αντιπροσωπεύει την τελική εκτίμηση του ημερήσιου αθροιστικού υετού.

2.1.4 Δεδομένα επιφανειακών θερμοκρασιών θάλασσας

Χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας από διαφορετικές βάσεις δεδομένων για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ευαισθησίας. Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα βασίστηκαν σε ΕΘΘ από διαφορετικές πηγές και μεθοδολογίες δημιουργίας και ειδικότερα από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης των ΗΠΑ (NCEP), το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF) και την Υπηρεσία Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του Copernicus (CMEMS). Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα Reanalysis v5 του ECMWF (ERA5) από την πλατφόρμα Climate Data Store του Copernicus.

2.1.4.1 Δεδομένα ΕΘΘ του NCEP

Οι ΕΘΘ του NCEP (National Centers for Environmental Predictions) αποτελούν ημερήσια δεδομένα υψηλής ανάλυσης, τα οποία αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία και ως RTG (Real Time Global). Τα δεδομένα αυτά βασίζονται σε έναν συνδυασμό μετρήσεων από πλοία και σημαδούρες (buoys) καθώς και δορυφορικών εκτιμήσεων για τις τελευταίες 24 ώρες, ενώ η μεθοδολογία δημιουργίας τους στηρίζεται σε μία δισδιάστατη ανάλυση μεταβλητής παρεμβολής (variational interpolation). Τέλος, η χωρική τους ανάλυση είναι $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ ($\sim 0.083^\circ \times 0.083^\circ$) (<https://polar.ncep.noaa.gov/sst/ophi/>).

2.1.4.2 Δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF

Τα δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) παράγονται από μετρήσεις δορυφόρων (δορυφόροι εκτιμούν τη θερμοκρασία θάλασσας σε ένα στρώμα πάχους λίγων μm), buoys (σημαδούρες υπολογίζουν τις ΕΘΘ σε βάθος 0.2-1.5 m) και πλοίων. Πρόκειται για 6-ωρες αναλύσεις με χωρική διακριτοποίηση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Ορισμένες φορές οι ΕΘΘ αυτής της πηγής προκύπτουν από πρόγνωση που γίνεται με τη σύζευξη του ωκεάνιου μοντέλου NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean) με το σύστημα πρόγνωσης του ECMWF (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/>).

2.1.4.3 Δεδομένα ΕΘΘ του CMEMS

Τα ημερήσια δεδομένα ΕΘΘ του CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) προκύπτουν από επί τόπου (in-situ) μετρήσεις και δορυφορικά δεδομένα. Αναφέρονται και με την ονομασία OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis). Αποτελούν δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης με οριζόντια χωρική διακριτοποίηση $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Η μεθοδολογία δημιουργία τους βασίζεται σε αφομοίωση (assimilation) δορυφορικών δεδομένων και ενός μοντέλου cool skin (<https://data.marine.copernicus.eu/product/>).

2.1.4.4 Δεδομένα reanalysis v5 του ECMWF (ERA5)

Τα δεδομένα ERA5 αποτελούν ωριαία δεδομένα αναδρομικών αναλύσεων με χωρική διακριτοποίηση $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Προέρχονται από τη βάση δεδομένων OSTIA. Δεν επηρεάζονται από τον ημερήσιο κύκλο του Ήλιου (<https://cds.climate.copernicus.eu/>).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τη συνοπτική, δυναμική μελέτη του συστήματος «Μπάλλος» καθώς και την αριθμητική μελέτη της επίδρασης των ΕΘΘ στην ανάπτυξή του. Θα αναλυθεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την συνοπτική και δυναμική ανάλυση του φαινομένου όσο και για τα αριθμητικά πειράματα των ΕΘΘ που πραγματοποιήθηκαν.

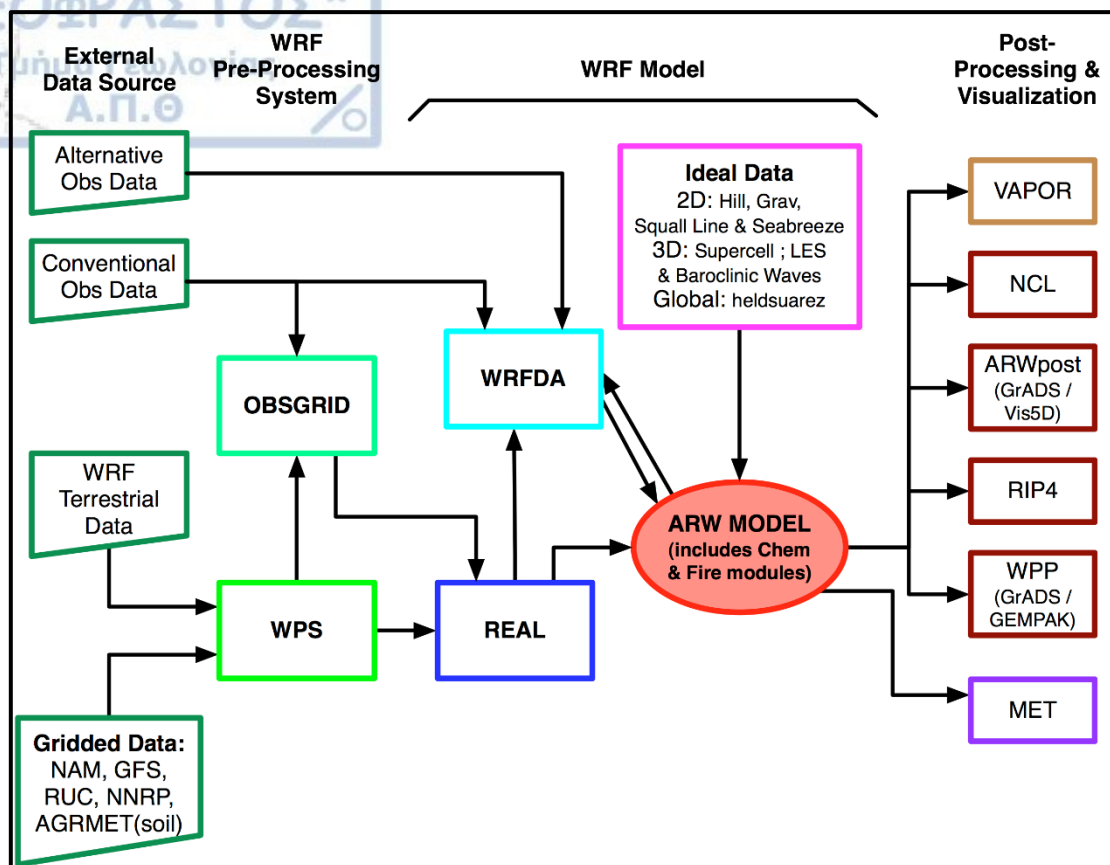
2.2.1 Αριθμητικό μοντέλο WRF-ARW

Για την αριθμητική μελέτη του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο προηγμένης έρευνας WRF-ARW, με το οποίο πραγματοποιήθηκαν πειράματα ευαισθησίας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί διάφορα δεδομένα εισόδου (input). Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητο να περάσουν από το σύστημα προ-επεξεργασίας WPS (WRF Preprocessing System), το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα που υπάρχουν στα αρχεία GRIB σε μορφή που να είναι αντιληπτή από το μοντέλο (Σχήμα 5.1). Το ενδιαμέσο αυτό στάδιο παρέχει δεδομένα στο μοντέλο που είναι καλά προσαρμοσμένα τόσο στο κατακόρυφο όσο και στο οριζόντιο επίπεδο.

Το WPS είναι ουσιαστικά το τμήμα που γίνεται η επιλογή της περιοχής ολοκλήρωσης (domain) και η ενσωμάτωση των δεδομένων εισόδου, όπως για παράδειγμα δεδομένα ERA5 και ECMWF. Επίσης, εκτελείται η αποκωδικοποίηση των δεδομένων εισόδου (ungrib), δηλαδή ο μετασχηματισμός από τη μορφή που είναι τα δεδομένα, στη μορφή που μπορούν να επεξεργαστούν από το μοντέλο, ενώ πραγματοποιείται και η οριζόντια παρεμβολή (horizontal interpolation). Ειδικότερα, με το πρόγραμμα geogrid δημιουργείται η γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος (έκταση, φυσιογραφικά δεδομένα κλπ.), με το ungrib γίνεται η τροποποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων σε κατάλληλο format και με το metgrid λαμβάνει χώρα η οριζόντια παρεμβολή στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, γίνεται η κατακόρυφη παρεμβολή (vertical interpolation) των δεδομένων σε υβριδικές σίγμα συντεταγμένες, οι οποίες ακολουθούν την τοπογραφία. Τέλος, πραγματοποιείται η εκτέλεση του μοντέλου με τη χρήση των επιλεγμένων φυσικών παραμετροποιήσεων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το WRF τρέχει παράλληλα, δηλαδή σε πολλούς διαφορετικούς πυρήνες. Για ένα παράλληλο πρόγραμμα είναι απαραίτητο ένα λογισμικό διεπαφής ανταλλαγής μηνυμάτων (MPI – Message Passing Interface), το οποίο βοηθάει στην μετάδοση πληροφοριών από τον έναν πυρήνα στον άλλον. Με τον τρόπο αυτό, οι διάφοροι πυρήνες ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους και εξοικονομείται χρόνος. Εφόσον έχει τρέξει το μοντέλο, βγαίνουν τα αποτελέσματα σε format που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής. Οπότε, χρειάζεται ένα σύστημα μετ-επεξεργασίας αλλά και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου (Post Processing and Visualization). Για τον σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα λογισμικά ARWpost (μορφή που διαβάζει το GrADS), NCL και RIP (Σχήμα 2.2).

Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά GrADS (Grid Analysis and Display System) και NCL (NCAR Command Language). Το GrADS αποτελεί ένα λογισμικό για την ανάλυση και οπτικοποίηση μετεωρολογικών/κλιματικών δεδομένων με σχετικά εύκολα χρήση και διατίθεται δωρεάν, ενώ μπορεί να επεξεργαστεί αρχεία GRIB και NetCDF. Το NCL αποτελεί μία γλώσσα προγραμματισμού, η οποία δημιουργήθηκε με σκοπό την επεξεργασία και οπτικοποίηση γεωγραφικών δεδομένων και είναι επίσης συμβατή σε αρχεία GRIB και NetCDF.



Σχήμα 2.2: Δομή του συστήματος WRF (<https://www2.mmm.ucar.edu/>).

2.2.2 Περιγραφή των σχημάτων ανωμεταφοράς

2.2.2.1 Σχήμα Kain-Fritsch

Το σχήμα Kain-Fritsch βασίστηκε στην ιδέα ότι η κατακόρυφη μεταφορά μειώνει την διαθέσιμη δυνητική ενέργεια ανωμεταφοράς (CAPE) στην κλίμακα των νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Fritsch and Chappell, 1980). Αργότερα έγινε βελτίωση του σχήματος από τον Kain, ώστε να είναι αποδοτικό σε διάφορους τύπους καιρού (Kain, 2004). Η ροή μάζας καθορίζεται από την CAPE (Convective Available Potential Energy) στη βάση του νέφους και αφαιρείται με την μορφή υετού λόγω των ανοδικών κινήσεων. Στο συγκεκριμένο σχήμα, χρησιμοποιείται μια απλή παραμετροποίηση νέφους με ανοδικές και καθοδικές κινήσεις. Οι κινήσεις αυτές περιλαμβάνουν και την εισχώρηση (entrainment) ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο νέφος, την διάχυση του αέρα στο περιβάλλον καθώς και τη μικροφυσική. Κατά την ενεργοποίηση του σχήματος, τα ανοδικά ρεύματα καθορίζονται από την CAPE. Τα καθοδικά ρεύματα ξεκινούν περίπου 150-200 hPa πάνω από τη βάση του νέφους και ενισχύονται μέσω της εξάτμισης. Η ενεργοποίηση του σχήματος Kain-Fritsch γίνεται με βάση την ανοδική κίνηση ενός δείγματος αέρα από το ανυψούμενο επίπεδο συμπύκνωσης (LCL) στο επίπεδο ελεύθερης ανωμεταφοράς (LFC).

2.2.2.2 Σχήμα Grell-Freitas

Το σχήμα των Grell-Freitas έχει σαν βάση την προσέγγιση που αναφέρεται στην παραμετροποίηση των κατακόρυφων κινήσεων (Grell & Devenyi, 2002). Σε κάθε σημείο του πλέγματος υπάρχει ένα μόνο νέφος, στο οποίο η εισροή του αέρα ξεκινά από την βάση του και η εκροή γίνεται από την κορυφή του. Η δυναμική κατάσταση του σχήματος περιλαμβάνει μια στήλη αέρα, στην οποία λαμβάνει χώρα έντονη ανοδική μεταφορά, ενώ μέσα σε αυτή υπολογίζονται διάφορες μεταβλητές σε οριζόντια κλίμακα όπως για παράδειγμα η υγρασία και η μεταφορά από στροβίλους (Fowler et al., 2016). Το σχήμα ενεργοποιείται όταν η CAPE παίρνει θετικές τιμές πάνω από το πλέγμα, ενώ λαμβάνεται υπόψη η συμπύκνωση των αερολυμάτων. Οι αλληλεπιδράσεις με αερολύματα γίνονται μέσω μιας αυτόματης μετατροπής του νέφους σε βροχή από πυρήνες συμπύκνωσης των νεφών (CNN) (Grell and Freitas, 2014).

2.2.3 Στατιστική Ανάλυση

Για τη σύγκριση και την αξιολόγηση των πειραμάτων μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκαν ορισμένες στατιστικές παράμετροι. Οι μεταβλητές πάνω στις οποίες βασίστηκε η στατιστική ανάλυση διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις συνεχείς και τις διακριτές μεταβλητές. Ως συνεχείς μεταβλητές ορίζονται εκείνες στις οποίες οι τιμές δεν εμφανίζουν κενά π.χ. θερμοκρασία, υγρασία και πίεση, ενώ ως διακριτές ορίζονται εκείνες που παίρνουν αριθμητικές τιμές με ορισμένες πιθανές ενδιάμεσες διακοπές π.χ. υετός (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Συνεχείς και διακριτές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική ανάλυση.

ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ
Θερμοκρασία αέρα στα 2m	Αθροιστικός Υετός
Θερμοκρασία σημείου δρόσου στα 2m	
Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας	
Σχετική υγρασία στα 2m	
Ταχύτητα ανέμου στα 10m	

Οι στατιστικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για τις συνεχείς μεταβλητές είναι το μέσο σφάλμα (mean error), το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error) και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (correlation coefficient). Για τις διακριτές μεταβλητές δημιουργείται αρχικά ένας πίνακας συνάφειας και με βάση αυτόν υπολογίζονται τα στατιστικά μεγέθη. Τα μεγέθη που βρέθηκαν είναι η ακρίβεια (accuracy), η πιθανότητα ανίχνευσης (POD, Probability of Detection), ο λόγος ψευδών προγνώσεων (FAR, False Alarm Ratio), η πιθανότητα ψευδών προγνώσεων (POFD, Probability of False Detection), το ποσοστό επιτυχιών (SR, Success Ratio) και ο δείκτης επιτυχίας του Gilbert (ETS, Equitable Threat Score).

2.2.3.1 Συνεχείς μεταβλητές

Η επαλήθευση των προγνώσεων για τις συνεχείς μεταβλητές έγκειται στο κατά πόσο οι τιμές των προγνώσεων διαφέρουν από αυτές των παρατηρήσεων. Στον Πίνακα 2.3 αποτυπώνεται το τυπολόγιο για κάθε στατιστική παράμετρο. Το N συμβολίζει τον αριθμό των παρατηρήσεων, το F_i τις τιμές της μεταβλητής για τα αποτελέσματα του μοντέλου, το O_i τις τιμές των πραγματικών δεδομένων, το $\bar{F}$ τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων του μοντέλου και το $\bar{O}$ τη μέση τιμή των πραγματικών δεδομένων.

Πίνακας 2.3: Τύποι για τις στατιστικές παραμέτρους των συνεχών μεταβλητών.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΥΠΟΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΚΟΡ	ΕΥΡΟΣ
Μέσο σφάλμα (ME)	$(1/N) \sum (F_i - O_i)$	0	$(-\infty, +\infty)$
Μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE)	$(1/N) \sum F_i - O_i $	0	$[0, +\infty)$
Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)	$\sqrt{(1/N) \sum (F_i - O_i)^2}$	0	$[0, +\infty)$
Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (r)	$\frac{\sum (F - \bar{F})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}}$	1	$[-1, +1]$

2.2.3.2 Διακριτές μεταβλητές

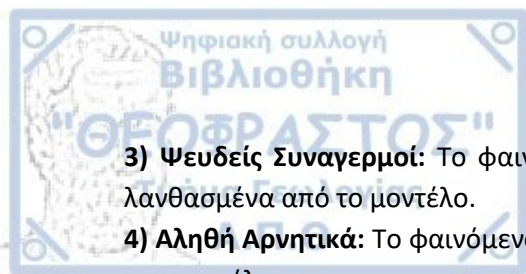
Στις διακριτές μεταβλητές ανήκει ο υετός. Στην περίπτωση του υετού χρησιμοποιούνται δυαδικές-διχοτομικές προγνώσεις, στις οποίες καθορίζεται ένα όριο που διαχωρίζει το «ναι» και το «όχι», όπως για παράδειγμα, βροχόπτωση μεγαλύτερη από 5 mm. Για να επαληθευτούν οι προγνώσεις στις διακριτές μεταβλητές δημιουργείται ένας πίνακας συνάφειας, που δείχνει τη συχνότητα των προγνώσεων και των παρατηρήσεων (πραγματικών δεδομένων) με «ναι» και «όχι».

Πίνακας 2.4: Πίνακας Συνάφειας διακριτών μεταβλητών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ (ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ)		
		ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΣΥΝΟΛΟ
ΜΟΝΤΕΛΟ WRF	ΝΑΙ	ΕΥΣΤΟΧΙΕΣ	ΨΕΥΔΕΙΣ ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΙ	ΝΑΙ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
	ΟΧΙ	ΑΣΤΟΧΙΕΣ	ΑΛΗΘΗ ΑΡΝΗΤΙΚΑ	ΟΧΙ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
	ΣΥΝΟΛΟ	ΝΑΙ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΟΧΙ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΣΥΝΟΛΟ

Οι τέσσερις συνδυασμοί προγνώσεων («ναι» ή «όχι») και πραγματικών δεδομένων («ναι» ή «όχι») που μπορεί να προκύψουν είναι (Πίνακας 2.4):

- 1) Ευστοχίες:** Το φαινόμενο εμφανίζεται τόσο στις παρατηρήσεις όσο και στο μοντέλο.
- 2) Αστοχίες:** Το φαινόμενο εμφανίζεται στις παρατηρήσεις, αλλά όχι στις προγνώσεις του μοντέλου.



3) Ψευδείς Συναγερμοί: Το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στις παρατηρήσεις, αλλά προβλέπεται λανθασμένα από το μοντέλο.

4) Αληθή Αρνητικά: Το φαινόμενο δεν εμφανίζεται ούτε στις παρατηρήσεις ούτε στις προγνώσεις του μοντέλου.

Ο πίνακας συνάφειας αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό των σφαλμάτων στις διακριτές μεταβλητές. Ένα τέλειο σύστημα πρόγνωσης θα παράγει μόνο ευστοχίες και αληθή αρνητικά (πράσινη σκίαση) και όχι αστοχίες ή ψευδείς συναγερμούς (κίτρινη σκίαση) (Πίνακας 2.4). Ένας μεγάλος αριθμός στατιστικών υπολογίζεται από τα στοιχεία του πίνακα συνάφειας για την περιγραφή της απόδοσης των προγνώσεων του μοντέλου. Στον Πίνακα 2.5 αποτυπώνεται το τυπολόγιο για κάθε στατιστική παράμετρο. Η ακρίβεια δείχνει τι ποσοστό των προγνώσεων ήταν σωστές. Η πιθανότητα ανίχνευσης (POD) αφορά το κλάσμα των παρατηρούμενων γεγονότων «ναι» που είχαν προβλεφθεί σωστά. Ο λόγος ψευδών προγνώσεων (FAR) απαντά τι ποσοστό των προγνωστικών συμβάντων «ναι» του μοντέλου δεν συνέβησαν στην πραγματικότητα. Η πιθανότητα ψευδών προγνώσεων (POFD) δείχνει τι ποσοστό των παρατηρούμενων γεγονότων «όχι» προβλέφθηκαν λανθασμένα ως «ναι» από το μοντέλο. Το ποσοστό επιτυχιών (SR) υποδεικνύει το ποσοστό των προγνωστικών γεγονότων «ναι» που παρατηρήθηκαν πραγματικά. Τέλος, ο δείκτης επιτυχίας του Gilbert απαντά στο πόσο καλά αντιστοιχούν τα προβλεπόμενα συμβάντα «ναι» με τα παρατηρούμενα συμβάντα «ναι» (υπολογίζοντας την πιθανότητα τυχαίας σωστής πρόγνωσης).

Πίνακας 2.5: Τύποι για τις στατιστικές παραμέτρους των διακριτών μεταβλητών.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΥΠΟΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΚΟΡ	ΕΥΡΟΣ
Ακρίβεια (Accuracy)	$\frac{\text{Ευστοχίες} + \text{Αληθή Αρνητικά}}{\text{Σύνολο}}$	1	[0,1]
Πιθανότητα Ανίχνευσης Probability of Detection (POD)	$\frac{\text{Ευστοχίες}}{\text{Ευστοχίες} + \text{Αστοχίες}}$	1	[0,1]
Λόγος Ψευδών Προγνώσεων False Alarm Ratio (FAR)	$\frac{\text{Ψευδείς Συναγερμοί}}{\text{Ευστοχίες} + \text{Ψευδείς Συναγερμοί}}$	0	[0,1]
Πιθανότητα Ψευδών Προγνώσεων Probability of False Detection (POFD)	$\frac{\text{Ψευδείς Συναγερμοί}}{\text{Αληθή Αρνητικά} + \text{Ψευδείς Συναγερμοί}}$	0	[0,1]
Ποσοστό επιτυχιών Success Ratio (SR)	$\frac{\text{Ευστοχίες}}{\text{Ευστοχίες} + \text{Ψευδείς Συναγερμοί}}$	1	[0,1]
(Ευστοχίες) _{τυχαία}	$\frac{(\text{Ευστοχίες} + \text{Αστοχίες}) \times (\text{Ευστοχίες} + \text{Ψευδείς Συναγερμοί})}{\text{Σύνολο}}$	-	-
Δείκτης επιτυχίας του Gilbert Equitable Skill Score (ETS)	$\frac{\text{Ευστοχίες} - (\text{Ευστοχίες})_{\text{τυχαία}}}{\text{Ευστοχίες} + \text{Αστοχίες} + \text{Ψευδείς Συναγερμοί} - (\text{Ευστοχίες})_{\text{τυχαία}}}$	1	[-1/3, 1]

2.2.3.3 Επιλογή βέλτιστου πειράματος για τις συνεχείς μεταβλητές

Για την επιλογή του «καλύτερου» πειράματος στις συνεχείς μεταβλητές, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος $1-(\text{exp}/\text{control})$. Αρχικά, ορίζεται μια προσομοίωση σαν πείραμα ελέγχου/αναφοράς (control) και στη συνέχεια το σφάλμα του κάθε πειράματος (exp) συγκρίνεται με αυτό του πειράματος ελέγχου με βάση τον παραπάνω τύπο. Οι τιμές του παραπάνω τύπου για το πείραμα ελέγχου είναι 0. Για τα υπόλοιπα πειράματα, οι θετικές τιμές υποδεικνύουν πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα, ενώ οι αρνητικές πιο αναξιόπιστο αποτέλεσμα σε σχέση με το πείραμα ελέγχου. Τέλος, υπολογίζεται το άθροισμα των τιμών του παραπάνω τύπου για τις στατιστικές παραμέτρους/σφάλματα MAE & RMSE, για όλες τις μεταβλητές κάθε πειράματος και το μεγαλύτερο σκορ αναδεικνύει και το βέλτιστο πείραμα.

2.2.3.4 Επιλογή βέλτιστου πειράματος για τις διακριτές μεταβλητές

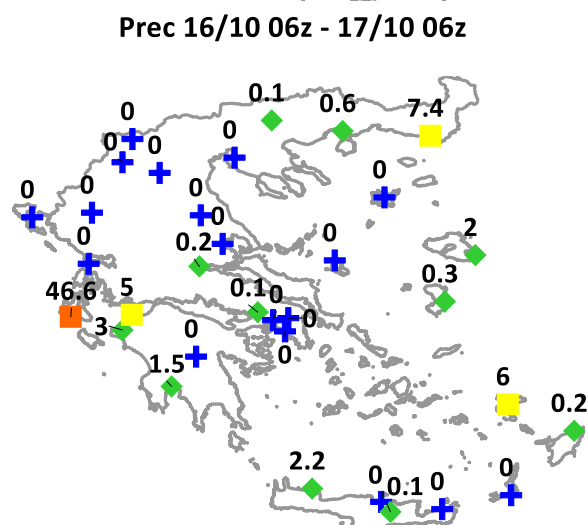
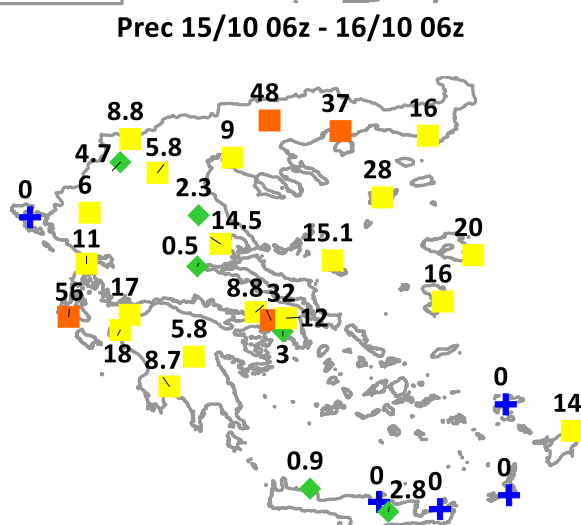
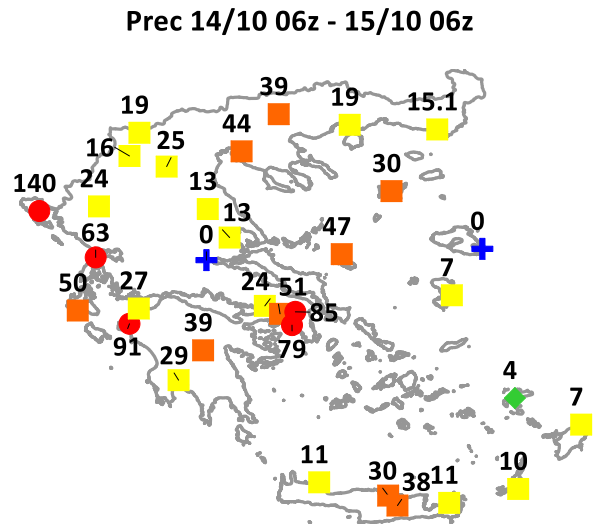
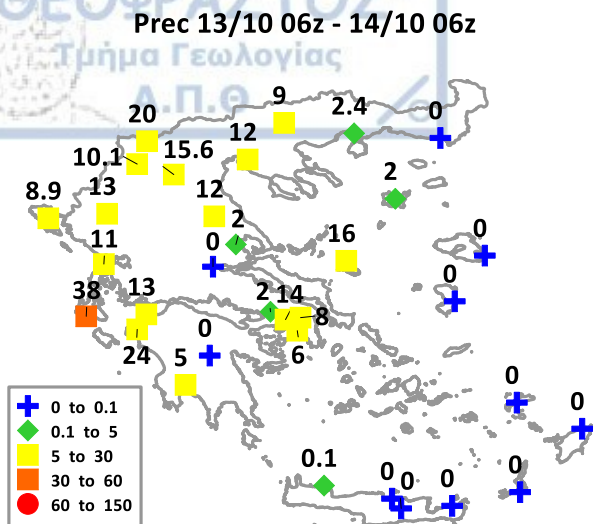
Για την ανάδειξη του βέλτιστου πειράματος στις διακριτές μεταβλητές, γίνεται μία κανονικοποίηση χρησιμοποιώντας τις τιμές των στατιστικών σκορ στον τύπο $(\text{exp}-\text{min})/(\text{max}-\text{min})$. Για την κάθε στατιστική παράμετρο κάθε κατώφλιου υετού, στο exp μπαίνει το σκορ του κάθε πειράματος, ενώ υπολογίζεται η ελάχιστη (min) και η μέγιστη (max) τιμή της στατιστικής παραμέτρου στο συγκεκριμένο κατώφλι για το σύνολο των πειραμάτων. Με βάση τον παραπάνω τύπο, για την κάθε στατιστική παράμετρο και σε κάθε κατώφλι, ένα τουλάχιστον πείραμα παίρνει τιμή 1, ένα τουλάχιστον άλλο λαμβάνει τιμή 0 και τα υπόλοιπα έχουν ενδιάμεσες τιμές. Αν σε κάποια στατιστική παράμετρο και σε κάποιο κατώφλι όλα τα πειράματα έχουν το ίδιο σκορ, τότε αυτός ο συνδυασμός παραμέτρου – κατώφλιου δεν λαμβάνεται υπόψη. Στη συνέχεια, ανάλογα με το αν η στατιστική παράμετρος έχει βέλτιστο σκορ 1 ή 0, προστίθεται ή αφαιρείται, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι accuracy, POD, SR και ETS έχουν θετικό πρόσημο (προστίθενται), ενώ το FAR και το POFD αρνητικό πρόσημο (αφαιρούνται). Τέλος, επειδή χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά κατώφλια υετού για τον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων, υπολογίζεται το άθροισμα του συνόλου των στατιστικών παραμέτρων που έχει υπολογιστεί για το κάθε κατώφλι. Η μεγαλύτερη τιμή υποδεικνύει και το πιο αξιόπιστο πείραμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 Ανάλυση του υετού

3.1.1 Δεδομένα παρατηρήσεων

Τα δεδομένα παρατηρήσεων αποτελούν προϊόν επίγειων μετρήσεων από διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς. Χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά Ελληνικοί σταθμοί, καθώς τα κύρια φαινόμενα εντοπίστηκαν στην Ελληνική επικράτεια. Κατασκευάστηκαν ημερήσιοι χάρτες βροχόπτωσης για την απεικόνιση του υετού με κατηγοριοποίηση σε κλάσεις. Το διάστημα από 13/10 06 UTC έως 14/10 06 UTC παρατηρείται ισχυρή βροχόπτωση τοπικά στο Ιόνιο, μέτρια βροχόπτωση σε ολόκληρο τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας και στις Σποράδες, ενώ στο μεγαλύτερο τμήμα του Αιγαίου Πελάγους δεν παρατηρήθηκε υετός. Την επόμενη ημέρα είναι χαρακτηριστικές οι πολύ έντονες βροχοπτώσεις που έπληξαν τα νησιά του Ιονίου Πελάγους, την Κεντρική Μακεδονία, τις Σποράδες και την Κρήτη με αξιοσημείωτη τιμή τα 140 mm στην Κέρκυρα. Τα φαινόμενα σταδιακά μετατοπίστηκαν προς την ανατολική Ελλάδα και τα νησιά του ΒΑ Αιγαίου στις 15/10 και 16/10, ενώ φαίνεται ότι έχουν υποχωρήσει πλήρως από τις υπόλοιπες περιοχές με εξαίρεση την Κεφαλονιά (Σχήμα 3.1). Παρατηρώντας τους χάρτες διαπιστώνεται εύκολα η κίνηση του συστήματος από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα χρονικά διαστήματα που έγινε η αθροιστική βροχόπτωση ξεκινούν από τις 06 UTC κάθε ημέρας και όχι από τις 00 UTC, επειδή έλειπαν ορισμένες μετρήσεις από κάποιους σταθμούς, όπως για παράδειγμα από τον σταθμό της Κεφαλονιάς.

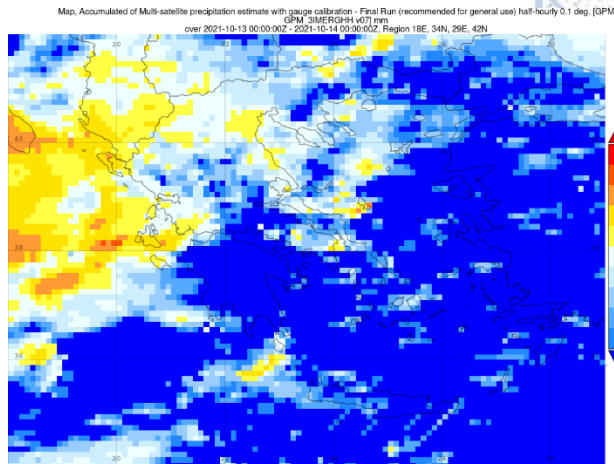


Σχήμα 3.1: Χάρτες που απεικονίζουν τα ημερήσια ποσά υετού για το διάστημα 13/10 06 UTC έως 17/10 06 UTC. Κάθε σύμβολο αντιστοιχεί στο εύρος τιμών υετού [ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή].

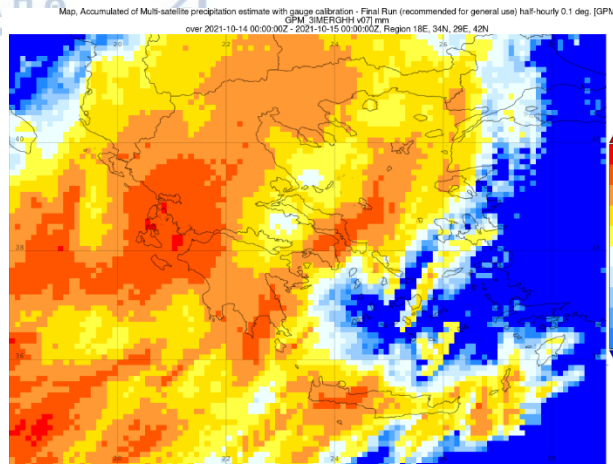
3.1.2 Δορυφορικά δεδομένα υετού IMERG

Χρησιμοποιήθηκαν IMERG δορυφορικά δεδομένα του GPM, τα οποία εκτιμούν τον υετό με βάση την ακτινοβολία που λαμβάνουν οι δορυφόροι από τα νέφη. Στα προϊόντα Final Run, υπάρχουν βαθμονομημένες (IMERGcal) και μη βαθμονομημένες (IMERGuncal) εκτιμήσεις βροχομέτρων (Kazamias et al., 2022). Οι χάρτες που απεικονίζονται παρακάτω βασίζονται σε δεδομένα Final Run IMERGcal. Η σημασία της βαθμονόμησης βροχομέτρων στις δορυφορικές εκτιμήσεις υετού έχει τονιστεί σε αρκετές μελέτες (Sungmin et al., 2017; Sharifi et al., 2018). Με βάση την αξιολόγηση που έγινε στα δεδομένα IMERG-Final για μία περίοδο 5 ετών (Ιανουάριος 2015 έως Δεκέμβριος 2019) στην Ελλάδα, διαπιστώθηκε ότι τα IMERGcal υποεκτιμούν την βροχόπτωση σε περιοχές της δυτικής, ανατολικής και νότιας χώρας, ενώ την υπερεκτιμούν στη βόρεια Ελλάδα, στα νησιά του Αιγαίου και Ιονίου Πελάγους καθώς και σε παράκτιες περιοχές. Τέλος, οι περιοχές με την καλύτερη συνολική απόδοση των εκτιμήσεων IMERGcal αποτελούν η βόρεια Ελλάδα και η Πελοπόννησος (Kazamias et al., 2022).

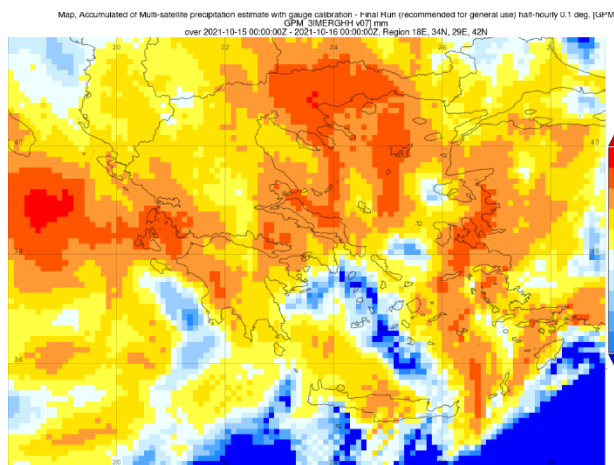
Η αθροιστική βροχόπτωση στις 13/10 σύμφωνα με την εκτίμηση των δορυφορικών δεδομένων IMERG δίνει τα πρώτα φαινόμενα σε περιοχές του Ιονίου Πελάγους, στη δυτική Στερεά, στη ΒΔ Ελλάδα και σε τοπικά σημεία του βόρειου Αιγαίου με υετό πάνω από 5 mm (κίτρινη σκίαση). Η αθροιστική βροχόπτωση στις 14/10 έδειξε μεγάλα ποσά υετού σε τοπικά σημεία των Ιόνιων Νήσων με τιμές άνω των 94 mm σε θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές (κόκκινη σκίαση), ενώ στη δυτική ηπειρωτική Ελλάδα, στη νότια Πελοπόννησο, στην Αττική, στη νότια Εύβοια, στην Κρήτη και στη Σκύρο εκτιμήθηκε βροχόπτωση μεγαλύτερη από 44 mm (πορτοκαλί σκίαση) (Σχήμα 3.2). Στις 15/10 οι έντονες βροχοπτώσεις παρατηρούνται κυρίως στην Κεντρική-Ανατολική Μακεδονία, στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου και στις Σποράδες, ενώ σχετικά έντονα παρέμειναν τα φαινόμενα και στις περιοχές που επλήγησαν περισσότερο στις 14/10. Στις 16/10 είναι εμφανής η υποχώρηση των φαινομένων και οι μόνες βροχές περιορίζονται σε τοπικά σημεία του Ιονίου Πελάγους, της ΝΔ Στερεάς Ελλάδας, της Θράκης και των νησιών του ΒΑ Αιγαίου. Συνολικά για το διάστημα από τις 13/10 έως τις 16/10 τα μεγαλύτερα ποσά βροχοπτώσεων σημειώθηκαν στην Κεφαλονιά, στην Λευκάδα, στη ΝΔ Στερεά Ελλάδα, στη δυτική και νότια Πελοπόννησο, στην Αττική, στην Εύβοια, στην Κεντρική Μακεδονία και στις Σποράδες (Σχήμα 3.2).



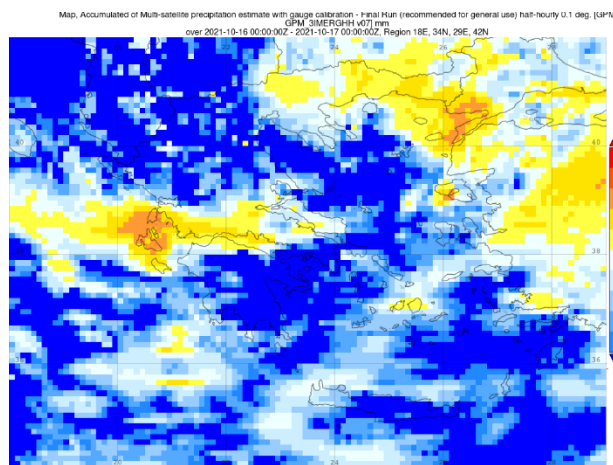
13/10/2021 00:00 UTC - 23:59 UTC



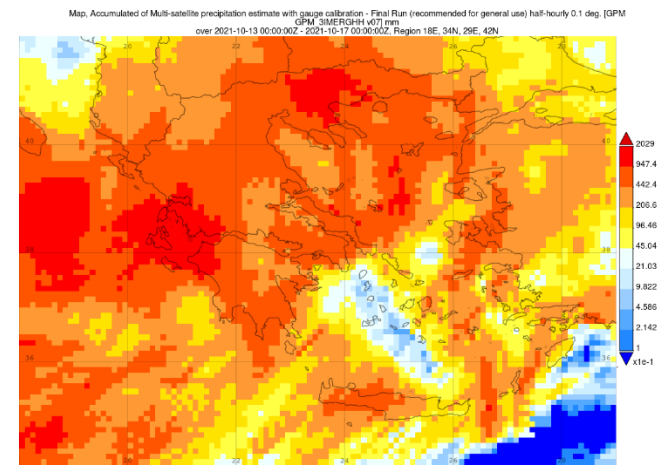
14/10/2021 00:00 UTC - 23:59 UTC



15/10/2021 00:00 UTC - 23:59 UTC



16/10/2021 00:00 UTC - 23:59 UTC



13/10/2021 00:00 UTC - 16/10/2021 23:59 UTC

Σχήμα 3.2: Δορυφορική εκτίμηση υετού (mm ανά ημέρα) IMERG του GPM από Final Run, για τις 13/10, 14/10, 15/10, 16/10/2021 και 13-16/10/2021.

3.1.3 Σύγκριση παρατηρήσεων με δορυφορικές εκτιμήσεις

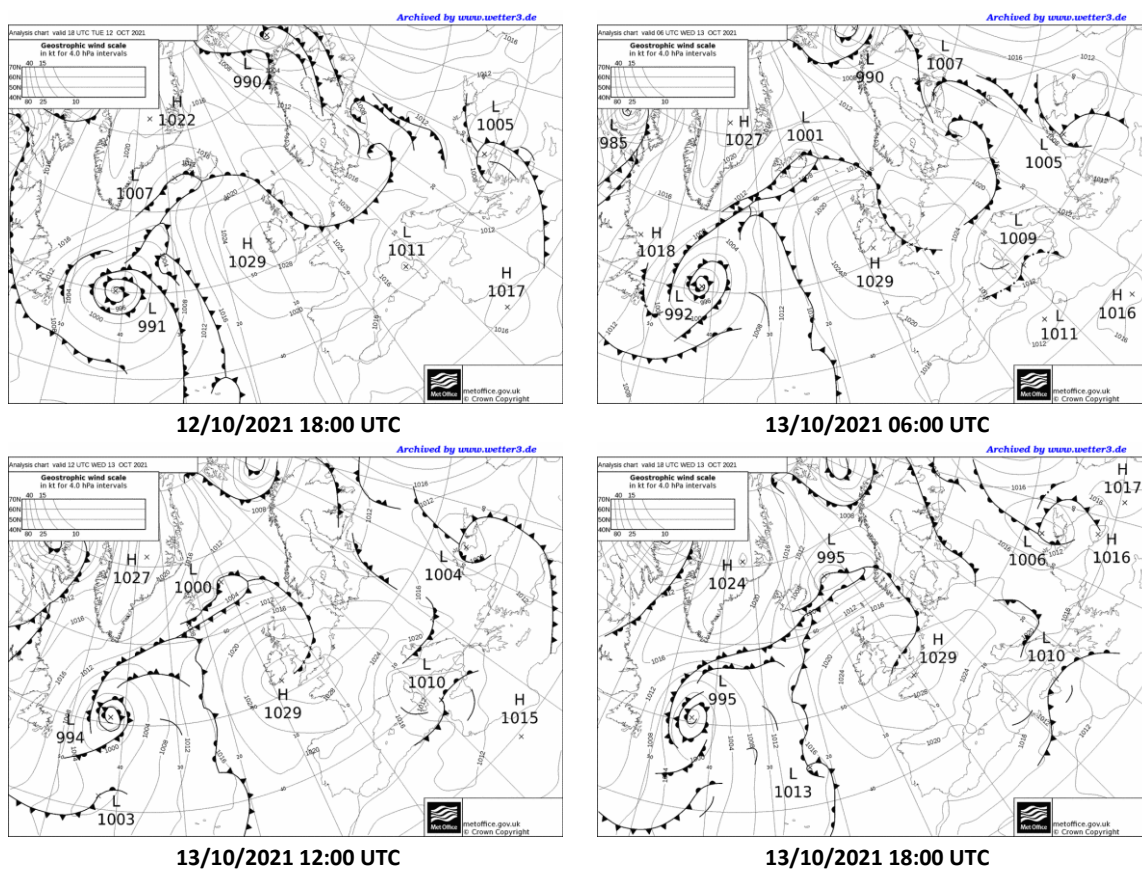
Από τη σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς και των δορυφορικών εκτιμήσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν προϊόντα Final Run. Συνεκτιμώντας τους υπολογισμούς α) διαφοράς δορυφορικής εκτίμησης μείον μέτρησης και β) διαφοράς/μέτρησης, παρατηρείται ότι καλύτερη απόδοση παρουσίασαν κυρίως οι σταθμοί που βρίσκονται στη βόρεια Ελλάδα, όπως για παράδειγμα η Καστοριά, η Φλώρινα η Κοζάνη, η Θεσσαλονίκη και η Αλεξανδρούπολη σε συμφωνία με την μελέτη των Kazamias et al. (2022). Άλλες περιοχές με καλή δορυφορική εκτίμηση αποτελούν η Αγχίαλος, η Ελευσίνα, η Λήμνος, το Καστέλι και η Ρόδος (Πίνακας 3.1). Επίσης, η δορυφορική μέθοδος υπερεκτιμά την βροχόπτωση σε 17 (20) σταθμούς στις 14/10 (15/10). Η διαφορά της μέσης βροχόπτωσης των δύο μεθόδων έχει θετικό πρόσημο για τις 14/10 και 15/10 με τιμές +3.6 mm και +4.8 mm, αντίστοιχα, γεγονός που υποδηλώνει συστηματική υπερεκτίμηση των μετρήσεων από τους δορυφόρους.

Πίνακας 3.1: Τιμές βροχοπτώσεων από μετρήσεις επίγειων σταθμών και δορυφορικές εκτιμήσεις (IMERG GPM Final run), η διαφορά τους και ο λόγος διαφορά/μέτρηση (%).

Α/Α	ΣΤΑΘΜΟΙ	14/10 00 UTC - 15/10 00 UTC				15/10 00 UTC - 16/10 00 UTC			
		ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΔΙΑΦ	ΔΙΑΦ/ ΜΕΤΡ (%)	ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΔΙΑΦ	ΔΙΑΦ/ ΜΕΤΡ (%)
1	Κεφαλονιά (06-06)	71.2	50	21.2	42	47.9	56	-8.1	-14
2	Άκτιο	73.2	59	14.2	24	35.4	15.8	19.6	124
3	Ιωάννινα	37.3	20	17.3	87	21.3	16	5.3	33
4	Καστοριά	20.5	20	0.5	3	8.7	6.7	2	30
5	Ανδραβίδα	67.4	100	-32.6	-33	35.5	33	2.5	8
6	Άραξος	77.5	23	54.5	237	32.1	32	0.1	0
7	Φλώρινα	21.7	20	1.7	9	5	19.7	-14.7	-75
8	Κοζάνη	40.2	29	11.2	39	17.8	13.6	4.2	31
9	Καλαμάτα	42.6	29	13.6	47	26.7	13.3	13.4	101
10	Τρίπολη	26.1	13	13.1	101	20.6	31.8	-11.2	-35
11	Λάρισα	37.1	15	22.1	147	14.4	7	7.4	106
12	Αγχίαλος	15.4	7	8.4	120	23	22	1	5
13	Θεσσαλονίκη	39.1	46.8	-7.7	-16	27.5	18	9.5	53
14	Τανάγρα	14.2	16	-1.8	-11	32.2	16	16.2	101
15	Σέρρες	28.7	39	-10.3	-26	82.5	51	31.5	62
16	Ελευσίνα	40.2	51	-10.8	-21	16.9	16	0.9	6
17	Τατόι	50.1	83	-32.9	-40	20.3	18	2.3	13
18	Σούδα	18.9	1.9	17	895	18.2	9.2	9	98
19	Σκύρος	20.3	54.6	-34.3	-63	9.6	21.5	-11.9	-55
20	Ηράκλειο	19.4	4	15.4	385	19	26	-7	-27
21	Λήμνος	21.6	17	4.6	27	54.6	41	13.6	33
22	Καστέλι	11.8	18	-6.2	-34	26.6	20.8	5.8	28
23	Αλεξανδρούπολη	14	7.1	6.9	97	12.5	12	0.5	4
24	Χίος	3.6	0	3.6	ΔΕΝ ΟΡ	42.9	23	19.9	87
25	Ρόδος	2.2	0	2.2	ΔΕΝ ΟΡ	28	21	7	33

3.2 Χάρτες επιφανείας και θερμοδυναμικά διαγράμματα

Το σύστημα Μπάλλος ξεκίνησε σαν ένα ασθενές βαρομετρικό χαμηλό που σχηματίστηκε στον κόλπο της Γένοβας στις 12/10 στις 18 UTC. Το χαμηλό αυτό άρχισε σταδιακά να βαθαίνει με την παράλληλη εμφάνιση ενός αυλώνα, που εκτείνεται από τα νότια παράλια της Γαλλίας έως τη βόρεια Σαρδηνία στις 13/10 στις 06 UTC (Σχήμα 3.3). Την ίδια χρονική στιγμή παρατηρείται η ανάπτυξη μετωπογένεσης με το θερμό μέτωπο να έχει κατεύθυνση προς τη Σικελία και το ψυχρό μέτωπο να είναι παράλληλο με τις βόρειες ακτές της Αφρικής (Σχήμα 3.3). Το σύστημα έφτασε στην Ελλάδα τις βραδινές ώρες της 13ης Οκτωβρίου. Στις 18 UTC 13/10 η επιφανειακή θέση του θερμού μετώπου του χαμηλού ήταν στο Ιόνιο (πολύ κοντά στη Δυτική Πελοπόννησο), αλλά λόγω της κατακόρυφης κλίσης του πιθανόν να εκτείνεται πάνω από την Πελοπόννησο, τα νησιά του Ιονίου και τη δυτική ηπειρωτική χώρα.

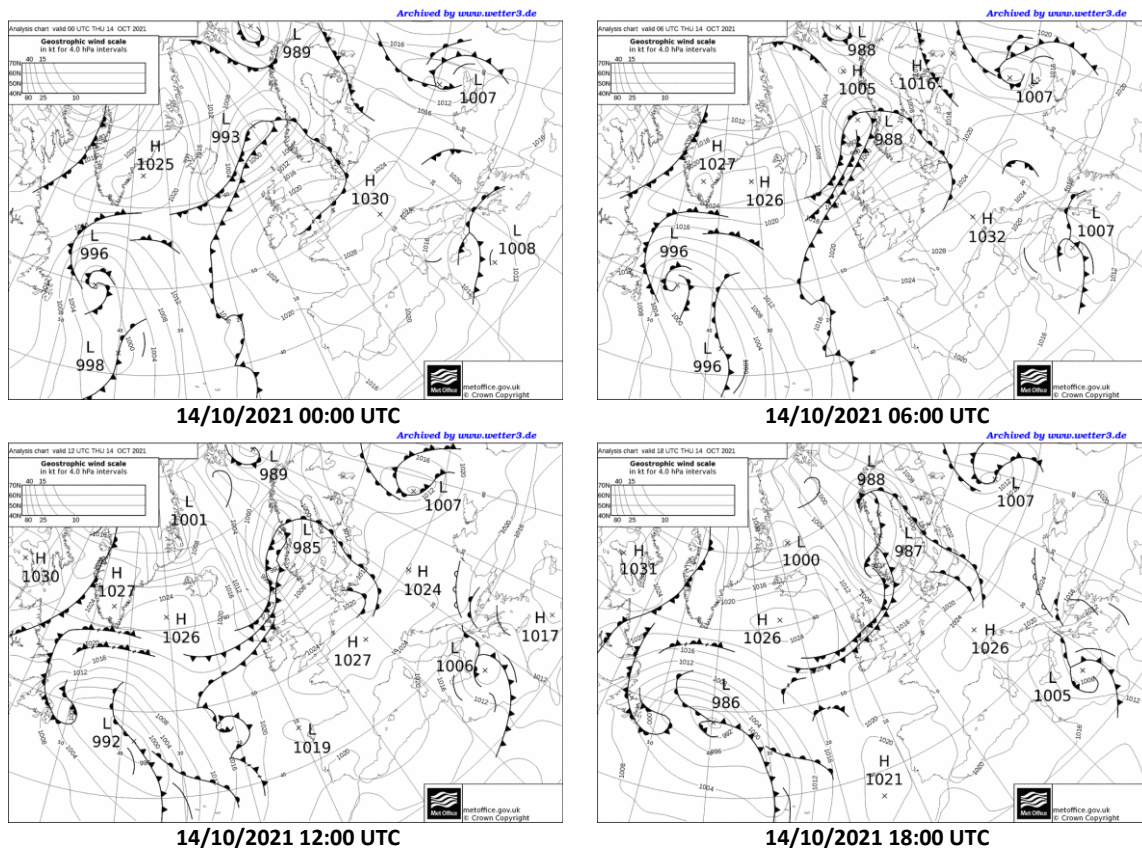


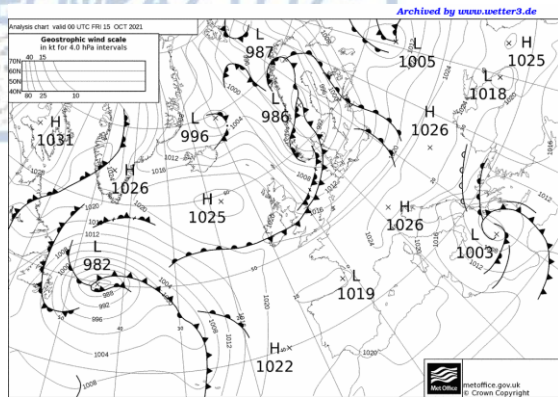
Σχήμα 3.3: Συνοπτικοί χάρτες επιφάνειας του Met Office με τις ισοβαρείς ανά 4 hPa στις 18 UTC 12/10/2021 και 06, 12 και 18 UTC 13/10/2021 (Πηγή: <https://www.wetter3.de/>).

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα που παρουσιάζουν οι χάρτες καιρού πάνω από την Ελλάδα στις 14/10 είναι οι νότιοι άνεμοι, καθώς το βαρομετρικό χαμηλό βρίσκεται στα δυτικά της Ελλάδας και η ροή είναι αντίστροφα των δεικτών του ρολογιού στο Β. Ημισφαίριο (Σχήμα 3.4). Η επικράτηση νότιων ανέμων έχει σαν αποτέλεσμα να έρχονται μεγάλες ποσότητες υγρασίας από το Αιγαίο. Συνεπώς, όλη η υγρασία που υπάρχει στο Αιγαίο και το Ιόνιο καθώς και οι υδρατμοί που δημιουργούνται από την εξάτμιση μεταφέρονται προς την ηπειρωτική Ελλάδα και τα νησιά.

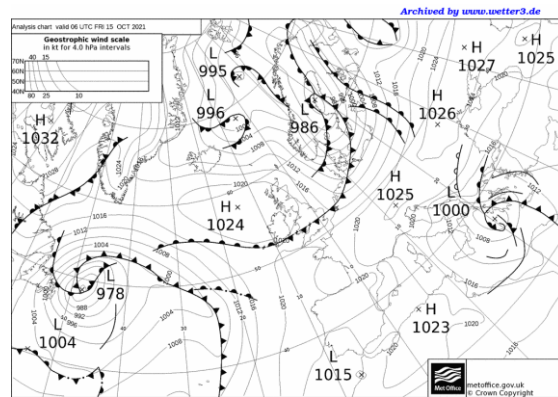
Επίσης, οι θερμοκρασίες θάλασσας είναι σχετικά υψηλές και κυμαίνονται από 23°C έως 26°C στην κεντρική Μεσόγειο και δυτικά του Ιονίου Πελάγους, δεδομένου ότι ο μήνας είναι Οκτώβριος. Συνήθως μέχρι τον Σεπτέμβριο δεν έχουν περάσει πολλά βαρομετρικά χαμηλά και ψυχρές αέριες

μάζες πάνω από την Ελλάδα, οπότε η ατμόσφαιρα δεν έχει ψυχράνει πολύ. Άρα, είναι πιθανό η θερμοκρασία τόσο του εδάφους όσο και της θάλασσας να είναι σχετικά υψηλή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πιο επιρρεπείς συνθήκες για αστάθεια εφόσον υπάρχουν βορειότερα ψυχρότερες αέριες μάζες. Αυτό θα διαπιστωθεί στη συνέχεια με την μελέτη των συνοπτικών χαρτών στα 500 hPa.

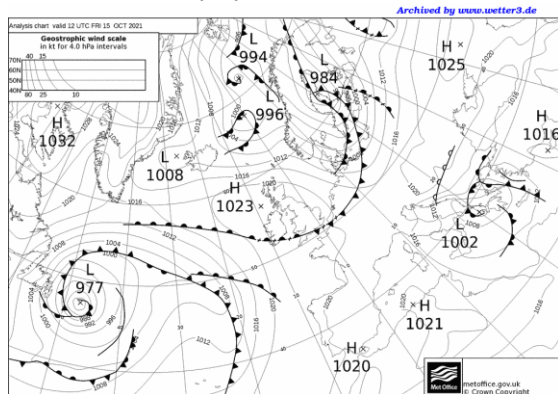




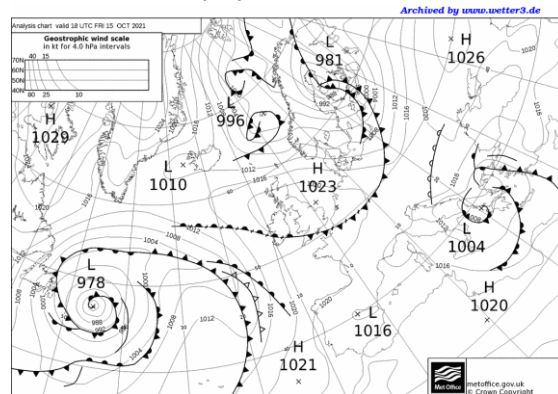
15/10/2021 00:00 UTC



15/10/2021 06:00 UTC



15/10/2021 12:00 UTC

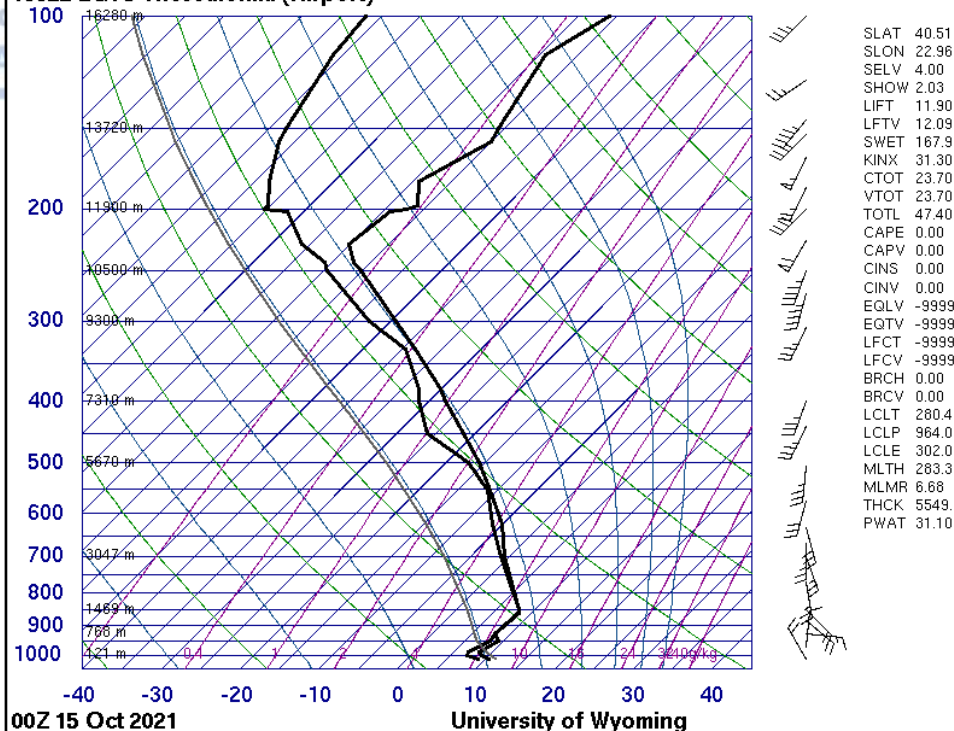


15/10/2021 18:00 UTC

Σχήμα 3.5: Συνοπτικοί χάρτες επιφάνειας του Met Office με τις ισοβαρείς ανά 4 hPa στις 15/10/2021 στις 00, 06, 12 και 18 UTC (Πηγή: <https://www.wetter3.de/>).

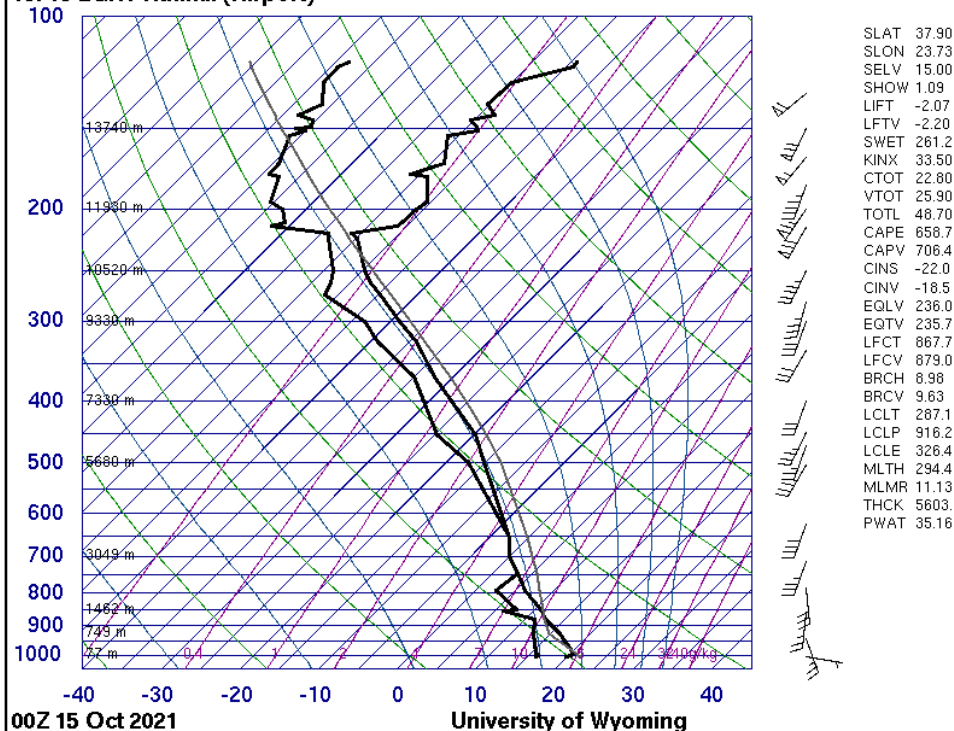
Στο θερμοδυναμικό διάγραμμα της 15ης Οκτωβρίου 2021 στις 00 UTC για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης παρατηρείται θερμοκρασία περίπου 11°C κοντά στην επιφάνεια. Είναι εμφανής μια μικρή θερμοκρασιακή αναστροφή στο στρώμα 1000-850 hPa. Επιπλέον, σημειώνεται πολύ αυξημένη υγρασία από τα 950 hPa έως τα 550 hPa, με την καμπύλη της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου να εφάπτεται σε πολλά σημεία με την καμπύλη της θερμοκρασίας (Σχήμα 3.6). Η θερμοκρασία ακολουθεί την υγρή αδιαβατική, δείχνοντας την ύπαρξη βαθιάς ανωμεταφοράς (καταιγιδοφόρου δράσης) τις προηγούμενες ώρες. Στο αντίστοιχο διάγραμμα του σταθμού της Αθήνας παρατηρείται επιφανειακή θερμοκρασία 19.8°C, ενώ η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι 16.1°C. Αυξημένα επίπεδα υγρασίας σημειώνονται και στην Αθήνα, με την ατμόσφαιρα να είναι κορεσμένη σε υδρατμούς από τα 750 hPa έως τα 650 hPa (Σχήμα 3.7). Σε αντίθεση με τη Θεσσαλονίκη, στην Αθήνα συνεχίζει να υπάρχει διαθέσιμη δυναμική ενέργεια ($CAPE=658.7 \text{ J/kg}$) για ανωμεταφορά.

16622 LGTS Thessaloniki (Airport)



Σχήμα 3.6: Θερμοδυναμικό διάγραμμα (SKEW-T) για τον σταθμό της Θεσσαλονίκης (LGTS) στις 15/10/2021 00:00 UTC (Πηγή: <https://weather.uwyo.edu/>).

16716 LGAT Athinai (Airport)



Σχήμα 3.7: Θερμοδυναμικό διάγραμμα (SKEW-T) για τον σταθμό της Αθήνας (LGAT) στις 15/10/2021 00:00 UTC (Πηγή: <https://weather.uwyo.edu/>).

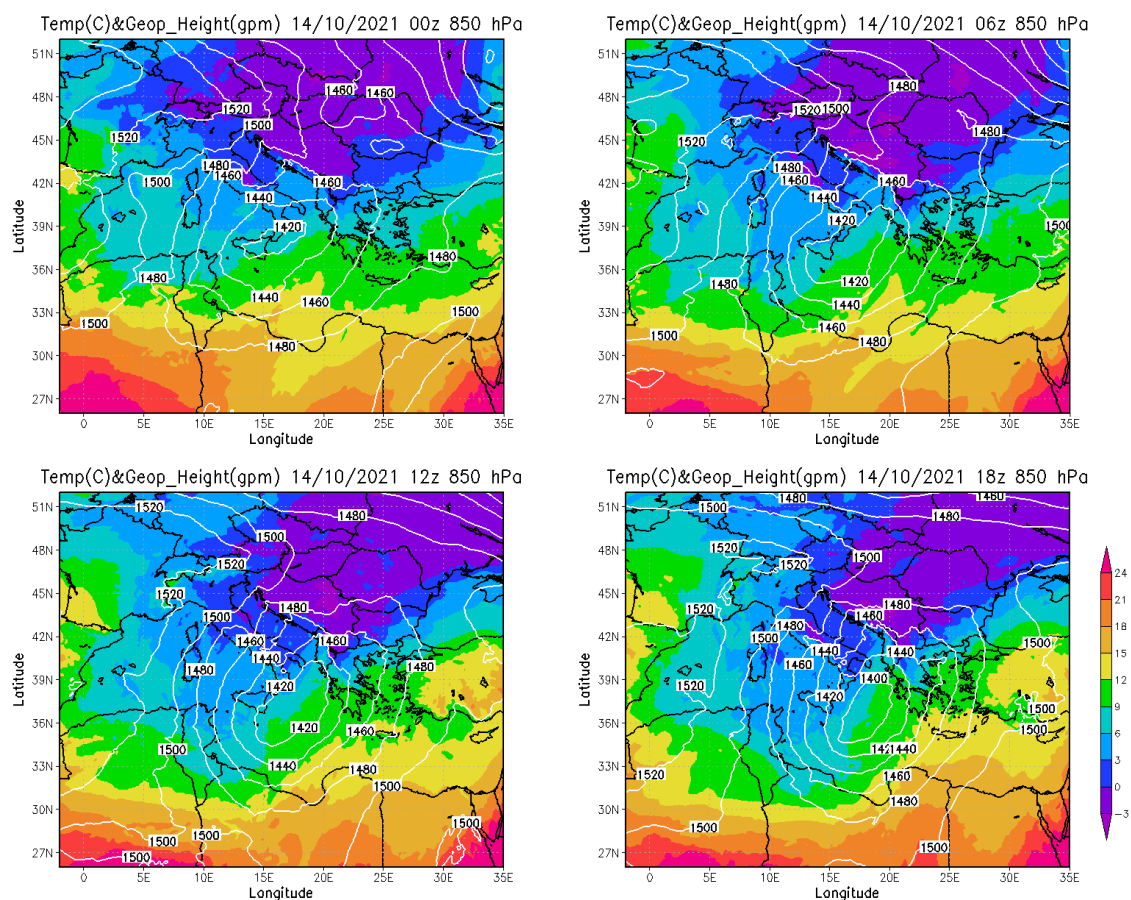
3.3 Συνοπτικοί χάρτες από πλεγματικά δεδομένα του ECMWF

Τα δεδομένα αναλύσεων του ECMWF αποτελούν πλεγματικά δεδομένα με τα οποία μπορούν να παραχθούν συνοπτικοί χάρτες και διάφορα γραφικά, εφόσον υποστούν επεξεργασία με συγκεκριμένα λογισμικά οπτικοποίησης. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία, πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, γεωδυναμικό ύψος κ.ά. σε πολλά ισοβαρικά επίπεδα για τις κύριες συνοπτικές ώρες.

3.3.1 Χάρτες καιρού στα 850 hPa

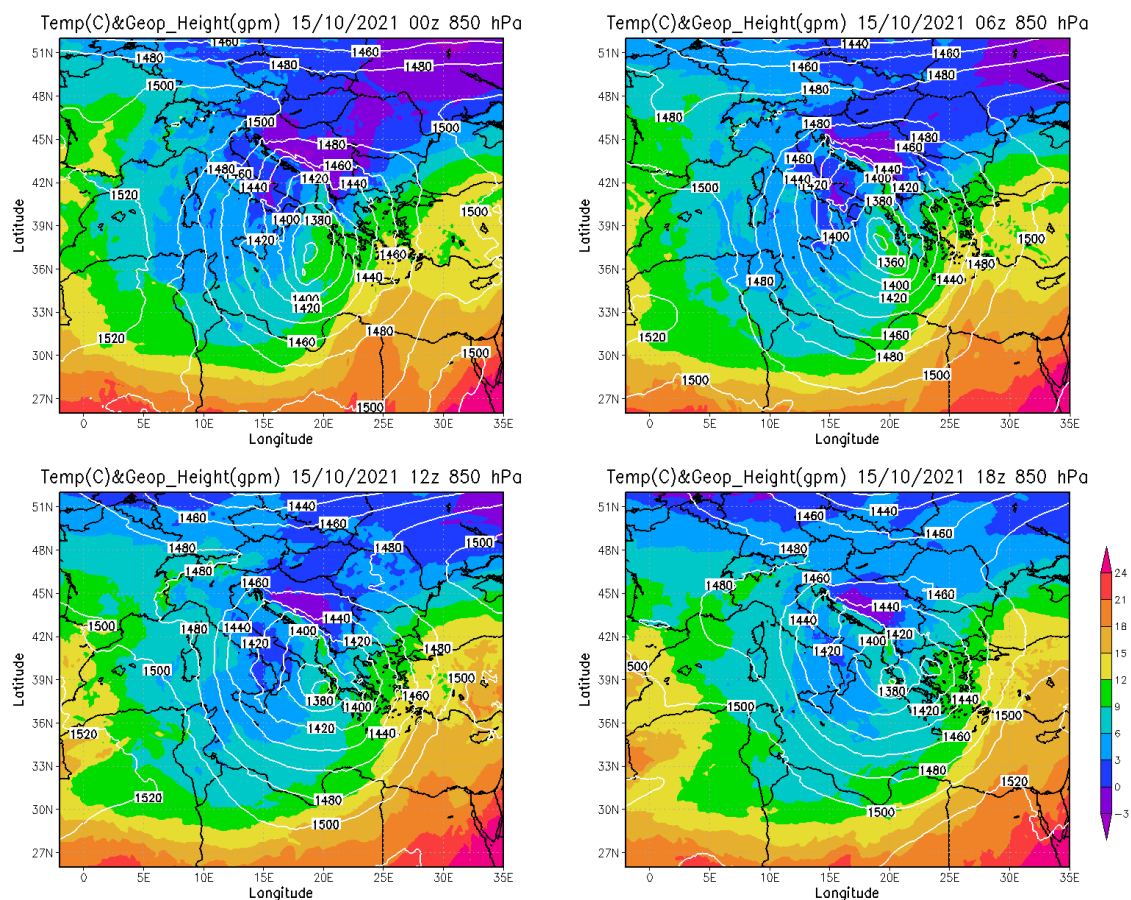
Τα κύρια στοιχεία που μπορούν να αντληθούν από τους χάρτες των 850 hPa είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Επίσης, ο συνδυασμός των ισοϋψών με τις ισόθερμες καμπύλες αποτελεί έναν τρόπο ανίχνευσης των μετώπων. Το μέσο ύψος στο οποίο βρίσκεται η ισοβαρική στάθμη των 850 hPa είναι 1400 με 1600 gpm (Καρακώστας, 2013).

Αρχικά, εξετάζεται αν ήρθαν ψυχρές ή θερμές αέριες μάζες από βόρεια ή νότια. Αυτό προσδιορίζεται από το ανεμολογικό πεδίο που καθορίζει πως θα μεταφερθούν οι αέριες μάζες και συνεπώς τι θερμοκρασίες θα επικρατήσουν μετά. Είναι εμφανής η ύπαρξη ψυχρών αερίων μαζών από τα Βαλκάνια και την κεντρική Ευρώπη μέχρι τη χώρα μας, ενώ οι νότιοι άνεμοι που αναμένονται στην ηπειρωτική Ελλάδα και στο Αιγαίο Πέλαγος μεταφέρουν πιο θερμές μάζες αέρα (Σχήμα 3.8 και 3.9). Συνεπώς, συγκλίνουν οι ψυχρές και θερμές αέριες μάζες και ενισχύεται η βαροκλινικότητα πάνω από την Ελλάδα.



Σχήμα 3.8: Οριζόντιες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν τη θερμοκρασία (°C με τη χρωματική κλίμακα) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 20 gpm) στα 850 hPa στις 14/10/2021 στις 00, 06, 12 και 18 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

Όπως περνάει το χαμηλό των υψών στις 14/10 στις 18 UTC και στις 15/10 στις 00 και 06 UTC, αναμένονται νότιοι άνεμοι στον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας και στο Αιγαίο Πέλαγος που μεταφέρουν τις θερμές και υγρές αέριες μάζες, εμπλουτίζοντας τις μάζες αυτές με υδρατμούς, οι οποίες στη συνέχεια επηρέασαν τον ανατολικό ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας (Σχήμα 3.8 και 3.9). Ο ανατολικός κορμός της Ελλάδας παρουσιάζει ενδιαφέρον, επειδή έχει πολλά όρη και όπως έρχονται οι αέριες μάζες αναγκάζονται να ανέβουν βιαίως τα βουνά. Επίσης, στις 15/10 στις 00 και 06 UTC, είναι εμφανής η υπαρξη μεγάλων θερμοβαθμίδων λόγω των μετώπων (ψυχρό, θερμό) που διασχίζουν τη βόρεια Αφρική, το Αιγαίο Πέλαγος και καταλήγουν στα νότια της Μαύρης Θάλασσας (Σχήμα 3.9). Οι θέσεις των μετώπων συμφωνούν με τις αναλύσεις του UKMET (Σχήμα 3.5), λαμβάνοντας βέβαια υπόψη ότι στους χάρτες επιφανείας απεικονίζεται η θέση των μετώπων στην επιφάνεια και επομένως θα υπάρχει μία κλίση κατακόρυφα από την επιφάνεια έως τα 850 hPa ανάλογα με το είδος του μετώπου.



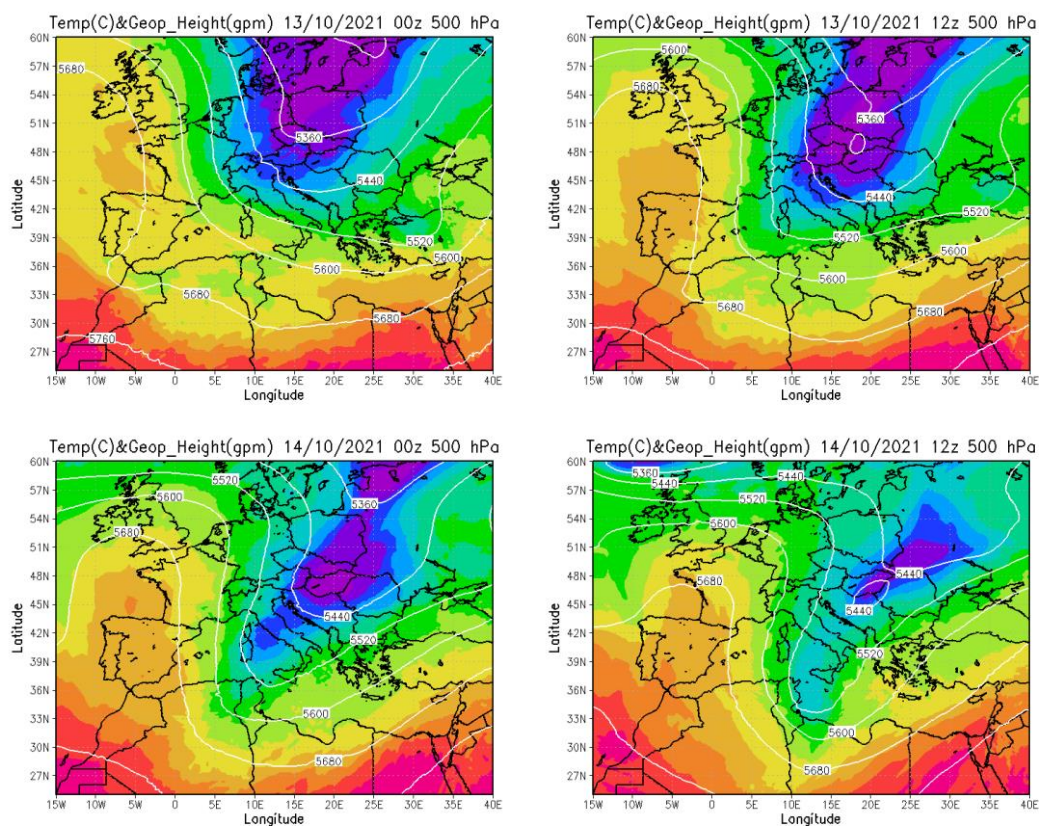
Σχήμα 3.9: Οριζόντιες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν τη θερμοκρασία (°C με τη χρωματική κλίμακα) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 20 gpm) στα 850 hPa στις 15/10/2021 στις 00, 06, 12 και 18 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

3.3.2 Χάρτες καιρού στα 500 hPa

Οι χάρτες των 500 hPa χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των συστημάτων που καθορίζουν τον καιρό επιφανείας. Το μέσο ύψος που βρίσκεται η ισοβαρική στάθμη των 500 hPa είναι περίπου στα 5500 gpm. Από τη μελέτη αυτών των χαρτών αντλούνται πληροφορίες για τη μεταβολή των συστημάτων στην επιφάνεια καθώς και για την ανίχνευση του στροβιλισμού και της μεταφοράς αυτού (Καρακώστας, 2013).

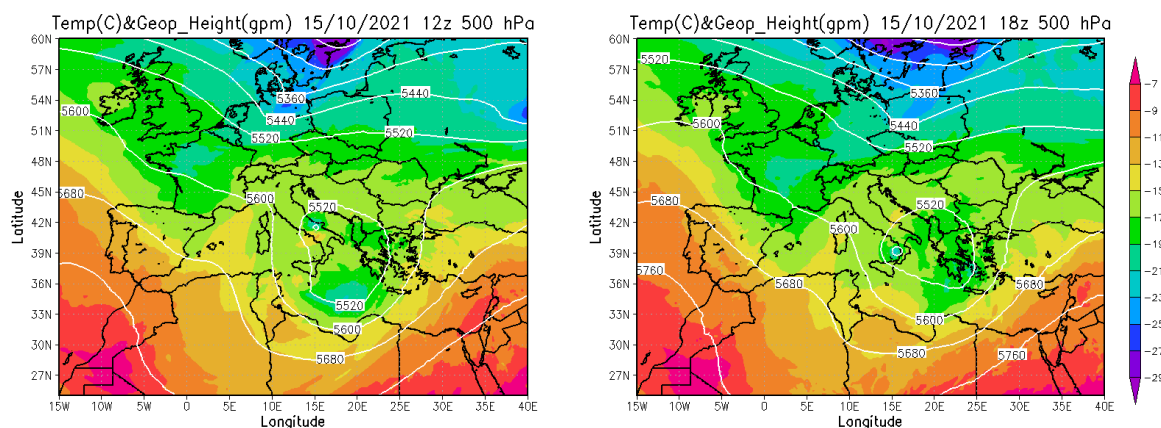
Αρχικά, πέρασε ένας αυλώνας δύο ημέρες πριν το φαινόμενο. Επίσης, είναι εμφανής μία ράχη δυτικά της Ευρώπης, η οποία είναι στάσιμη για αρκετές ημέρες (δεν απεικονίζεται πλήρως) και μπορεί να θεωρηθεί ότι προκαλεί εμποδισμό (Σχήμα 3.10). Επιπλέον, όταν ένα αντικυκλωνικό σύστημα έχει θερμές αέριες μάζες στο κέντρο του, όπως το παραπάνω που απεικονίζεται στους χάρτες των 500 hPa, ενισχύεται καθ' ύψος και γίνεται πιο ισχυρό. Συνεπώς, μπορεί να εξελιχθεί σε αντικυκλώνα εμποδισμού. Ο εμποδισμός Ω μπορεί να δημιουργήσει στην ανατολική πλευρά του βαρομετρικό χαμηλό αν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες.

Ο αυλώνας που εκτείνεται από τη βόρεια και κεντρική Ευρώπη έως τον κόλπο της Γένοβας γίνεται ολοένα και πιο κλειστός από τις 13/10 στις 00 UTC έως τις 14/10 στις 12 UTC, γεγονός που σημαίνει ότι αυξάνεται ο σχετικός στροβιλισμός του (Σχήμα 3.10). Αυτό συμβαίνει επειδή το μήκος κύματος του αυλώνα γίνεται πιο μικρό, άρα η μερική παράγωγος του v ως προς x , δηλαδή το κλάσμα $\partial v / \partial x$ που περιλαμβάνεται στον ορισμό του στροβιλισμού μεγαλώνει. Αν για παράδειγμα το dv παραμείνει ίδιο, όταν συρρικνωθεί-μειωθεί το x , δηλαδή όταν μικρύνει το μήκος κύματός του, το dx μειώνεται και επομένως μεγαλώνει το κλάσμα και άρα μεγαλώνει ο στροβιλισμός.



Σχήμα 3.10: Οριζόντιες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν τη θερμοκρασία (°C με τη χρωματική κλίμακα) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 20 gpm) στα 500 hPa στις 13/10 και 14/10/2021 στις 00 και 12 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

Στο Σχήμα 3.11 παρατηρούνται οι ψυχρές αέριες μάζες που έρχονται στην Ελλάδα στις 15/10. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από -17°C έως -19°C στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, ενώ σε τοπικά σημεία φτάνουν και τους -19°C με -21°C στις 18 UTC (Σχήμα 3.12). Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει πλέον αρκετή αστάθεια, επειδή στα 850 hPa που είναι σε χαμηλότερο υψόμετρο έρχονται θερμές και υγρές αέριες μάζες λόγω των νοτίων ανέμων, ενώ στα 500 hPa που είναι σε μεγαλύτερο υψόμετρο κυριαρχούν ψυχρές μάζες. Επίσης, η Ελλάδα βρίσκεται μπροστά από τον αυλώνα που στις 15/10 έχει γίνει κλειστό χαμηλό των υψών, στην περιοχή που υπάρχει θετική μεταφορά στροβιλισμού και ευνοούνται οι ανοδικές κινήσεις. Επομένως, αυτό αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα που ευνοεί την εκδήλωση αστάθειας (πέρα από την τοπογραφία).

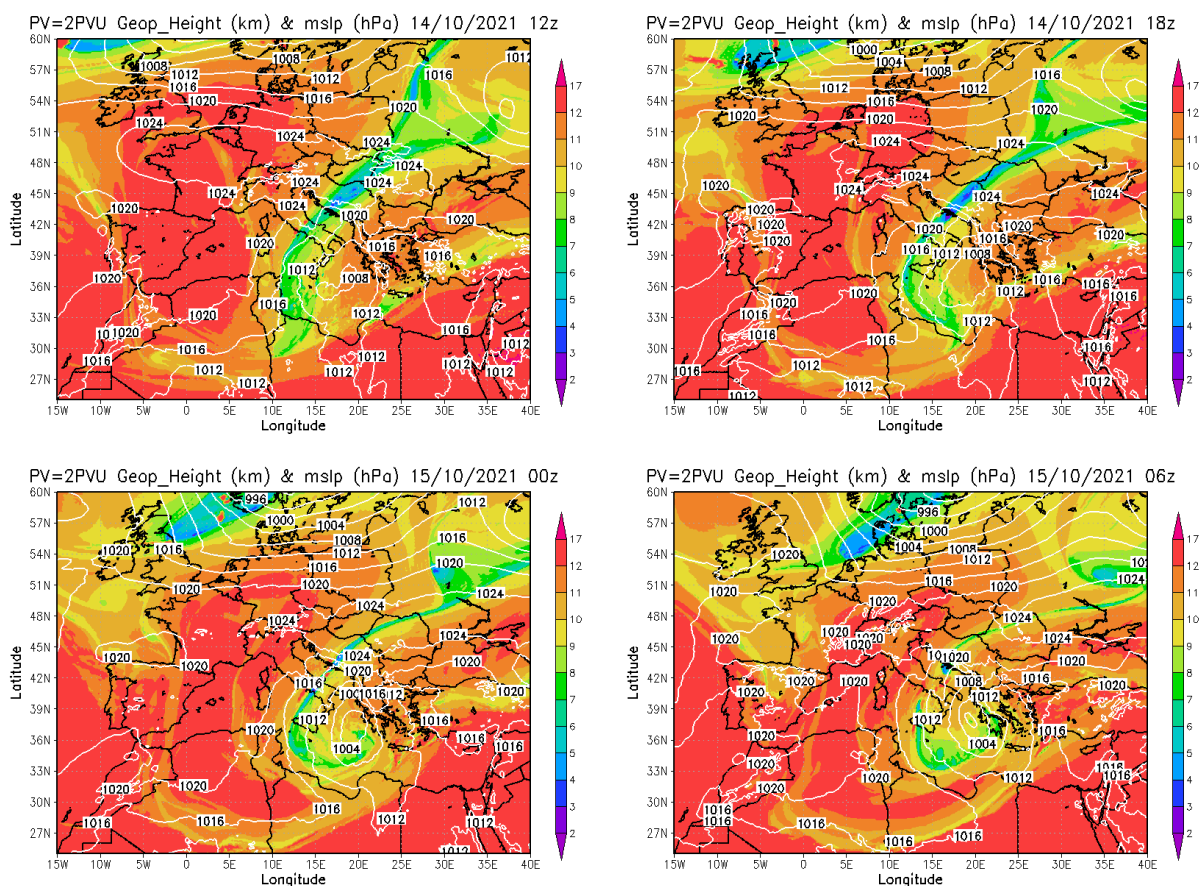


Σχήμα 3.11: Οριζόντιες τομές της ατμόσφαιρας που απεικονίζουν τη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$ με τη χρωματική κλίμακα) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 20 gpm) στα 500 hPa στις 15/10/2021 στις 12 και 18 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

3.3.3 Επιφάνεια 2PVU (Δυναμική τροπόπαυση)

Η επιφάνεια των 2PVU αποτελεί τη μετάβαση μεταξύ της τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας και ονομάζεται δυναμική τροπόπαυση. Όταν παρατηρούνται χαμηλά ύψη της δυναμικής τροπόπαυσης, δηλαδή υπάρχει ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης, τότε ο στροβιλισμός μεταφέρεται προς τα κάτω και ευνοείται η δημιουργία ή ενίσχυση βαρομετρικού χαμηλού. Ουσιαστικά ο στρατοσφαιρικός αέρας έχοντας υψηλές τιμές δυναμικού στροβιλισμού διεισδύει στην τροπόσφαιρα. Συγχρόνως όμως δεν μεταφέρεται μόνο στροβιλισμός, αλλά επηρεάζεται κάτω από την ανωμαλία και η στατική ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, η ευστάθεια μειώνεται και επομένως επικρατούν πιο επιρρεπείς συνθήκες για αστάθεια (Hoskins et al., 1985; Pytharoulis, 1995; Santurette and Georgiev, 2005).

Στο Σχήμα 3.12 παρατηρείται μία μορφή «άγκιστρου», η οποία αποτελεί μία λωρίδα μεγάλων τιμών δυναμικού στροβιλισμού που έχει κατέβει πιο χαμηλά η τροπόπαυση. Η λωρίδα της δυναμικής τροπόπαυσης (PV streamer) που εκτείνεται από τη Ρωσία και διασχίζει τα Βαλκάνια κατεβαίνει μέχρι περίπου το ύψος των 4 km στις 14/10 18 UTC, ενώ στην περιοχή της κεντρικής Μεσογείου που βρίσκεται το «άγκιστρο» φτάνει τα 6 km στις 15/10 00 UTC (Σχήμα 3.12). Επίσης, η ύπαρξή του φαίνεται να συνδέεται με την ενίσχυση του επιφανειακού χαμηλού με την πίεση να φτάνει λίγο χαμηλότερα από 1000 hPa στις 15/10 06 UTC (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12: Οριζόντιες τομές που απεικονίζουν το ύψος της δυναμικής τροπόπαυσης (2PVU σε km, σκίαση) και την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (hPa, ισοβαρείς) στις 14/10/2021 στις 12 και 18 UTC και στις 15/10/2021 στις 00 και 06 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

3.3.4 Δυναμική Αστάθεια – Διαγράμματα Hovmoller

Για την μελέτη της δυνητικής αστάθειας και της απόκλισης κατασκευάστηκαν διαγράμματα Hovmoller, στα οποία απεικονίζεται η μέση τιμή ορισμένων μεταβλητών σε συγκεκριμένες περιοχές της Ελλάδας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν 4 περιοχές ενδιαφέροντος, στις οποίες σημειώθηκαν και τα μεγαλύτερα ύψη βροχής. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή 1 οριοθετείται μεταξύ 37.5°B - 38.5°B , 23.25°A - 24.25°A , η περιοχή 2 είναι από 38°B - 39°B , 20.5°A - 21.5°A , η περιοχή 3 από 38°B - 39°B , 24.0°A - 25.0°A και η περιοχή 4 από 40°B - 41°B , 22.5°A - 23.5°A (Σχήμα 3.13). Στις περιοχές αυτές παρατηρήθηκαν τα πιο έντονα φαινόμενα και σημειώθηκαν τα μεγαλύτερα ποσά υετού σε σχέση με την υπόλοιπη Ελλάδα.

Η εξέλιξη των μεσοποιημένων τιμών της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (θ_e) που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον Bolton (1980) και της απόκλισης στις περιοχές ενδιαφέροντος παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.14-3.17 μέσω διαγραμμάτων Hovmoller. Οι αναφερόμενες ποσότητες υπολογίστηκαν από τα πλεγματικά δεδομένα του ECMWF. Από τη μελέτη τους διερευνάται ο ρόλος της δυνητικής αστάθειας και της σύγκλισης στη δημιουργία έντονων καιρικών φαινομένων στις υπό μελέτη περιοχές.



Σχήμα 3.13: Απεικόνιση των περιοχών ενδιαφέροντος (Χάρτης Google Earth).

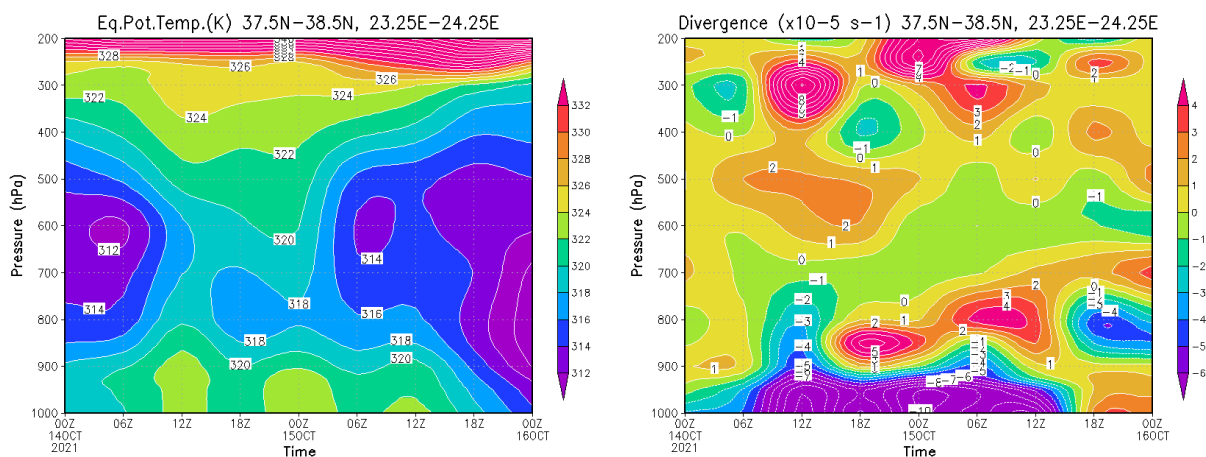
Οι ελάχιστες θερμοκρασίες της θ_e παρατηρούνται στη μέση τροπόσφαιρα (Σχήματα 3.14-3.17). Όταν η ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος ($(\partial\theta_e/\partial z) < 0$) τότε υπάρχει δυνητική αστάθεια. Αν ένα δυνητικά ασταθές στρώμα αέρα μετακινηθεί κατακόρυφα προς τα επάνω θα γίνει ασταθές, ακόμα και αν ήταν αρχικά ευσταθές (Πυθαρούλης κ.ά, 2012).

Η κατακόρυφη βαθμίδα της θ_e στις 14/10 στις 06 UTC στην περιοχή 1 είναι περίπου 8 K (320-312 K) από τα 950 hPa (~500 m) μέχρι τα 600 hPa (~4 km), οπότε η μείωση ήταν 8K/3.5km ή 2.3 K/km (Σχήμα 3.14). Σε σύγκριση με αντίστοιχο διάγραμμα άλλης εργασίας (για περιοχή ίδιων

διαστάσεων), στην οποία εξετάζεται η κεραυνική δραστηριότητα της 17ης και 18ης Ιουνίου 2009 στη Βόρεια Ελλάδα, η μεγαλύτερη κατακόρυφη βαθμίδα της θ_e μεταξύ 950 και 600 hPa ήταν επίσης 8 K (334 K-326 K) (Πυθαρούλης κ.ά, 2012). Αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει τα παρόμοια φαινόμενα που εκδηλώθηκαν και στις δύο περιπτώσεις.

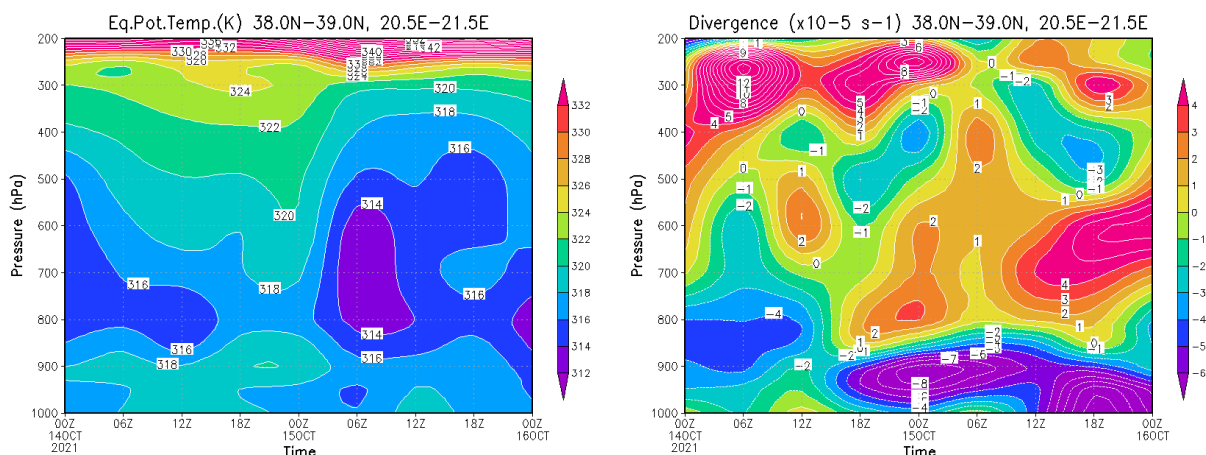
Στις 14/10 κατά το μεσημέρι-απόγευμα (12 και 18 UTC) είναι εμφανής η μείωση της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας κατά 6 K, παρά την παράλληλη εμφάνιση στα χαμηλά στρώματα πιο υψηλών θερμοκρασιών (κίτρινοι χρωματισμοί), και αυτό αποτελεί ένδειξη ότι εκδηλώνεται αστάθεια (Σχήμα 3.14). Η εκδήλωση της αστάθειας συμβαίνει όταν η αέρια μάζα αναγκάζεται να ανέλθει είτε λόγω ορογραφίας είτε λόγω σύγκλισης. Επίσης, οι πιο κίτρινοι χρωματισμοί στα χαμηλά επίπεδα της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας που υποδηλώνουν υψηλότερες θερμοκρασίες (324-326 K) πιθανόν οφείλονται στη μεταφορά θερμών και υγρών αερίων μαζών (Σχήμα 3.14 και 3.18).

Επιπλέον, στα 300 hPa στις 14/10 στις 12 UTC παρατηρείται έντονη απόκλιση, η οποία οφείλεται στην ισχυρή σύγκλιση που υπάρχει χαμηλά ή σε κάποιο άλλο δυναμικό αίτιο υψηλά (π.χ. αεροχειμάρρος) ή και στα δύο. Από το διάγραμμα honmoller της απόκλισης (Σχήμα 3.14) φαίνεται ότι επικρατεί έντονη σύγκλιση χαμηλά, οπότε η σύγκλιση αποτελεί έναν λόγο που δικαιολογεί την απόκλιση υψηλά, ενώ σε επόμενη παράγραφο εξετάζεται και η επίδραση του αεροχειμάρρου.



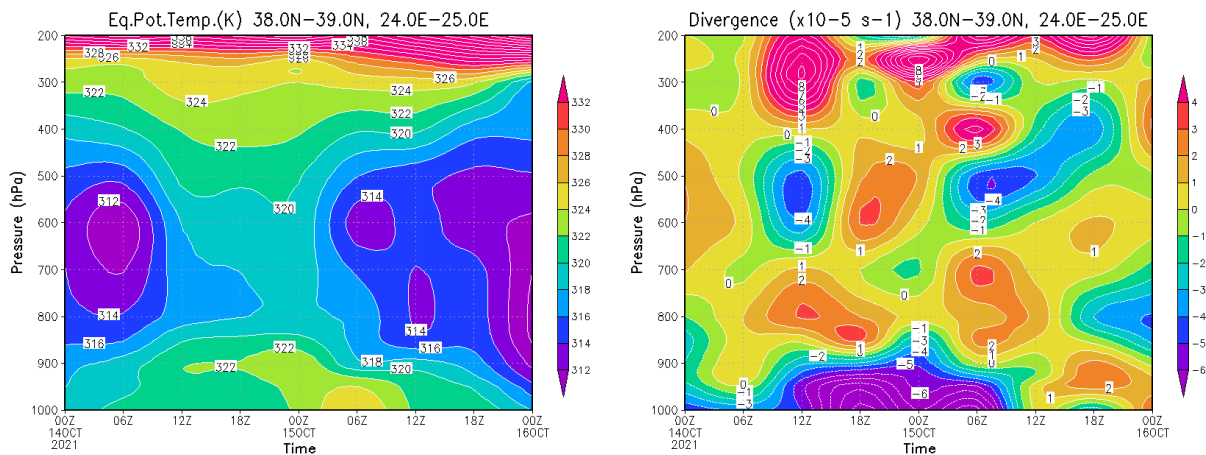
Σχήμα 3.14: Διαγράμματα honmoller της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (K) και της απόκλισης ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) μεσοποιημένες στην περιοχή 37.5°N-38.5°N, 23.25°E-24.25°E (περιοχή 1) από 00 UTC στις 14/10 έως 00 UTC στις 16/10 (Δεδομένα ECMWF).

Στην περιοχή 2 παρατηρείται σαφώς μικρότερη κατακόρυφη βαθμίδα της θ_e , το μέγιστο της οποίας μεταξύ 950 και 600 hPa εμφανίζεται στις 14/10 12 UTC και στις 15/10 06 UTC και είναι 2 K. Αξιοσημείωτη είναι η ισχυρή απόκλιση στα 250 hPa στις 14/10 στις 06 UTC με μικρές τιμές σύγκλισης στα 950 hPa, ενώ εντοπίζεται ισχυρή σύγκλιση στις 15/10 00 UTC χαμηλά με σχετικά έντονη απόκλιση υψηλά (Σχήμα 3.15). Η ισχυρή απόκλιση υψηλά στις 14/10 06 UTC πιθανολογείται ότι οφείλεται στην ύπαρξη αεροχειμάρρου.



Σχήμα 3.15: Διαγράμματα honnmoller της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (K) και της απόκλισης ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) μεσοποιημένες στην περιοχή 38.0°N - 39.0°N , 20.5°E - 21.5°E (περιοχή 2) από 00 UTC στις 14/10 έως 00 UTC στις 16/10 (Δεδομένα ECMWF).

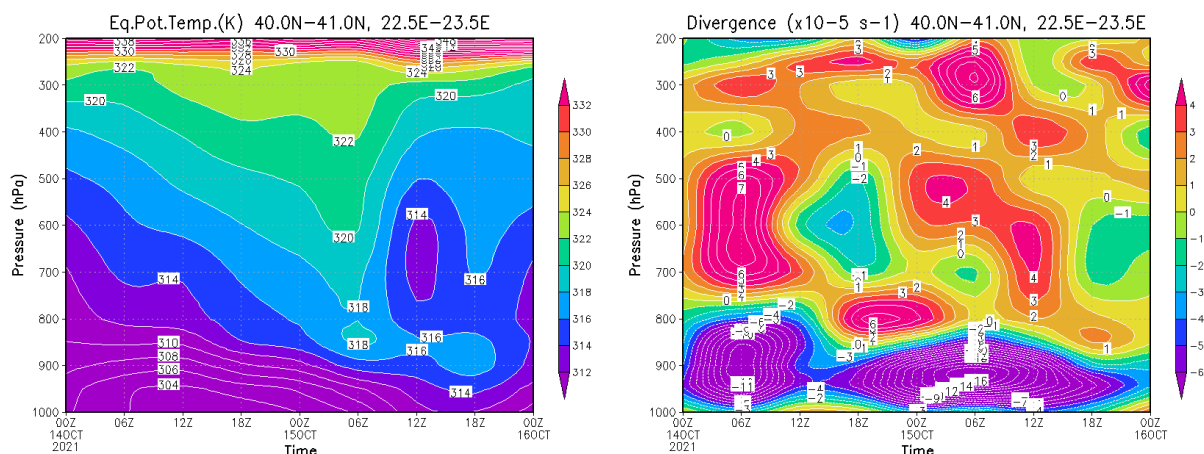
Η κατακόρυφη βαθμίδα της θ_e στην περιοχή 3 εμφανίζει παρόμοια κύμανση με την περιοχή 1, καθώς έχουμε μείωση κατά 8 K (320-312 K) σε περίπου 3.5 km, δηλαδή 2.3 K/km. Σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές απόκλισης, που υποδηλώνουν ισχυρή σύγκλιση, παρατηρούνται κοντά στην επιφάνεια μεταξύ 14/10 12 UTC και 15/10 06 UTC, ενώ θετικές τιμές απόκλισης που φτάνουν και τα 10^{-4} s^{-1} υπάρχουν στα 250 hPa στις χρονικές στιγμές 14/10 12 UTC και 15/10 00 UTC (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16: Διαγράμματα honnmoller της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (K) και της απόκλισης ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) μεσοποιημένες στην περιοχή 38.0°N - 39.0°N , 24.0°E - 25.0°E (περιοχή 3) από 00 UTC στις 14/10 έως 00 UTC στις 16/10 (Δεδομένα ECMWF).

Στην ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία της περιοχής 4, οι τιμές αυξάνουν από την κατώτερη μέχρι την μέση τροπόσφαιρα, το οποίο δεν είναι συνηθισμένο, καθώς συνήθως σε αυτό το τμήμα της ατμόσφαιρας οι θερμοκρασίες μειώνονται και μετά αυξάνουν (Σχήμα 3.17). Η μεταβολή αυτή μπορεί να οφείλεται στην παρουσία βροχής ή καταιγίδας τις προηγούμενες ημέρες σε αυτή την περιοχή. Από τα SYNOP του αεροδρομίου της Θεσσαλονίκης, στις 12/10 από τις 00 έως τις 12 UTC σημειώθηκε συνεχή μέτρια βροχόπτωση με βάση τον παρών καιρό, ενώ για το ίδιο διάστημα ο παρελθών καιρός είχε ένδειξη 9, δηλαδή καταιγίδες. Ενδεικτικοί δείκτες από το διάγραμμα SKEW-T που δείχνουν ότι δεν υπάρχει πλέον αστάθεια στις 15/10 00 UTC είναι οι LIFT με 11.9, SHOW με 2.03 και SWET με 167.9. Αυτό σημαίνει ότι λόγω της προηγούμενης δραστηριότητας είχε μειωθεί η ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία (θ_e) από τη μέση προς την κατώτερη τροπόσφαιρα και είχε κάνει πολύ ευσταθή την ατμόσφαιρα. Η βαθμίδα της θ_e παρουσιάζει μία μείωση μόνο στις 12 UTC στις 15/10 μεταξύ 850 hPa και 600 hPa, η οποία είναι της τάξεως των 2 K (Σχήμα 3.17).

Σχετικά με το διάγραμμα της απόκλισης/σύγκλισης, παρατηρούνται πολύ μεγάλες αρνητικές τιμές απόκλισης (ισχυρή σύγκλιση) στα 950 hPa με δύο μέγιστα. Το πρώτο μέγιστο παρατηρείται στις 14/10 06 UTC και το δεύτερο στις 15/10 06 UTC (Σχήμα 3.17). Κάνοντας μία σύγκριση με την βιβλιογραφία, διακρίνονται πολύ μεγαλύτερες απόλυτες τιμές σύγκλισης ($1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ και $1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) στα 950 hPa στην παρούσα μελέτη σε σχέση με την περίπτωση του Ιουνίου 2009 ($6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) (Πυθαρούλης κ.ά, 2012). Επίσης, σε σχέση με το επεισόδιο του Ιουλίου 2014 στη Βόρεια Ελλάδα, εξαγεται ακριβώς το ίδιο συμπέρασμα, καθώς η σύγκλιση χαμηλά φτάνει την απόλυτη τιμή $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (Pytharoulis et al. 2016). Παρόλα αυτά, η απόκλιση στα 250 hPa είναι μικρότερη στο σύστημα Μπάλλος ($7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) σε σύγκριση με το επεισόδιο του Ιουλίου 2014 (10^{-4} s^{-1}) (Pytharoulis et al. 2016).

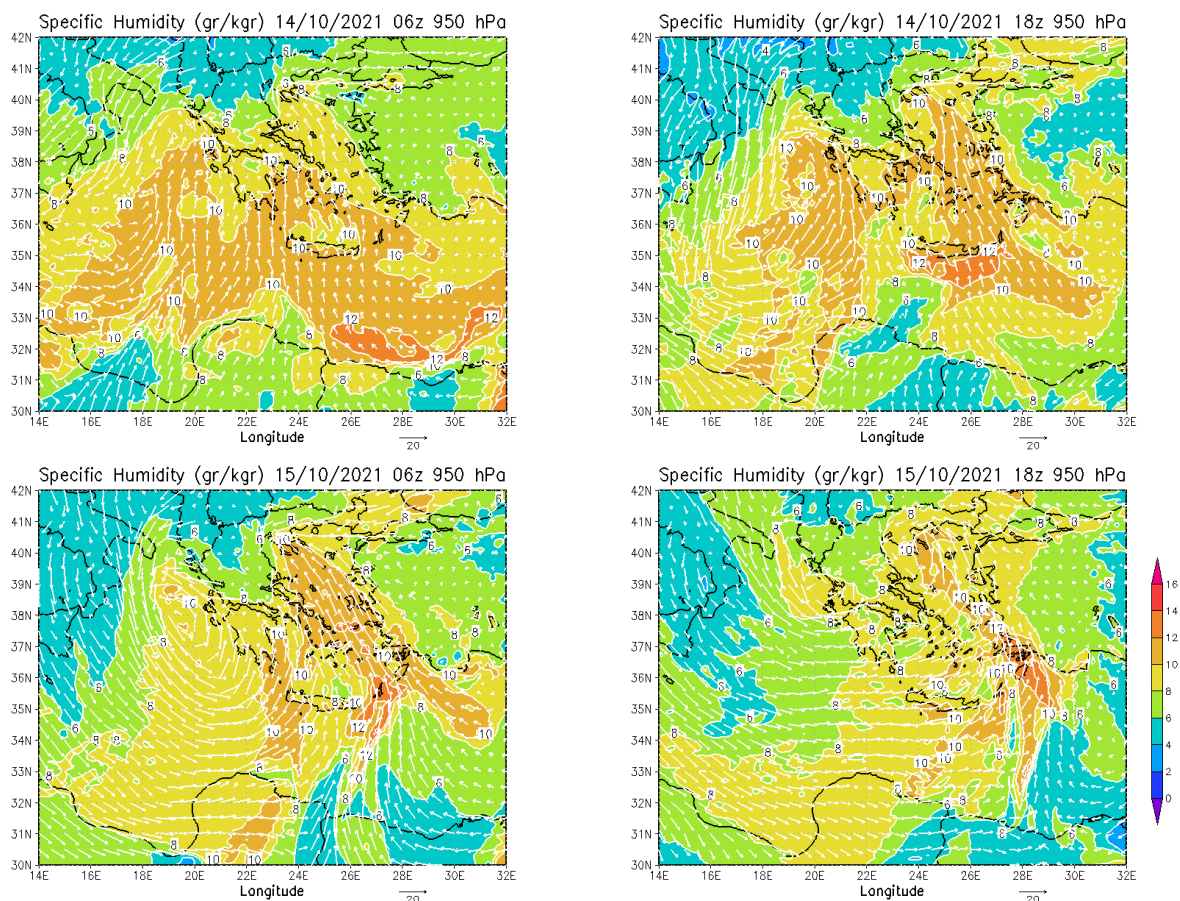


Σχήμα 3.17: Διαγράμματα hovmoller της ισοδύναμης δυναμικής θερμοκρασίας (K) και της απόκλισης ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) μεσοποιημένες στην περιοχή 40.0°N–41.0°N, 22.5°E–23.5°E (περιοχή 4) από 00 UTC στις 14/10 έως 00 UTC στις 16/10 (Δεδομένα ECMWF).

3.3.5 Διαγράμματα ειδικής υγρασίας και ανέμου

Στο Σχήμα 3.18 είναι εμφανής η οριζόντια μεταφορά (advection) υγρών αερίων μαζών από το νότιο Αιγαίο και νότιο Ιόνιο πέλαγος προς την κεντρική και βόρεια Ελλάδα. Επίσης, παρατηρείται η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υγρασίας, οι οποίες εισχωρούν σαν σφήνα προς το Βόρειο Αιγαίο και το Ιόνιο. Στις περιοχές αυτές παρατηρούνται τιμές ειδικής υγρασίας μεταξύ 10 gr/kg και 14 gr/kg (Σχήμα 3.18).

Σχετικά με το ανεμολογικό πεδίο στα 950 hPa, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το πως προέκυψε η σύγκλιση. Γενικά, η σύγκλιση μπορεί να δημιουργηθεί είτε από συρροή, δηλαδή να έρχεται ο άνεμος από διαφορετικές κατευθύνσεις και τελικά να συγκλίνει, είτε από ροή προς την ίδια κατεύθυνση. Είναι εμφανές ότι στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (40°B-41°B, 22.5°A-23.5°A) στις 14/10 και 15/10 στις 06 UTC έχουμε πολύ ισχυρή σύγκλιση, επειδή συντρέχουν και οι δύο παραπάνω παράγοντες (Σχήμα 3.18). Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με το διάγραμμα honmoller του πεδίου της απόκλισης (Σχήμα 3.17).

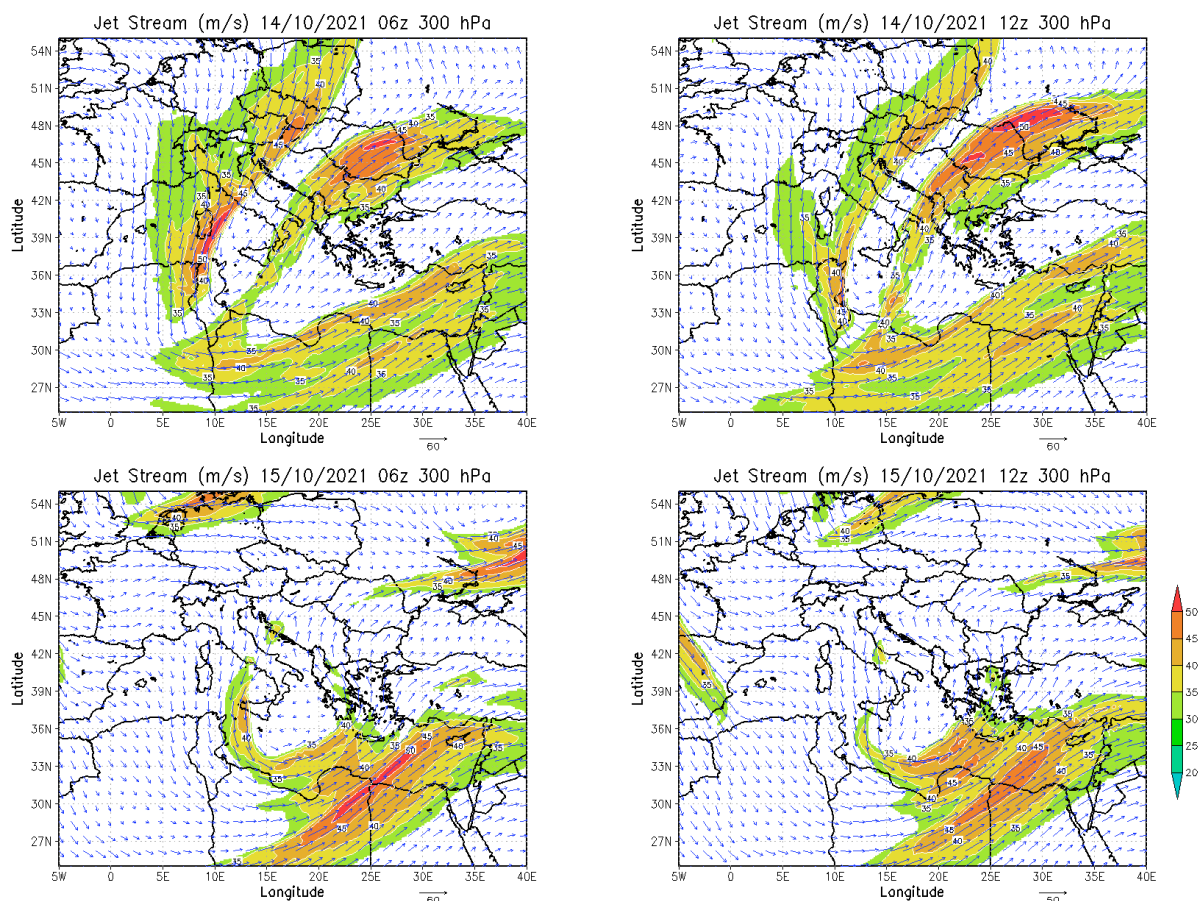


Σχήμα 3.18: Οριζόντιες τομές που απεικονίζουν το ανεμολογικό πεδίο και την ειδική υγρασία ($\times 10^{-2}$) στα 950 hPa στις 14/10 και 15/10 στις 06 και 18 UTC. Το διάνυσμα κάτω από κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 20 m/s (Δεδομένα: ECMWF).

3.3.6 Ανεμολογικό πεδίο στα 300 hPa

Ένα βασικό στοιχείο που εξετάζεται στους χάρτες των 300 hPa είναι η παρουσία αεροχειμάρρου. Η είσοδος του αεροχειμάρρου που μας ενδιαφέρει στις 14/10 στις 06 και 12 UTC βρίσκεται βόρεια της Ελλάδας. Επίσης, η βόρεια και δυτική Ελλάδα βρίσκεται δεξιά της εισόδου του μεγίστου του αεροχειμάρρου και εκεί αναμένεται να επικρατούν ανοδικές κινήσεις (Σχήμα 3.19). Αυτές οι ανοδικές κινήσεις αποτελούν συνεισφορά της συνοπτικής κυκλοφορίας του αεροχειμάρρου στο σύνολο των κατακόρυφων κινήσεων. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με την ισχυρή απόκλιση που παρατηρήθηκε στα διαγράμματα honmoller (Σχήμα 3.14 και 3.15) και συνάγεται τελικά ότι η απόκλιση οφείλεται και στην επίδραση του αεροχειμάρρου.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι πάνω από την περιοχή της κεντρικής Ιταλίας υπάρχει μία «γλώσσα» μικρών ταχυτήτων στις 14/10 στις 06 και 12 UTC (Σχήμα 3.19), οι οποίες είναι σε συμφωνία με την ύπαρξη ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης (Σχήμα 3.12), που αυτό συνεπάγεται την παρουσία ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό θα γίνει εμφανές και από την δορυφορική ανάλυση του κεφαλαίου 4, μέσω των δορυφορικών εικόνων στο κανάλι 5 των υδρατμών, οι οποίες υποδηλώνουν χαμηλά ποσά υγρασίας με το σκούρο γκρι χρώμα (Σχήμα 4.2). Εκεί υπήρχε στρατοσφαιρικός αέρας που κατέβηκε χαμηλά και ο αεροχειμάρρος βρίσκεται δίπλα στην ξηρή αέρια μάζα.



Σχήμα 3.19: Οριζόντιες τομές που απεικονίζουν το ανεμολογικό πεδίο (m/s) στα 300 hPa στις 14/10 και 15/10/2021 στις 06 και 12 UTC. Το διάνυσμα κάτω από κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 60 m/s για τις 14/10 06 και 12 UTC και 50 m/s για τις 15/10 06 UTC και 50 m/s για τις 15/10 12 UTC (Δεδομένα: ECMWF).

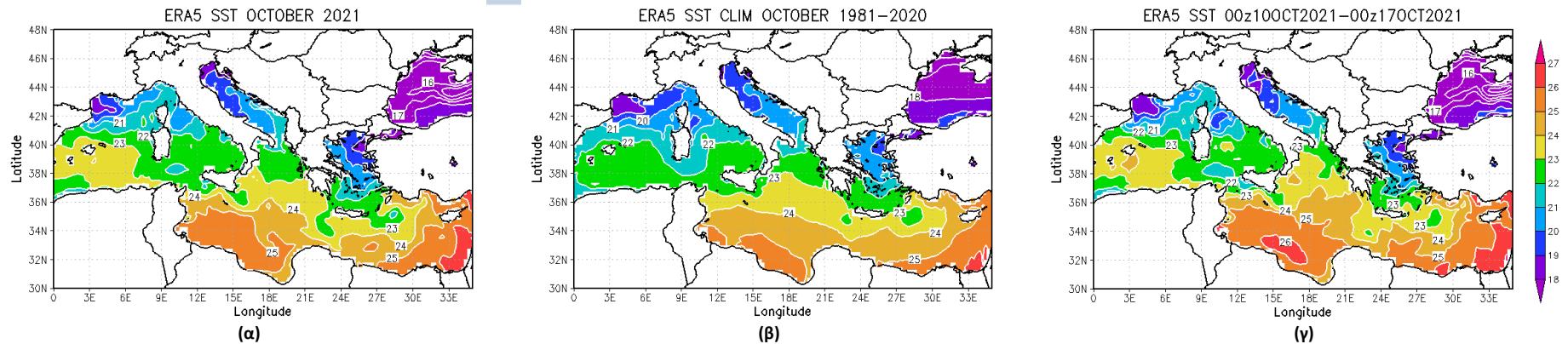
3.4 Επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας

Η ατμόσφαιρα επηρεάζεται από τις επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας (ΕΘΘ) με διάφορους τρόπους. Υπάρχουν διάφορες βάσεις δεδομένων ΕΘΘ, οι οποίες είναι διαθέσιμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα πρόγνωσης καιρού. Έχει δειχθεί από διάφορες μελέτες ότι οι επιφανειακές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στον καιρό και το κλίμα (Garratt, 1993; Pytharoulis, 2018b; Stathopoulos et al., 2020). Επίσης, οι ΕΘΘ καθορίζουν την πορεία και την εξέλιξη των καιρικών συστημάτων σε διάφορες κλίμακες (Pytharoulis, 2018b).

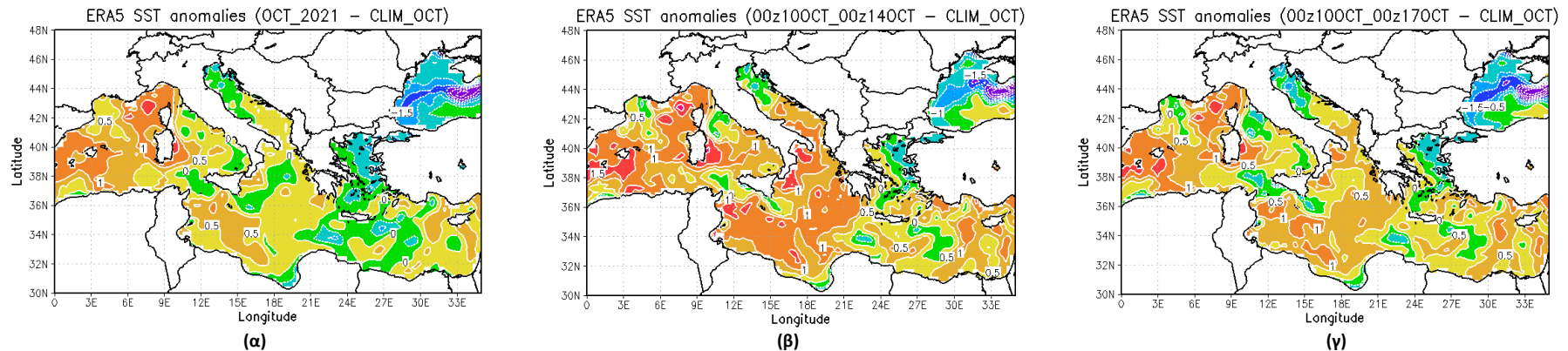
Για τη μελέτη της κλιματολογίας των ΕΘΘ για τον μήνα Οκτώβριο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) από την πλατφόρμα Climate Data Store του Copernicus. Η περίοδος αναφοράς είναι 40 έτη, από το 1981 έως το 2020. Στον χάρτη του Οκτωβρίου 2021 παρατηρούνται θερμοκρασίες από 18°C έως 26°C στην ανατολική Μεσόγειο, έως 25°C στην κεντρική και έως 24°C στη δυτική Μεσόγειο (Σχήμα 3.20α). Είναι εμφανές ότι οι θερμοκρασίες θάλασσας του Οκτωβρίου 2021 είναι υψηλότερες της περιόδου αναφοράς 1981-2020 (Σχήμα 3.20β) για το μεγαλύτερο μέρος της Μεσογείου με εξαίρεση το Αιγαίο Πέλαγος, τμήματα του Λιβυκού πελάγους και της θάλασσας του Λεβάντε, καθώς και την βόρεια Αδριατική θάλασσα (Σχήμα 3.21α). Τις ημέρες που επηρέασε ο Μπάλλος την Ελλάδα, παρατηρήθηκαν υψηλές θερμοκρασίες θάλασσας, όπου στον κόλπο της Σύρτης και στη θάλασσα του Λεβάντε έφτασαν και τοπικά ξεπέρασαν τους 26°C (Σχήμα 3.20γ).

Από τη διαφορά των ΕΘΘ μεταξύ των ημερών του φαινομένου και της περιόδου αναφοράς (1981-2020), παρατηρούνται κυρίως μεγαλύτερες θερμοκρασίες τις ημέρες του επεισοδίου. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες κυμαίνονται μεταξύ 0.5°C και 1.5°C σε όλη την έκταση της Μεσογείου (Σχήμα 3.21γ). Η Κεντρική Μεσόγειος και ιδιαίτερα το Ιόνιο Πέλαγος παρουσιάζει ανωμαλίες μεταξύ 0.5°C και 1°C. Στο μεγαλύτερο τμήμα του ανατολικού και κεντρικού Αιγαίου Πελάγους παρατηρούνται αρνητικές ανωμαλίες από -0.5°C έως -1°C τις ημέρες του φαινομένου (Σχήμα 3.21γ). Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι χαμηλότερες ΕΘΘ στο Αιγαίο Πέλαγος προϋπήρχαν του φαινομένου (Σχήμα 3.21β). Τις ημέρες πριν το φαινόμενο (10/10 00 UTC - 14/10 00 UTC) σημειώνονται γενικά υψηλότερες ΕΘΘ στη δυτική και κεντρική Μεσόγειο κατά 0.5°C (Σχήμα 3.21β).

Οι ανωμαλίες που παράχθηκαν από τη διαφορά των θερμοκρασιών θάλασσας του Οκτωβρίου 2021 μείον την κλιματολογία του Οκτωβρίου 1981-2020 είναι μικρότερες σε σχέση με την διαφορά των ημερών του φαινομένου, κατά περίπου 0.5°C σε όλη σχεδόν τη Μεσόγειο (Σχήμα 3.21α). Αυτό οφείλεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες θάλασσας που επικρατούσαν κατά τις ημέρες του επεισοδίου σε σχέση με το σύνολο των ημερών του Οκτωβρίου.



Σχήμα 3.20: Μέσες θερμοκρασίες (°C) επιφάνειας της θάλασσας (α) του Οκτωβρίου 2021, (β) του Οκτωβρίου για την περίοδο αναφοράς 1981-2020 και (γ) για την ευρύτερη περίοδο του φαινομένου 10/10/2021 00 UTC - 17/10/2021 00 UTC (Δεδομένα: ERA5).



Σχήμα 3.21: Ανωμαλίες θερμοκρασιών (°C) επιφάνειας της θάλασσας (α) του Οκτωβρίου 2021, (β) των ημερών πριν το φαινόμενο (10/10 00 UTC - 14/10 00 UTC) και γ) της ευρύτερης περιόδου του φαινομένου (10/10/2021 00 UTC - 17/10/2021 00 UTC) από την κλιματολογική περίοδο αναφοράς του Οκτωβρίου 1981-2020 (Δεδομένα: ERA5).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

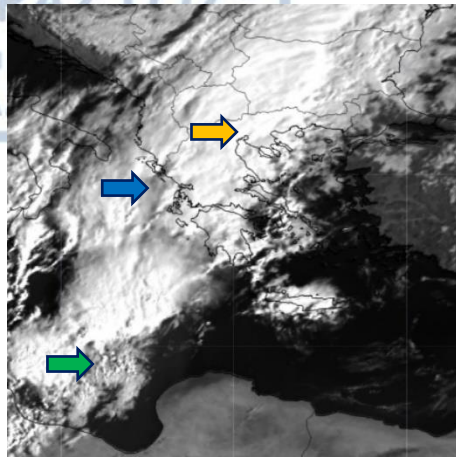
Για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων θα χωριστεί η ανάλυση σε δύο σκέλη. Το 1ο σκέλος θα αφορά τα δορυφορικά δεδομένα των μεμονωμένων καναλιών του MSG, ενώ το 2ο σκέλος θα αναφέρεται στις δορυφορικές εικόνες που προέρχονται από τους συνδυασμούς RGB.

4.1 Μεμονωμένα κανάλια του MSG

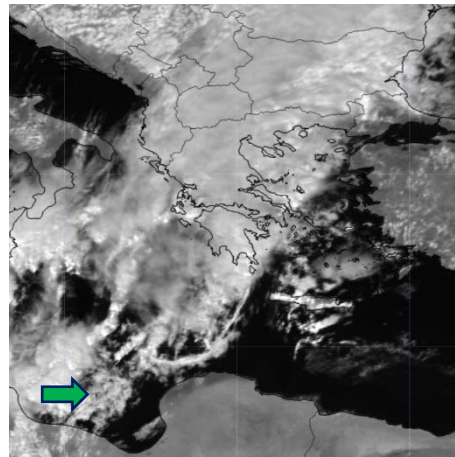
4.1.1 Κανάλι 2 - Ορατό φάσμα με κέντρο στα 0.8 μm (VIS0.8)

Το κανάλι 2 αντιπροσωπεύει τη φασματική περιοχή του ορατού από τα 0.7 έως τα 0.9 μm με κέντρο τα 0.8 μm . Για το συγκεκριμένο κανάλι υπάρχουν διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες μόνο τις ώρες 06:00 UTC και 12:00 UTC, επειδή το ορατό φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο Σχήμα 4.1 εντοπίζεται η εμφάνιση νεφών μεγάλου οπτικού πάχους με μεγάλη ανακλαστικότητα (πιθανά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης) με προέλευση από την Αδριατική Θάλασσα, το Ιόνιο Πέλαγος και τα Βαλκάνια στις 14/10/2021 στις 06:00 UTC. Παρατηρείται ότι μεγάλο τμήμα της Ελλάδας καλύπτεται από νεφώσεις.

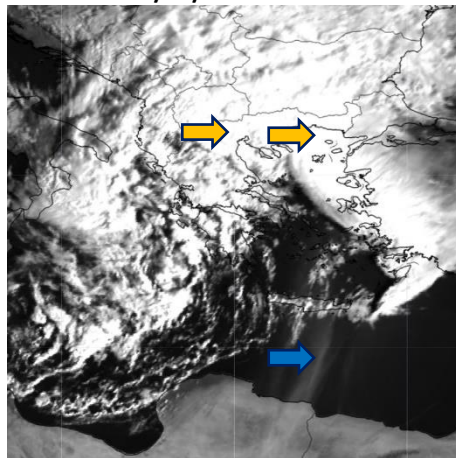
Τα νέφη που απαρτίζουν αυτό το σύστημα είναι κυρίως τύπου Cumulonimbus με τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους στις δορυφορικές εικόνες να είναι η μεγάλη λευκαύγεια καθώς επίσης οι σκιάσεις και οι ανώμαλες κορυφές. Διάσπαρτα νέφη cirrus και νέφη stratocumulus διακρίνονται στο Ιόνιο και στο Αιγαίο Πέλαγος καθώς και στον κόλπο της Σύρτης. Τα νέφη stratocumulus εμφανίζουν κλειστή κυψελοειδή μορφή πάνω από θαλάσσιες περιοχές (Φείδας, 2010). Στις 15/10 στις 06 και 12 UTC, παρατηρούνται πολύ πυκνά νέφη στη βόρεια Ελλάδα καθώς και στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου. Αντίθετα, στην περιοχή των Κυκλάδων εμφανίζονται λίγα νέφη (Σχήμα 4.1).



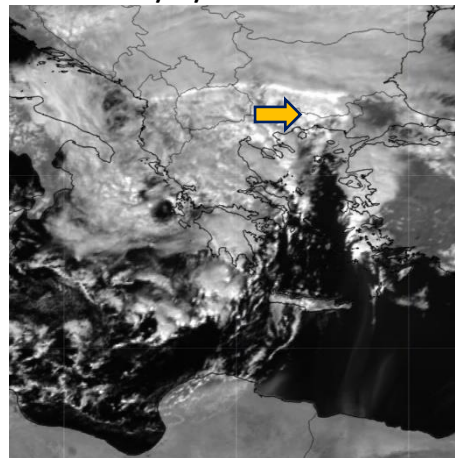
14/10/2021 06 UTC



14/10/2021 12 UTC



15/10/2021 06 UTC



15/10/2021 12 UTC

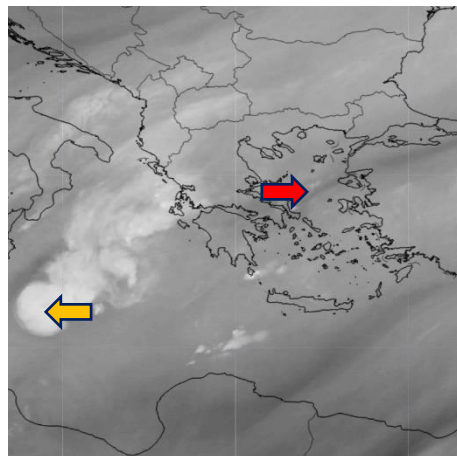
Σχήμα 4.1: Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι 2 του ορατού φάσματος με κέντρο στα 0.8 μm πάνω από την περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και 15/10/2021 (06 και 12 UTC). Τα πορτοκαλί βέλη δείχνουν τα νέφη μεγάλου οπτικού πάχους (πιθανά νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης), τα μπλε βέλη δείχνουν τα υψηλά νέφη cirrus και τα πράσινα βέλη δείχνουν νέφη stratocumulus (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).

4.1.2 Κανάλι 5 - Κανάλι υδρατμών (υπέρυθρο φάσμα) με κέντρο στα 6.2 μm (WV6.2)

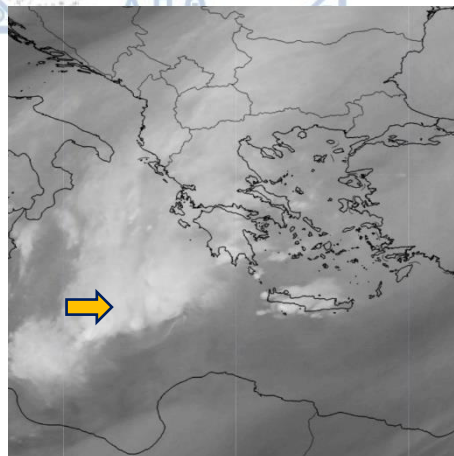
Το κανάλι 5 καταγράφει στην φασματική περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει η Γη και η ατμόσφαιρα από τα 5.5 έως τα 6.5 μm περίπου με κέντρο στα 6.2 μm . Οι δορυφορικές εικόνες στο κανάλι 5 των υδρατμών είναι πολύ σημαντικές και χρήσιμες καθώς πέρα από τον εντοπισμό του ποσού υγρασίας, δίνεται η δυνατότητα για τη μελέτη της δυναμικής κατάστασης στην ανώτερη τροπόσφαιρα, σε αντίθεση με το κανάλι 6 που είναι αντιπροσωπευτικό για τη μέση τροπόσφαιρα (Δημητριάδου, 2017). Έτσι απεικονίζονται, αν υπάρχουν, δυναμικές ανωμαλίες της τροπόπαυσης (1.5-2 PVU) με πολύ σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Κάτω από αυτές τις ανωμαλίες πραγματοποιούνται καθοδικές κινήσεις του αέρα στην ανώτερη και μέση τροπόσφαιρα, ενώ μπροστά από αυτές εντοπίζονται ανοδικές κινήσεις. Επίσης, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης των αεροχειμάρρων, οι οποίοι εμφανίζονται ως ένα απότομο όριο στην εικόνα των υδρατμών μεταξύ περιοχών με διαφορετική υγρασία και συνδέεται με ισχυρή βαθμίδα των υψών της δυναμικής τροπόπαυσης, δηλαδή οι ισοϋψείς σε αυτή την περιοχή του ορίου είναι πολύ πυκνές. Αυτό το όριο υποδεικνύει και την περιοχή με τις μεγαλύτερες εντάσεις του αεροχειμάρρου στην ανώτερη τροπόσφαιρα.

Στις 00:00 UTC στις 14/10/2021 παρατηρούνται υψηλά ποσά υγρασίας στη θαλάσσια περιοχή ανάμεσα στη Σικελία και την Ελλάδα. Τις επόμενες ώρες και συγκεκριμένα στις 06, 12 και 18 UTC, υψηλές τιμές υγρασίας με τις πιο έντονες λευκές αποχρώσεις απεικονίζονται σε ολόκληρη σχεδόν την Ελλάδα με την σταδιακή παρουσία νεφών κατακόρυφης ανάπτυξης (Σχήμα 4.2). Στις 00:00 UTC στις 15/10, τα νέφη πυκνώνουν αρκετά και εντοπίζονται κυρίως στην κεντρική και νότια Ελλάδα, στο Ιόνιο καθώς και στην Κρήτη καθιστώντας το μεγαλύτερο μέρος της χώρας μια ζώνη με πολύ υψηλά ποσά υγρασίας στα 300 hPa, όπως απεικονίζονται αυτά με τις πολύ ανοικτές αποχρώσεις καθώς και με τα φωτεινά λευκά νέφη (Σχήμα 4.2).

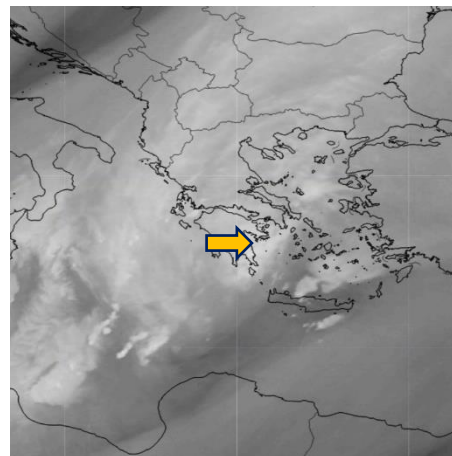
Στις 15/10 στις 06:00 UTC και 12:00 UTC, το σύστημα φαίνεται να κινείται ΑΒΑ, με αποτέλεσμα η μεγάλη υγρασία να διατηρείται και να εντείνεται στο ανατολικό τμήμα της χώρας, επηρεάζοντας περιοχές της Θράκης και των νησιών του ΒΑ Αιγαίου. Επίσης, στις 00:00 UTC διακρίνεται ένα όριο υγρασίας στη θαλάσσια περιοχή δυτικά της Πελοποννήσου και της Κρήτης, ενώ στις 06:00 UTC το όριο αυτό μετατοπίζεται πιο ανατολικά, γίνεται πιο έντονο-εμφανές και εντοπίζεται μεταξύ των Κυκλάδων και των νησιών του ΒΑ Αιγαίου, υποδηλώνοντας πιο ισχυρές ταχύτητες του αεροχειμάρρου. Στις Κυκλάδες παρατηρούνται πιο σκούρες αποχρώσεις του γκρι, οι οποίες υποδηλώνουν χαμηλά ποσά υγρασίας και ένδειξη ανωμαλίας της δυναμικής τροπόπαυσης (Σχήμα 4.2). Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τους χάρτες της δυναμικής τροπόπαυσης στις 15/10 06 UTC (Σχήμα 3.12).



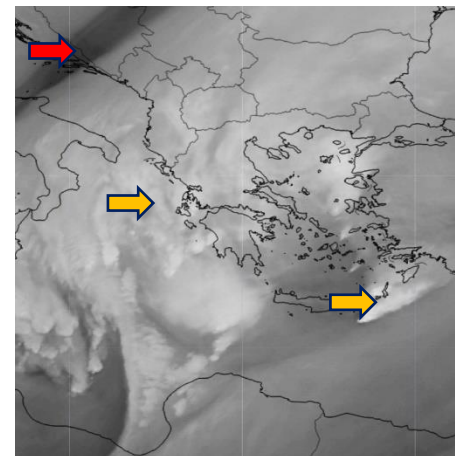
14/10/2021 00 UTC



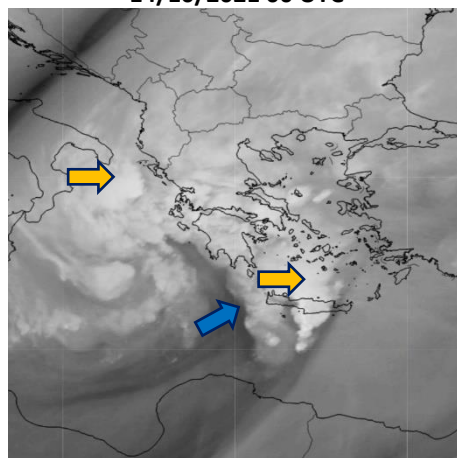
14/10/2021 06 UTC



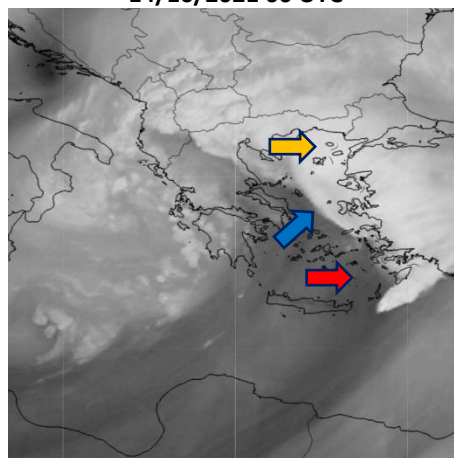
14/10/2021 12 UTC



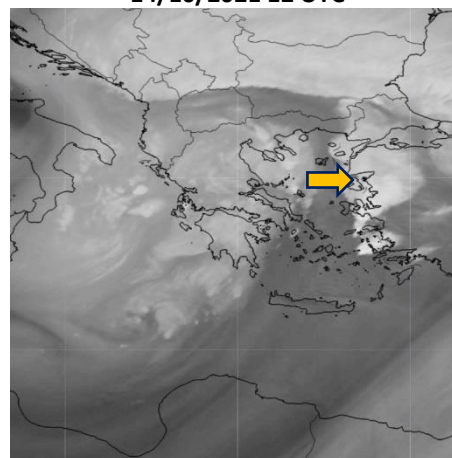
14/10/2021 18 UTC



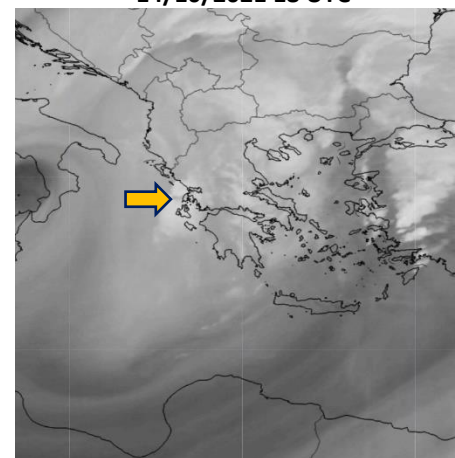
15/10/2021 00 UTC



15/10/2021 06 UTC

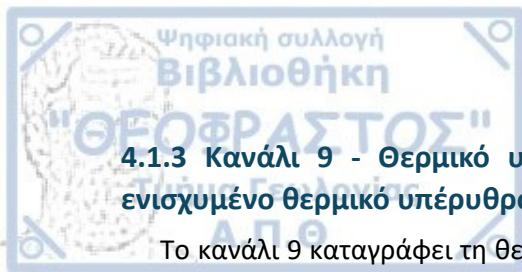


15/10/2021 12 UTC



15/10/2021 18 UTC

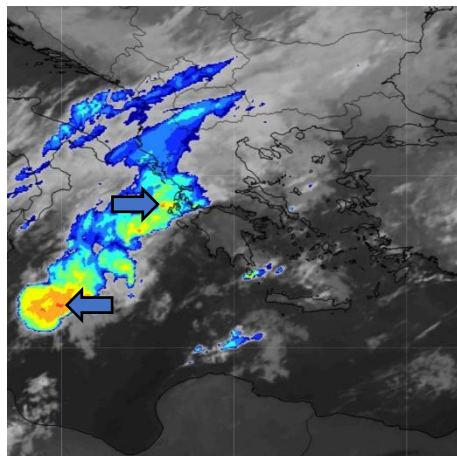
Σχήμα 4.2: Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι 5 των υδρατμών με κέντρο στα 6.2 μm στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και 15/10/2021 (00, 06, 12 και 18 UTC). Τα πορτοκαλί βέλη δείχνουν τις κορυφές των νεφών που βρίσκονται σε μεγάλα ύψη καθώς και τις περιοχές με υψηλά ποσά υγρασίας, τα κόκκινα βέλη δείχνουν χαμηλά ποσά υγρασίας, ενώ τα μπλε βέλη δείχνουν το όριο υγρασίας που έχει σχηματιστεί στην ΝΑ Ελλάδα (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).



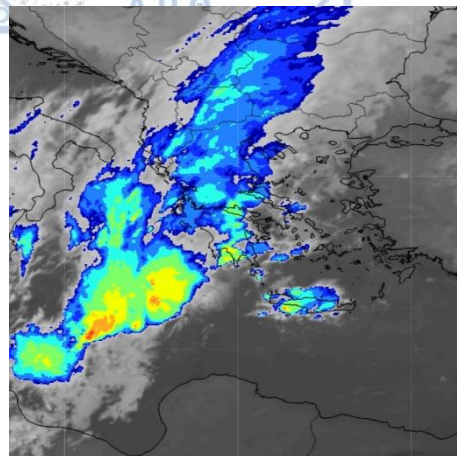
4.1.3 Κανάλι 9 - Θερμικό υπέρυθρο φάσμα με κέντρο στα 10.8 μm (IR10.8) και ενισχυμένο θερμικό υπέρυθρο

Το κανάλι 9 καταγράφει τη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια της Γης και η ατμόσφαιρα στο φάσμα του ατμοσφαιρικού παραθύρου από τα 10 έως τα 11.5 μm με κέντρο τα 10.8 μm .

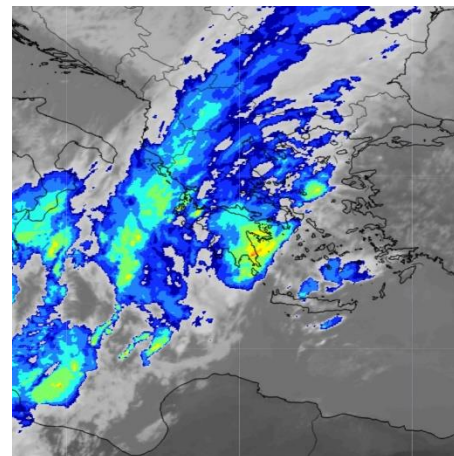
Στις 00:00 UTC και στις 06:00 UTC στις 14/10 διακρίνονται πυκνά και υψηλά νέφη με μεγάλη λαμπρότητα και σχετικά ψυχρές κορυφές [με θερμοκρασίες περίπου 220 K (-53°C) - 230 K (-43°C)] στο Ιόνιο Πέλαγος καθώς και στο μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής Ελλάδας προερχόμενα από την περιοχή της Ιταλίας και την κεντρική Μεσόγειο (Σχήμα 4.3). Τις επόμενες ώρες (12 και 18 UTC), αυτά τα νεφικά συστήματα κατακόρυφης ανάπτυξης εξαπλώνονται και στην υπόλοιπη Ελλάδα κινούμενα ανατολικότερα. Στις 15/10 στις 00:00 UTC παρατηρούνται νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με πολύ ψυχρές κορυφές [θερμοκρασίες περίπου 210 K (-63°C) - 220 K (-53°C)] στο Ιόνιο Πέλαγος (Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ιθάκη), στη Στερεά Ελλάδα, στην Εύβοια και στην Κρήτη. Από τη ραδιοβόλιση της Αθήνας στις 15/10 00 UTC, οι θερμοκρασίες αυτές αντιστοιχούν σε ύψος περίπου 10 km, δηλαδή κοντά στα 250 hPa. Πρόκειται για ένα καλά οργανωμένο σύστημα, το οποίο προκάλεσε σημαντικές πλημμύρες στις περιοχές που έπληξε. Το σύστημα αυτό κινείται ΑΒΑ και στις 06:00 UTC φτάνει στη Θράκη και στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου επηρεάζοντας έντονα τη Λήμνο, τη Θάσο και τη Σαμοθράκη (Σχήμα 4.3). Στις 12:00 UTC και 18:00 UTC η συμπαγής νεφική μάζα αρχίζει σταδιακά να διαλύεται.



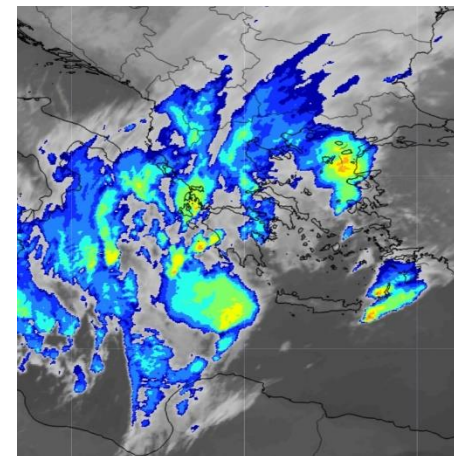
14/10/2021 00 UTC



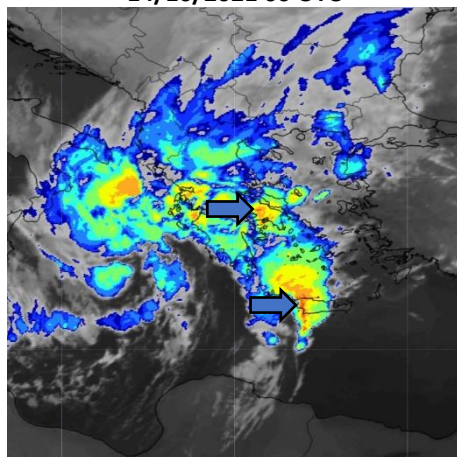
14/10/2021 06 UTC



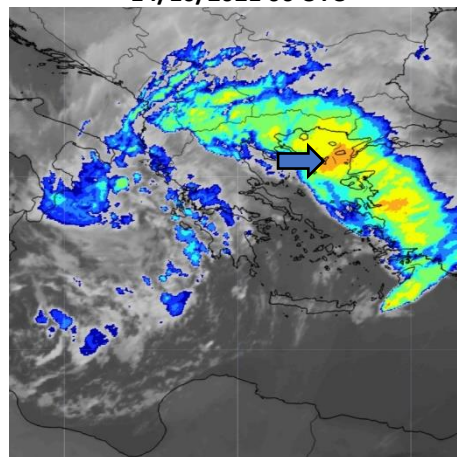
14/10/2021 12 UTC



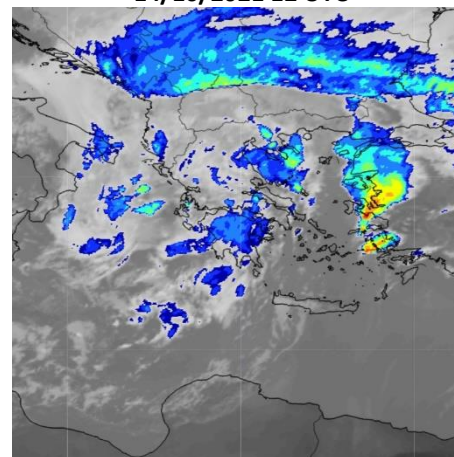
14/10/2021 18 UTC



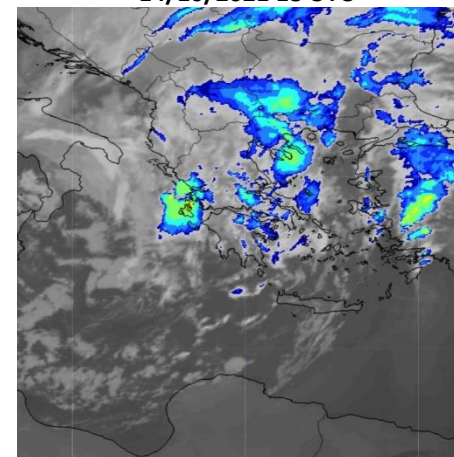
15/10/2021 00 UTC



15/10/2021 06 UTC



15/10/2021 12 UTC



15/10/2021 18 UTC



Χρωματική κλίμακα που δείχνει την θερμοκρασία της κορυφής των νεφών

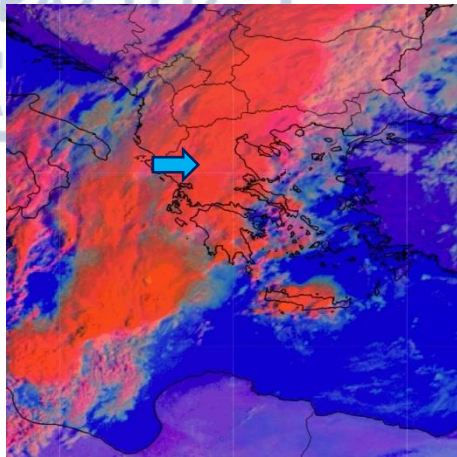
Σχήμα 4.3: Δορυφορικές εικόνες στο κανάλι 9 του θερμικού υπέρυθρου με κέντρο στα 10.8 μm σε συνδυασμό με το ενισχυμένο θερμικό υπέρυθρο στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και στις 15/10/2021 (00, 06, 12 και 18 UTC). Τα μπλε βέλη δείχνουν τις πολύ ψυχρές κορυφές των νεφών (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).

4.2 Συνδυασμός καναλιών RGB

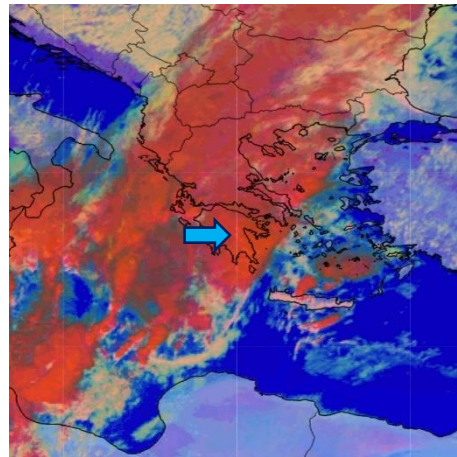
4.2.1 Συνδυασμός RGB 2-4-9 - Day Microphysics

Στον συγκεκριμένο συνδυασμό RGB αντιστοιχίζεται το κανάλι 2 (VIS0.8) με το κόκκινο χρώμα, το κανάλι 4 (MIR3.9) με το πράσινο χρώμα και το κανάλι 9 (IR10.8) με το μπλε χρώμα (Δημητριάδου, 2017). Τυπικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προκύψουν από την ερμηνεία των χρωμάτων είναι τα εξής: το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί σε παχιά και πυκνά υετοφόρα νέφη, το σκούρο καφέ σε νέφη cirrus με μεγάλους κρυστάλλους, το πράσινο χρώμα σε νέφη που αποτελούνται από μικρές υδροσταγόνες σε υπέρτηξη και το ροζ χρώμα σε χιονοσκεπείς περιοχές (<http://eumetrain.org/>).

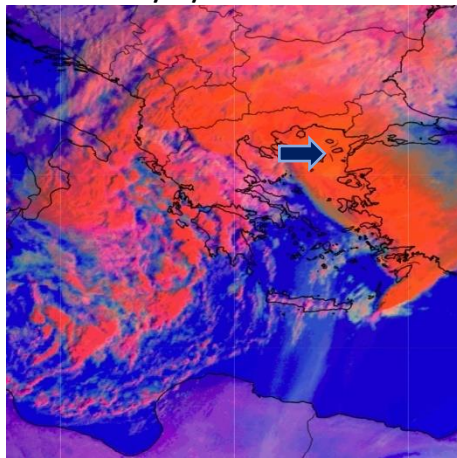
Στις 06:00 UTC και στις 12:00 UTC στις 14/10 παρατηρούνται νέφη με κόκκινο-καφέ χρώμα σε όλη σχεδόν την ηπειρωτική Ελλάδα (Σχήμα 4.4). Οι χρωματισμοί αυτοί (κόκκινο-καφέ) υποδηλώνουν την παρουσία νεφών Cumulonimbus που δημιουργούνται από ισχυρές ανοδικές κινήσεις και αποτελούνται από μικρά παγοκρυστάλλια στην κορυφή τους. Στις 06:00 UTC στις 15/10, το σύστημα κινείται ανατολικά και επηρεάζει την κεντρική και ανατολική Μακεδονία, την Θράκη και τα νησιά του ΒΑ Αιγαίου, ενώ οι αποχρώσεις των νεφών γίνονται πιο ανοιχτόχρωμες (πορτοκαλί χρώμα). Αυτές οι έντονες αποχρώσεις του πορτοκαλί στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου υποδηλώνουν ψυχρά νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος και μεγάλους παγοκρυστάλλους. Οι μεγάλοι παγοκρύσταλλοι δείχνουν ότι το σύστημα αυτό με τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης χαρακτηρίζεται από σχετικά ασθενή ανοδικά ρεύματα. Στις 12:00 UTC στις 15/10, η νεφική αυτή μάζα αρχίζει να αποδιοργανώνεται, και τα νέφη περιορίζονται στην περιοχή των Σποράδων και στο ανατολικό Αιγαίο (Σχήμα 4.4).



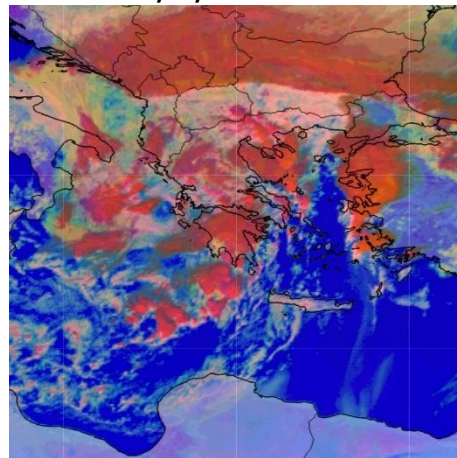
14/10/2021 06 UTC



14/10/2021 12 UTC



15/10/2021 06 UTC



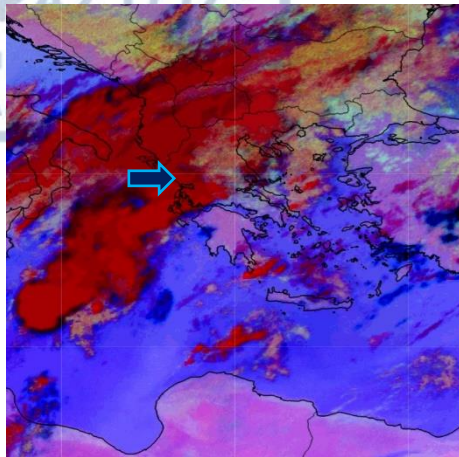
15/10/2021 12 UTC

Σχήμα 4.4: Δορυφορικές εικόνες του συνδυασμού RGB 2-4-9 (Day Microphysics) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και 15/10/2021 (06 και 12 UTC). Τα γαλάζια βέλη στις 06 και 12 UTC στις 14/10 δείχνουν τα νέφη με τους μικρούς παγοκρυστάλλους, ενώ τα σκούρα μπλε βέλη στις 06 UTC στις 15/10 δείχνουν τα ψυχρά νέφη με τους μεγάλους παγοκρυστάλλους (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).

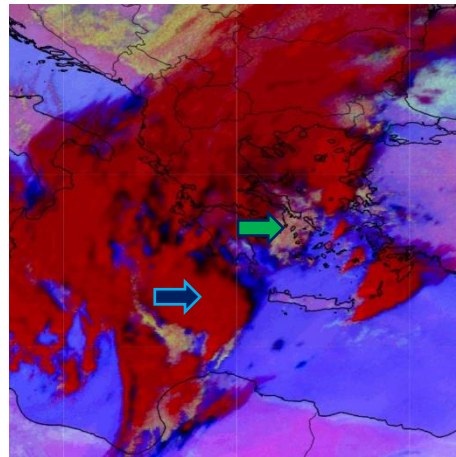
4.2.2 Συνδυασμός RGB (9-10, 4-9, 9) - Night Microphysics

Ο συνδυασμός RGB Night Microphysics αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς καναλιών του υπέρυθρου φάσματος και συγκεκριμένα από δύο διαφορές καναλιών και ένα μεμονωμένο κανάλι. Τυπικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προκύψουν από την ερμηνεία των αποχρώσεων είναι τα εξής: οι κόκκινες αποχρώσεις απεικονίζουν νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος όπως τα νέφη Cumulonimbus, οι σκούρες μπλε απεικονίζουν τα υψηλά και λεπτά νέφη cirrus, οι καφέ μεσαία νέφη, ενώ οι ροζ χαμηλά νέφη. Το έδαφος διακρίνεται με μπλε ή μωβ αποχρώσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία του, ενώ η θάλασσα με διάφορους τόνους του μπλε (<http://eumetrain.org/>).

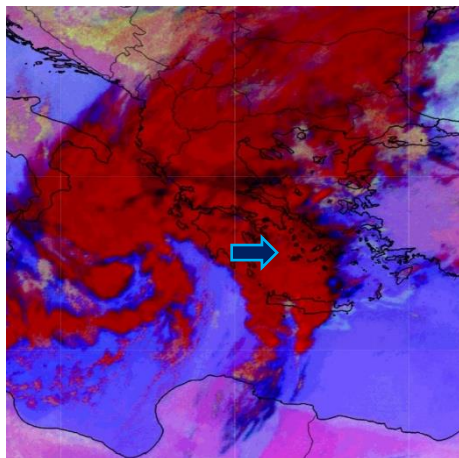
Στις παρακάτω δορυφορικές εικόνες (Σχήμα 4.5) είναι εμφανής η παρουσία των κόκκινων αποχρώσεων στο συνδυασμό καναλιών RGB (9-10, 4-9, 9) – Night Microphysics. Στον συγκεκριμένο συνδυασμό επιλέγονται οι νυκτερινές ώρες. Συγκεκριμένα, στις 14/10 στις 00:00 UTC είναι εμφανής μια εκτεταμένη νεφική μάζα, η οποία προερχόμενη από την περιοχή της Ιταλίας και της κεντρικής Μεσογείου, επηρεάζει τη δυτική Ελλάδα (Σχήμα 4.5). Στις 18:00 UTC παρατηρείται ότι έχει καλυφθεί σχεδόν ολόκληρη η Ελλάδα από παχιά νέφη Cumulonimbus (έντονο κόκκινο χρώμα) και σε λίγες περιοχές διακρίνονται χαμηλά νέφη (μπεζ-ροζ χρώμα) όπως για παράδειγμα στη νότια Εύβοια και στις βόρειες Σποράδες. Τα νεφικά αυτά συστήματα έχουν επεκταθεί έως τις 15/10 στις 00:00 UTC και στις περιοχές την νότιας Ελλάδας και συγκεκριμένα στις Κυκλάδες και στην Κρήτη. Τέλος, στις 15/10 στις 18:00 UTC, το σύστημα έχει αρχίσει να αποδιοργανώνεται (Σχήμα 4.5).



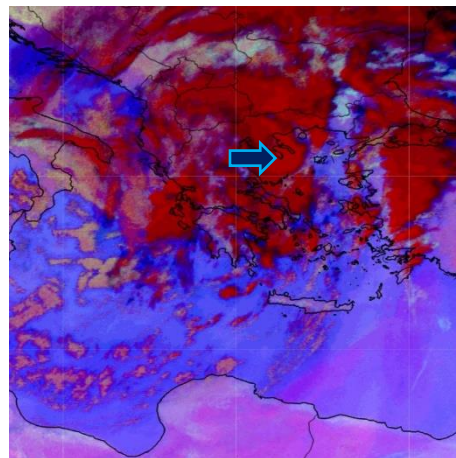
14/10/2021 00 UTC



14/10/2021 18 UTC



15/10/2021 00 UTC



15/10/2021 18 UTC

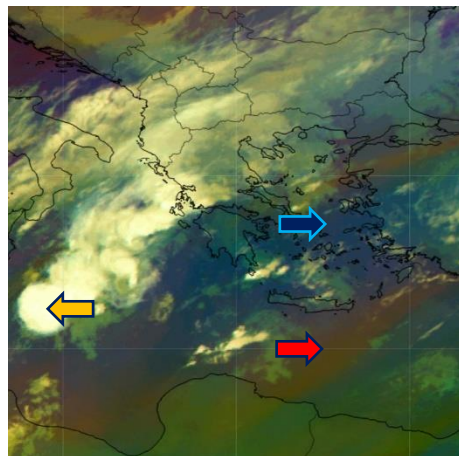
Σχήμα 4.5: Δορυφορικές εικόνες του συνδυασμού RGB (9-10, 4-9, 9) (Night Microphysics) στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και 15/10/2021 (00 και 18 UTC). Τα σκούρα μπλε βέλη απεικονίζουν τα νέφη Cumulonimbus και τα πράσινα βέλη τα χαμηλά νέφη (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).

4.2.3 Συνδυασμός RGB (5-6, 8-9, 5) - Airmass

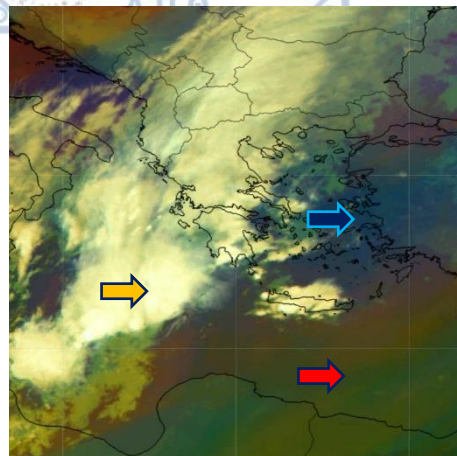
Αυτός ο συνδυασμός RGB περιλαμβάνει τον συνδυασμό των διαφορών δύο καναλιών (WV6.2-WV7.3) - (IR8.7-IR10.8) και ενός μεμονωμένου καναλιού (WV6.2). Τυπικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προκύψουν από την ερμηνεία των αποχρώσεων σε αυτό τον συνδυασμό είναι τα εξής: το λευκό χρώμα αντιστοιχεί σε νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος, το πράσινο χρώμα σε θερμές αέριες μάζες, το μπλε χρώμα σε ψυχρές αέριες μάζες και το σκούρο κόκκινο/καφέ σε ξηρό στρατοσφαιρικό αέρα και δυναμικές ανωμαλίες της τροπόπαυσης (<http://eumetrain.org/>).

Στο Σχήμα 4.6 στις 14/10 (00 και 06 UTC) παρατηρείται η ύπαρξη θερμών αερίων μαζών με τις πράσινες αποχρώσεις στη θαλάσσια περιοχή νότια της Κρήτης καθώς και των ψυχρών αερίων μαζών με τις μπλε-μωβ αποχρώσεις στο μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας. Τις επόμενες ώρες (12 και 18 UTC) της ίδιας ημέρας αρχίζει να έρχεται με κατεύθυνση από τα δυτικά προς την Ελλάδα ένα ψυχρό μέτωπο. Στα Δυτικά Βαλκάνια, στη νότια νησιωτική Ελλάδα και στην Κρήτη παρατηρούνται κόκκινες/καφέ αποχρώσεις που δηλώνουν μεγάλες τιμές δυναμικού στροβιλισμού. Αυτό συμφωνεί με τους χάρτες της δυναμικής τροπόπαυσης (Σχήμα 3.12) καθώς και με το κανάλι 5 των υδρατμών (Σχήμα 4.2). Στις 15/10 στις 00:00 UTC, το μέτωπο εντοπίζεται στα δυτικά της Πελοποννήσου με τις ψυχρές αέριες μάζες (μπλε-μωβ χρώμα) να ακολουθούν τις θερμές (πράσινο χρώμα). Στις 06, 12 και 18 UTC, η έκταση του ψυχρού μετώπου αυξάνεται και καλύπτει όλη την Ελλάδα, διαιρώντας την σε δύο τμήματα με τον ψυχρό τομέα να καλύπτει τις περισσότερες ηπειρωτικές περιοχές και τον θερμό να καταλαμβάνει την Θράκη, τα νησιά του ΒΑ Αιγαίου, τις Κυκλάδες, τα Δωδεκάνησα και την Κρήτη (Σχήμα 4.6). Ο ξηρός αέρας με τις καφέ αποχρώσεις καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της νότιας και ανατολικής Ελλάδας, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις δορυφορικές εικόνες στο κανάλι 5 των υδρατμών. Οι θέσεις των μετώπων που παρατηρούνται στις δορυφορικές εικόνες στις 15/10 συμφωνούν με τους συνοπτικούς χάρτες επιφανείας του UKMET (Σχήμα 3.5).

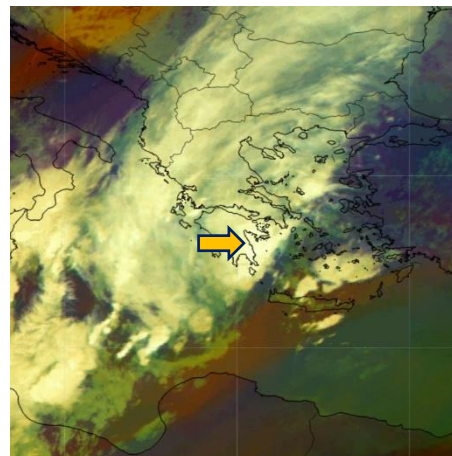
Αναφορικά με τα νέφη, παρατηρούνται λευκές αποχρώσεις στις 14/10 στις 00 και 06 UTC κυρίως στη δυτική Ελλάδα καθώς και στα ανοικτά του Ιονίου Πελάγους και της Πελοποννήσου, που υποδηλώνουν νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος των οποίων η κορυφή βρίσκεται υψηλά στην τροπόσφαιρα. Στις 12 UTC τα νέφη εξαπλώνονται και σε περιοχές της ανατολικής Ελλάδας, ενώ στις 18 UTC σημειώνονται έντονα λευκοί χρωματισμοί στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου και νότια της Πελοποννήσου. Στις 15/10 στις 00 UTC με τον παράλληλο σχηματισμό του ψυχρού μετώπου, τα πιο πυκνά νέφη παρατηρούνται στη Στερεά Ελλάδα, στην Πελοπόννησο και στην Κρήτη. Στις 06 και 12 UTC το σύστημα κινείται ανατολικότερα, με τα νέφη να εντοπίζονται στην Χαλκιδική, στην Θράκη και στα νησιά του ΒΑ Αιγαίου με έντονες πλημμύρες στις περιοχές αυτές. Στις 18 UTC το σύστημα εξασθενεί και τα νέφη υποχωρούν (Σχήμα 4.6).



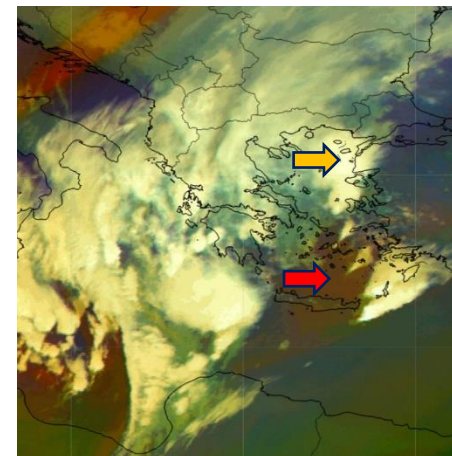
14/10/2021 00 UTC



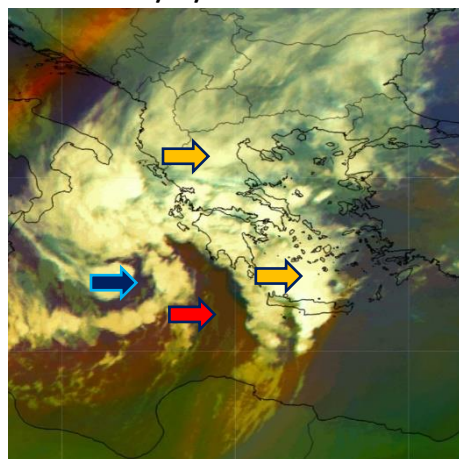
14/10/2021 06 UTC



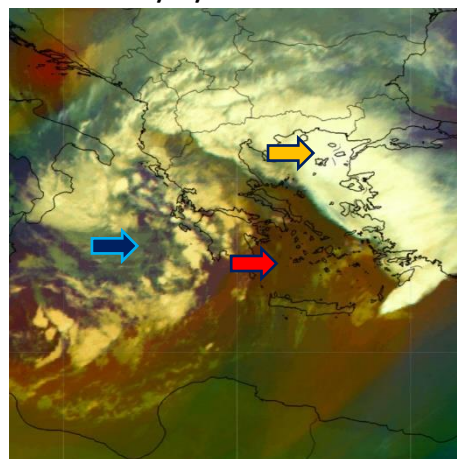
14/10/2021 12 UTC



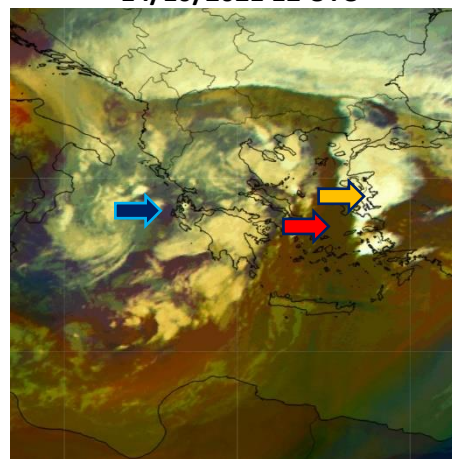
14/10/2021 18 UTC



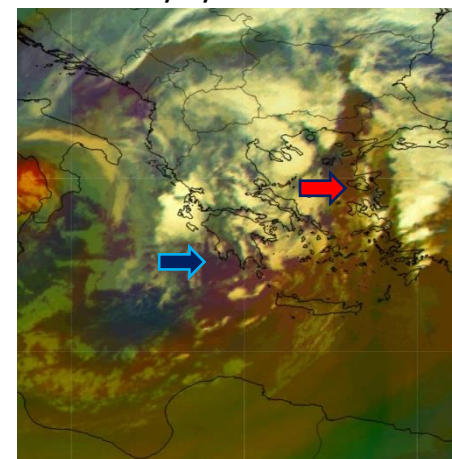
15/10/2021 00 UTC



15/10/2021 06 UTC



15/10/2021 12 UTC

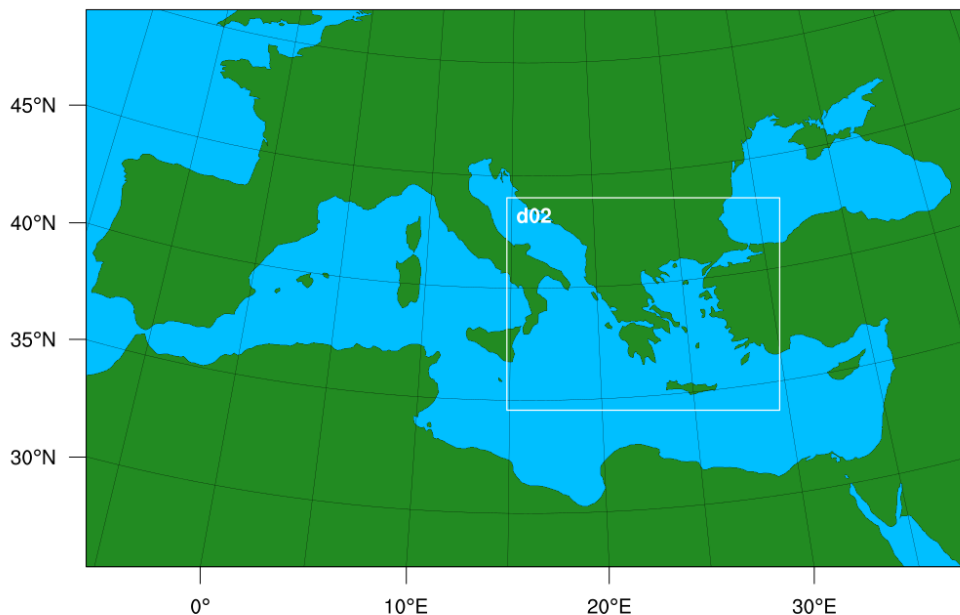


15/10/2021 18 UTC

Σχήμα 4.6: Δορυφορικές εικόνες του συνδυασμού RGB (5-6, 8-9, 5) που δείχνει τις αέριες μάζες καθώς και τα νέφη με μεγάλο οπτικό πάχος στην περιοχή της ΝΑ Ευρώπης με επίκεντρο την Ελλάδα στις 14/10 και 15/10/2021 (00, 06, 12 και 18 UTC). Τα μπλε βέλη δείχνουν τις ψυχρές αέριες μάζες, τα κόκκινα βέλη τις θερμές, ενώ τα πορτοκαλί βέλη δείχνουν τα νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης με μεγάλο οπτικό πάχος (Πηγή: <http://212.232.25.232/ng-maps/>).

Το μοντέλο WRF μπορεί να ολοκληρωθεί σε πλέγματα με σκοπό την καλύτερη χωρική ανάλυση στην περιοχή ενδιαφέροντος. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ευαισθησίας στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν δύο πλέγματα. Το εξωτερικό πλέγμα (d01) έχει οριζόντια χωρική διακριτοποίηση 6km x 6km και το εσωτερικό-εμφωλευμένο (d02) 2km x 2km με προβολή Lambert Conformal. Τα δύο πλέγματα είναι αμφίδρομα (2-way nested interaction), δηλαδή το εσωτερικό πλέγμα (d02) παίρνει και δίνει πληροφορίες στο εξωτερικό (d01) (feedback=1). Η περιοχή 1 (d01) περιλαμβάνει ολόκληρη τη Μεσόγειο, την Κεντρική και Νότια Ευρώπη, τη βόρεια Αφρική και τμήμα της ανατολικής Ασίας, ενώ η περιοχή 2 (d02) καλύπτει την Ελλάδα, την νότια Ιταλία, τη Δυτική Τουρκία καθώς και τμήμα των Βαλκανίων (Σχήμα 5.1).

WPS Domain Configuration



Σχήμα 5.1: Οι περιοχές ολοκλήρωσης (domains) του μοντέλου WRF που χρησιμοποιήθηκαν.

5.2 Επιλογή του βέλτιστου πειράματος

5.2.1 Διαμόρφωση των πειραμάτων

Για την επιλογή του βέλτιστου πειράματος, το οποίο θα αναπαριστά καλύτερα τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις-πειράματα με διαφορετικό σχήμα παραμετροποίησης ανωμεταφοράς. Τα πειράματα αυτά αποτελούν ολοκληρώσεις του μοντέλου WRF-ARW για το διάστημα από 13/10/2021 00 UTC έως και 17/10/2021 06 UTC πάνω από την περιοχή μελέτης. Τα σχήματα ανωμεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Kain-Fritsch ($cu_physics=1$) και το Grell-Freitas ($cu_physics=3$), ενώ το τρίτο πείραμα πραγματοποιήθηκε χωρίς παραμετροποίηση της ανωμεταφοράς ($cu_physics=0$). Τα παραπάνω σχήματα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στο d01, ενώ στο d02 δεν εφαρμόστηκε κάποιο σχήμα σε κανένα πείραμα. Η διερεύνηση της αναγκαιότητας χρήσης ενός σχήματος ανωμεταφοράς στην περιοχή d01 οφείλεται στο ότι δεν είναι γενικά ξεκάθαρο αν θα πρέπει να εφαρμόζεται σχήμα ανωμεταφοράς σε πλέγματα με χωρική διακριτοποίηση από 2-5 km έως 10 km (Gerard, 2007; Skamarock et al., 2008). Στο πλέγμα d02 (2 km x 2 km) θεωρείται ότι η χωρική ανάλυση είναι επαρκής για τη ρητή αναπαράσταση της ανωμεταφοράς χωρίς την ανάγκη ύπαρξης παραμετροποίησης.

Πέρα από τα σχήματα ανωμεταφοράς, οι υπόλοιπες παραμετροποιήσεις ήταν ίδιες και στα τρία πειράματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σχήμα παραμετροποίησης πλανητικού οριακού στρώματος του Yonsei University (Hong et al., 2006), το στρώμα επιφανείας (surface layer) Revised MM5 Monin-Obukhov (Fairall et al., 2003), το σχήμα μικροφυσικής WSM6 (WRF Single-Moment 6-class) (Hong and Lim, 2006), το σχήμα ακτινοβολίας RRTMG τόσο στη μικρού όσο και στη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (Iacono et al., 2008) και τέλος το εδαφικό σχήμα επιφανείας (soil scheme) του Noah (Chen and Dudhia, 2001). Τα πειράματα εκτελέστηκαν με 51 κατακόρυφα επίπεδα υβριδικών συντεταγμένων τύπου σίγμα μέχρι τα 25 hPa, με αυξημένη κατακόρυφη ανάλυση κοντά στην επιφάνεια. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υψηλής ανάλυσης (30 arcsec x 30 arcsec) του United States Geological Survey για την τοπογραφία, τη μάσκα ξηράς/θάλασσας και τις χρήσεις γης. Επίσης, ενσωματώθηκαν δεδομένα όζοντος CAM. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες ΕΘΘ του NCEP (RTG), οι οποίες ανανεώνονταν κάθε 24 ώρες. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος.

Πίνακας 5.1: Περιγραφή των πειραμάτων ελέγχου

ΟΝΟΜΑ	ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΩΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ
EXP_KF_cu1	Kain-Fritsch ($cu_physics=1$)	NCEP
EXP_GF_cu3	Grell-Freitas ($cu_physics=3$)	NCEP
EXP_NO_cu0	Χωρίς παραμετροποίηση	NCEP

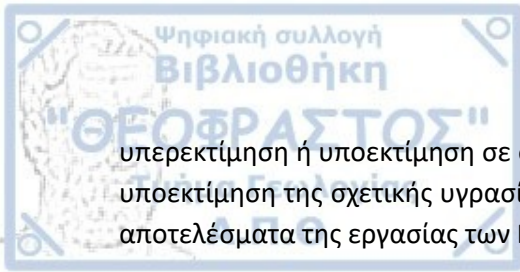
5.2.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης

5.2.2.1 Συνεχείς μεταβλητές

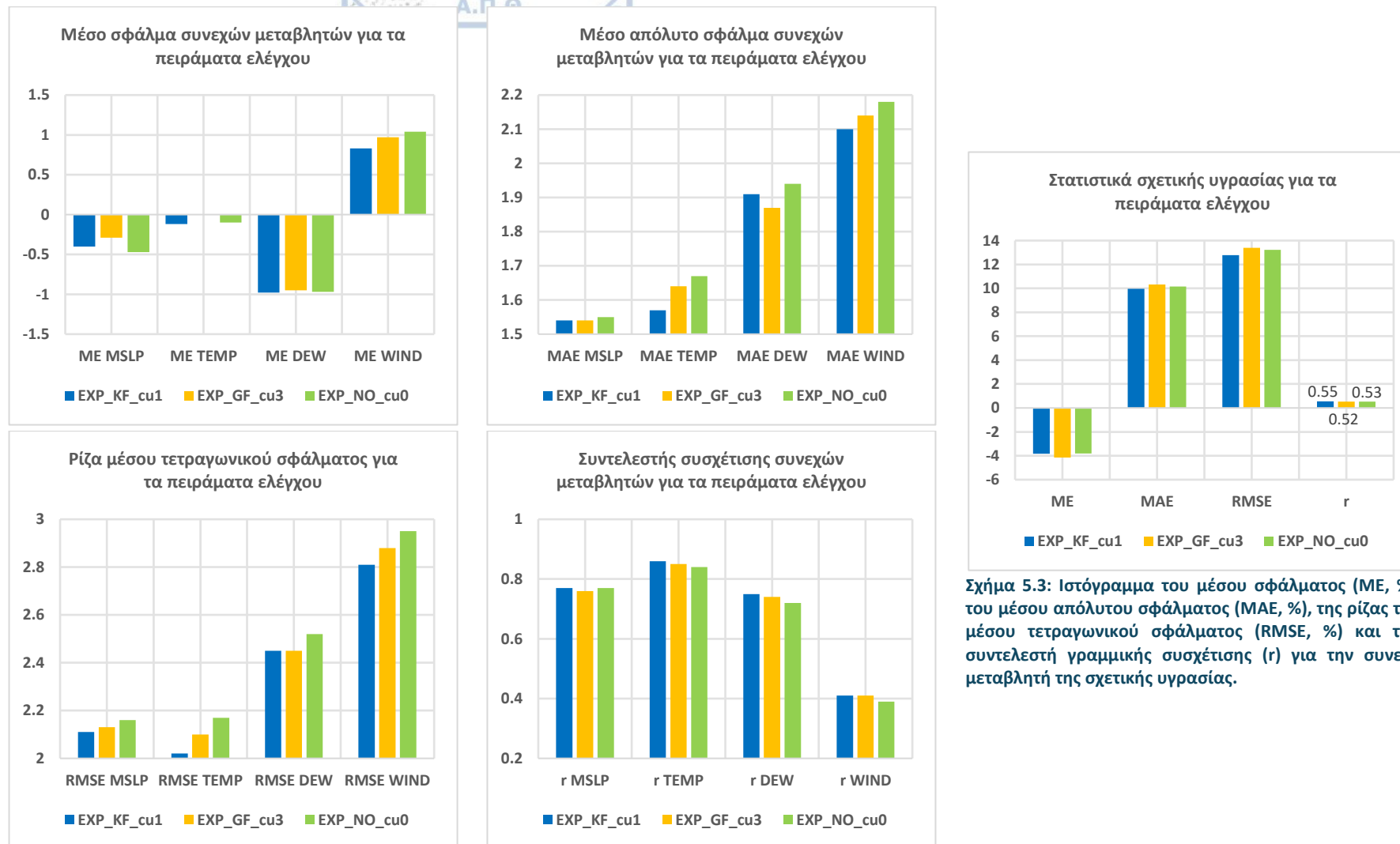
Για τις συνεχείς μεταβλητές υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα (ME), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και ο συντελεστής συσχέτισης (r). Οι στατιστικές αυτές παράμετροι εκτιμήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, εκτός από τις πρώτες έξι ώρες (13/10 00 UTC έως 06 UTC) που αναφέρονται ως χρόνος προσαρμογής (model spin-up). Ο υπολογισμός αυτός έγινε για τα αποτελέσματα της 2ης περιοχής ολοκλήρωσης (domain 2), που αποτελεί και την περιοχή ενδιαφέροντος με καλύτερη χωρική ανάλυση. Το χρονικό βήμα των ζευγαριών (μετρήσεων-προγνώσεων) είναι ανά 3 ώρες για όλες τις συνεχείς μεταβλητές, πέρα από τις ώρες που υπήρχαν κενά στις μετρήσεις.

Για την μεταβλητή της πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας, το βέλτιστο πείραμα θεωρείται το EXP_KF_cu1 με την παράμετρο RMSE να εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα 2.11 hPa σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα. Το MAE εκτίμησε ίδια τιμή με το πείραμα EXP_GF_cu3 και το r ίδια τιμή με το πείραμα EXP_NO_cu0 (1.54 hPa και 0.77 αντίστοιχα) (Σχήμα 5.2). Για τη μεταβλητή της θερμοκρασίας στα 2 m, καλύτερα αποτελέσματα δίνει επίσης το EXP_KF_cu1 με το MAE να είναι 1.57 K, το RMSE 2.02 K και το r 0.86, ενώ τα μέγιστα σφάλματα παρουσιάζει το EXP_NO_cu0. Σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία, σε πειράματα ισχυρής βροχόπτωσης στην Βόρεια Ελλάδα, το MAE κυμαινόταν μεταξύ 1.37 K και 1.49 K (Pytharoulis et al., 2023). Οι Pytharoulis et al. (2016) υπολόγισαν MAE 1.8 K και RMSE 2.3 K. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα πειράματα της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν για μεγαλύτερο προγνωστικό χρόνο σε σχέση με τις μελέτες των Pytharoulis et al. (2023) και Pytharoulis et al. (2016) και αυτό σημαίνει ότι αναμένονται μεγαλύτερα σφάλματα. Παρόλα αυτά, τα σφάλματα είναι συγκρίσιμα ή μικρότερα των άλλων εργασιών. Για τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου στα 2 m, υπολογίστηκε μικρότερο σφάλμα για την παράμετρο MAE στο πείραμα EXP_GF_cu3 με τιμή 1.87 K. Το RMSE είναι το ίδιο (2.45 K) για τα πειράματα GF_cu3 και KF_cu1 και μικρότερο σε σχέση με το NO_cu0 (2.52 K), ενώ το r σημειώνει μικρότερο σφάλμα στο πείραμα KF_cu1. Συνεπώς, για τη μεταβλητή της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα. Για την ταχύτητα του ανέμου στα 10 m, καλύτερο πείραμα θεωρείται το EXP_KF_cu1 με όλες τις στατιστικές παραμέτρους να συνηγορούν σε αυτό, ενώ αυτό με μεγαλύτερα σφάλματα είναι το EXP_NO_cu0 (Σχήμα 5.2). Τέλος, για την μεταβλητή της σχετικής υγρασίας, το πείραμα με τα μικρότερα σφάλματα είναι πάλι το EXP_KF_cu1 καθώς το MAE έχει τιμή 9.96%, το RMSE 12.78% και το r 0.55 έναντι του EXP_GF_cu3 που εμφανίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις με τιμές MAE 10.33%, RMSE 13.39% και r 0.52 (Σχήμα 5.3). Σε γενικές γραμμές, οι διαφορές των σφαλμάτων (μεταξύ των πειραμάτων) είναι μικρές. Η μελέτη των Pytharoulis et al. (2023) παρουσίασε καλύτερα σκορ για την μεταβλητή της σχετικής υγρασίας με τιμές MAE από 7.1% έως 7.76%, ενώ αυτή των Pytharoulis et al. (2016) έδωσε χειρότερο σκορ με τιμή 12.3%.

Η παράμετρος ME χρησιμοποιείται κυρίως για την εύρεση συστηματικής υπερεκτίμησης ($ME > 0$) ή υποεκτίμησης ($ME < 0$) των προβλεπόμενων τιμών του μοντέλου σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει μεγαλύτερη απόλυτη αρνητική (θετική) τιμή για την πίεση (τον άνεμο) με τιμή -0.47 hPa (1.04 m/s) για το πείραμα EXP_NO_cu0, που υποδηλώνει χαμηλότερη (ισχυρότερο) προβλεπόμενη(ο) πίεση (άνεμο) σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα (Σχήμα 5.2). Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παράμετρος ME έχει τιμή 0 για τη θερμοκρασία στα 2 m στο πείραμα EXP_GF_cu3, που σημαίνει ότι οι τιμές του μοντέλου δεν παρουσιάζουν καμία



υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση σε σχέση με τις παρατηρήσεις. Τέλος, σε όλα τα πειράματα υπάρχει υποεκτίμηση της σχετικής υγρασίας (Σχήμα 5.3). Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της εργασίας των Pytharoulis et al. (2023) σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων.



Σχήμα 5.2: Ιστογράμματα του μέσου σφάλματος (ME), του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE), της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (r) για τις συνεχείς μεταβλητές (α) πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (MSLP, hPa), (β) θερμοκρασία (TEMP, K), (γ) θερμοκρασία σημείου δρόσου (DEW, K) και (δ) ταχύτητας ανέμου στα 10 m (WIND, m/s).

Σχήμα 5.3: Ιστόγραμμα του μέσου σφάλματος (ME, %), του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE, %), της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE, %) και του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (r) για την συνεχή μεταβλητή της σχετικής υγρασίας.

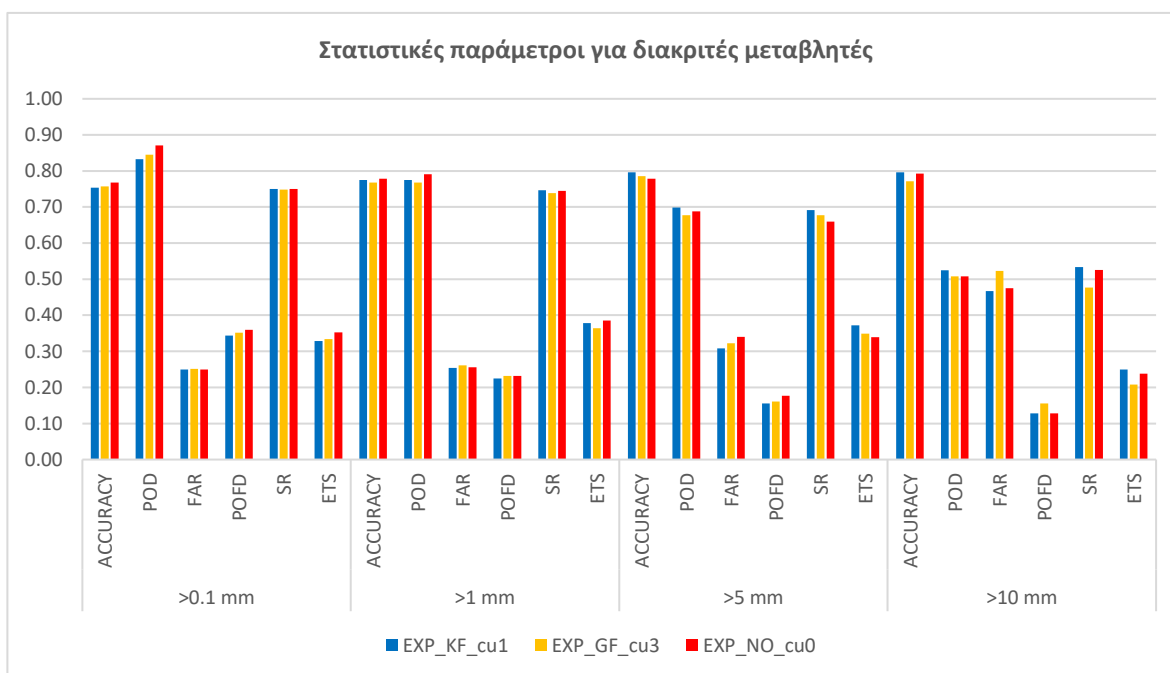
Οι θετικές (αρνητικές) τιμές στον πίνακα 5.2 υποδηλώνουν μικρότερα (μεγαλύτερα) σφάλματα από το κάθε πείραμα σε σχέση με το πείραμα ελέγχου για τις στατιστικές παραμέτρους MAE και RMSE. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι βέλτιστο πείραμα αναδεικνύεται το EXP_KF_cu1 και χειρότερο το πείραμα χωρίς παραμετροποίηση EXP_NO_cu0. Το EXP_GF_cu3 παρουσιάζει το μεγαλύτερο σφάλμα στην μεταβλητή RH (σχετική υγρασία) για την παράμετρο RMSE με τιμή -4.77%, ενώ αποδεικνύεται κατά 2.09% καλύτερο από το πείραμα ελέγχου στην μεταβλητή DEW για την παράμετρο MAE. Το EXP_NO_cu0 είναι χειρότερο (αρνητικά ποσοστά) σε όλες τις μεταβλητές σε σχέση με το control με μεγαλύτερο σφάλμα το -7.43% στην παράμετρο RMSE της μεταβλητής TEMP. Αν συνυπολογίσουμε και τον συντελεστή συσχέτισης r , συνηγορεί πάλι στο ότι το πείραμα EXP_KF_cu1 είναι το καλύτερο. Συνολικά, τα πειράματα EXP_GF_cu3 και EXP_NO_cu0 είναι κατά 2.02% και 3.56%, αντίστοιχα, λιγότερο αξιόπιστα από το πείραμα ελέγχου (EXP_KF_cu1) (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Σύγκριση των σφαλμάτων MAE και RMSE του κάθε πειράματος (exp) με το πείραμα ελέγχου (EXP_KF_cu1, control) για κάθε μεταβλητή χρησιμοποιώντας τον τύπο $1-(\text{exp}/\text{control})$, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ενότητας 2.2.3.3.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ	EXP_KF_cu1	EXP_GF_cu3	EXP_NO_cu0
MSLP	MAE	0.00%	0.00%	-0.65%
	RMSE	0.00%	-0.95%	-2.37%
TEMP	MAE	0.00%	-4.46%	-6.37%
	RMSE	0.00%	-3.96%	-7.43%
DEW	MAE	0.00%	2.09%	-1.57%
	RMSE	0.00%	0.00%	-2.86%
RH	MAE	0.00%	-3.71%	-2.01%
	RMSE	0.00%	-4.77%	-3.52%
WIND	MAE	0.00%	-1.90%	-3.81%
	RMSE	0.00%	-2.49%	-4.98%
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		0.00%	-2.02%	-3.56%

Η διακριτή μεταβλητή που αναλύεται είναι ο υετός. Λήφθηκαν τέσσερα κατώφλια υετού και υπολογίστηκαν έξι στατιστικές παράμετροι για κάθε κατώφλι. Τα κατώφλια υετού είναι $>0,1$ mm, >1 mm, >5 mm και >10 mm ανά 12 ώρες από τις 13/10 06 UTC έως τις 17/10 06 UTC (διαστήματα: 18 UTC - 06 UTC και 06 UTC - 18 UTC), ενώ οι στατιστικές παράμετροι αναφέρονται ως ACCURACY, POD, FAR, POFD, SR και ETS (όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2).

Από το Σχήμα 5.4 παρατηρείται ότι το accuracy είναι καλύτερο στο πείραμα EXP_KF_cu1 για τα κατώφλια >5 mm και >10 mm με τιμή 0.80 και στις δύο περιπτώσεις, ενώ για το κατώφλι $>0,1$ mm καλύτερο αποτέλεσμα δίνει το EXP_NO_cu0. Για υετό >1 mm τα παραπάνω πειράματα σημείωσαν ίδια τιμή (0,78). Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από την παρατήρηση του POD. Στην παρούσα μελέτη σημειώθηκαν μικρότερα σκορ στο κατώφλι του 1 mm με τιμές από 0.77 (EXP_GF_cu3) έως 0.79 (EXP_NO_cu0) σε σχέση με τους Pytharoulis et al. (2023) που ήταν από 0.85 έως 0.87. Για το FAR στο οποίο βέλτιστο σκορ θεωρείται το 0, είναι εμφανές ότι καλύτερο πείραμα είναι το EXP_KF_cu1 με την μικρότερη τιμή σε όλα τα κατώφλια σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα, με εξαίρεση το κατώφλι >0.1 mm που η διαφορά μεταξύ των πειραμάτων είναι απειροελάχιστη (Σχήμα 5.4). Το γεγονός ότι το πείραμα EXP_KF_cu1 σημείωσε μεγαλύτερο POD και μικρότερο FAR για τα κατώφλια >5 mm και >10 mm σημαίνει ότι είχε περισσότερες ευστοχίες και λιγότερους ψευδείς συναγερμούς σε αυτά. Δηλαδή, περισσότερα πραγματικά συμβάντα υετού προβλέφθηκαν σωστά και υπήρχαν λιγότεροι ψευδείς συναγερμοί σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα. Αντίστοιχα και για το POFD, το βέλτιστο πείραμα είναι το EXP_KF_cu1. Το SR με βέλτιστη τιμή το 1, αναδεικνύει εξίσου το EXP_KF_cu1 ως το πείραμα με την καλύτερη απόδοση, ενώ για το ETS, που λαμβάνει υπόψη τις επιτυχείς προγνώσεις λόγω τυχαιότητας, δεν είναι τόσο εμφανές πιο πείραμα αντιπροσωπεύει καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, στα κατώφλια των 0.1 mm και 1 mm πιο αξιόπιστο πείραμα είναι το EXP_NO_cu0, ενώ στα άλλα δύο κατώφλια καλύτερο αναδεικνύεται το EXP_KF_cu1 (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Ιστογράμματα με τις στατιστικές παραμέτρους για την διακριτή μεταβλητή του υετού με κατώφλια >0.1 mm, >1 mm, >5 mm και >10 mm για τα πειράματα EXP_KF_cu1, EXP_GF_cu3 και EXP_NO_cu0.

Σε κάθε στατιστικό κάθε κατωφλιού (0.1 mm, 1 mm, 5 mm και 10 mm ανά 12 ώρες) για τη διακριτή μεταβλητή του υετού, καλύτερο πείραμα θεωρείται αυτό με την τιμή 1, εκτός από τις στατιστικές παραμέτρους FAR και POFD όπου το 1 υποδηλώνει το χειρότερο πείραμα. Στη συνέχεια, για την εύρεση του τελικού σκορ κάθε κατωφλιού γίνεται πρόσθεση των στατιστικών ACCURACY, POD, SR και ETS και αφαίρεση των FAR και POFD. Με αυτή τη μέθοδο, αναδεικνύεται το πείραμα με το καλύτερο συνολικό σκορ σε κάθε κατώφλι. Στο κατώφλι του 0.1 mm (που δηλώνει την ύπαρξη υετού) το βέλτιστο πείραμα είναι το EXP_NO_cu0 με τιμή 3, ενώ στα υπόλοιπα κατώφλια 1 mm, 5 mm και 10 mm καλύτερο πείραμα αναδείχθηκε το EXP_KF_cu1 με τιμές 2.64, 4 και 4, αντίστοιχα (Πίνακας 5.3). Συνεπώς, μετά από το άθροισμα των τιμών των στατιστικών παραμέτρων και για τα 4 κατώφλια προέκυψε ότι το βέλτιστο πείραμα είναι το EXP_KF_cu1 με τιμή 11.6407. Δεύτερο έρχεται το EXP_NO_cu0 με τιμή 6.3416, ενώ τις μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζει το πείραμα EXP_GF_cu3 με αρνητικό σκορ -4.1311 (Πίνακας 5.3). Συνεπώς, τόσο για τις συνεχείς όσο και για τις διακριτές μεταβλητές αναδεικνύεται ως βέλτιστο το πείραμα EXP_KF_cu1. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι για την καλύτερη ανάλυση/αναπαράσταση της καταιγισμοφόρου δράσης του συστήματος «Μπάλλος» χρειάζεται το cumulus scheme Kain Fritsch στην «γκρίζα ζώνη» των 6x6 km. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ενώ το σχήμα GF θεωρητικά είναι πιο κατάλληλο για πλέγματα με χωρική διακριτοποίηση 6x6 km (όπως το d01), το σχήμα KF που συνήθως χρησιμοποιείται σε πλέγματα με ανάλυση τουλάχιστον 10x10km, δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην παρούσα μελέτη. Επομένως, θεωρείται αναγκαίο για το κάθε σύστημα που μελετάται με χωρική διακριτοποίηση στην «γκρίζα ζώνη» των 5-10 km, να διενεργούνται σε πρώτη φάση πειράματα διαφορετικών παραμετροποιήσεων ανωμεταφοράς. Επίσης, το πείραμα χωρίς παραμετροποίηση της ανωμεταφοράς αναπαριστά την καταιγισμοφόρο δράση ρητά μόνο από το πλέγμα του μοντέλου και σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση δεν δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία. Παρόμοια σύγκριση πειραμάτων για την περιοχή της Ελλάδας έχει πραγματοποιηθεί και από άλλες εργασίες όπως του Χατζούδη (2018) και της Δημητριάδου (2023). Στη μελέτη του Χατζούδη (2018) παρατηρήθηκε ότι το σχήμα KF εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα για τον υετό στις περιπτώσεις ισχυρού δυναμικού εξαναγκασμού, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με την παρούσα εργασία. Αντίθετα, στη μελέτη της Δημητριάδου (2023) για περίπτωση έντονης χιονόπτωσης στην Ελλάδα, βέλτιστο αναδείχθηκε το πείραμα χωρίς παραμετροποίηση της ανοδικής μεταφοράς.

Πίνακας 5.3: Κανονικοποίηση των σφαλμάτων στα πειράματα EXP_KF_cu1, EXP_GF_cu3 και EXP_NO_cu0 για τα κατώφλια νετού 0.1 mm, 1 mm, 5 mm και 10 mm χρησιμοποιώντας τον τύπο $(EXP-MIN)/(MAX-MIN)$, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ενότητας 2.2.3.4. Το MAX και το MIN είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του στατιστικού μεταξύ των τριών πειραμάτων για το συγκεκριμένο κατώφλι.

ΥΕΤΟΣ	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ	EXP_KF_cu1	EXP_GF_cu3	EXP_NO_cu0
>0.1 mm	ACCURACY	0	0.25	1
	POD	0	0.333333333	1
	FAR	0	1	0
	POFD	0	0.5	1
	SR	1	0	1
	ETS	0	0.230759074	1
		1	-0.68590759	3
>1 mm	ACCURACY	0.666666667	0	1
	POD	0.333333333	0	1
	FAR	0	1	0.233576642
	POFD	0	1	1
	SR	1	0	0.766423358
	ETS	0.640699432	0	1
		2.640699432	-2	2.532846715
>5 mm	ACCURACY	1	0.4	0
	POD	1	0	0.5
	FAR	0	0.443911151	1
	POFD	0	0.25	1
	SR	1	0.556088849	0
	ETS	1	0.292624467	0
		4	0.554802166	-1.5
>10 mm	ACCURACY	1	0	0.857142857
	POD	1	0	0
	FAR	0	1	0.140215716
	POFD	0	1	0
	SR	1	0	0.859784284
	ETS	1	0	0.732004326
		4	-2	2.30871575
		11.6407	-4.1311	6.3416

5.3 Διερεύνηση της βέλτιστης βάσης δεδομένων ΕΘΘ

5.3.1 Εισαγωγή

Το χρονικό διάστημα από 13/10 έως 16/10/2021 παρατηρήθηκαν υψηλότερες ΕΘΘ σε σχέση με την κλιματολογία του Οκτωβρίου για την περίοδο αναφοράς 1981-2020, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Αυτό πυροδότησε το ενδιαφέρον για περαιτέρω μελέτη δεδομένων ΕΘΘ από διαφορετικές πηγές. Ειδικότερα, οι πηγές προέλευσης αποτελούν δεδομένα του NCEP, του ECMWF και του CMEMS. Επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στα πειράματα οι παραπάνω βάσεις δεδομένων, επειδή εμφανίζουν μεγάλη συχνότητα εμφάνισης στη βιβλιογραφία, με το ECMWF να αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούμενα μοντέλα (Katsafados et al., 2011; Pytharoulis, 2018b; Stathopoulos et al., 2020). Επίσης, τα δεδομένα του CMEMS παρουσιάζουν πολύ υψηλή χωρική ανάλυση ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$). Ο χρόνος ανανέωσης (update time) των ΕΘΘ κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είναι ανά μία ημέρα. Με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 5.2, στα πειράματα ευαισθησίας των ΕΘΘ θα χρησιμοποιηθεί η μορφοποίηση του μοντέλου με το σχήμα KF (cu=1) για την ανωμεταφορά. Το σχήμα KF ενεργοποιείται μόνο στο εξωτερικό πλέγμα (d01), ενώ στο εσωτερικό (d02) η ανωμεταφορά (convective activity) θα αναπαρασταθεί ρητά (explicitly) από τις εξισώσεις του μοντέλου και τη μικροφυσική.

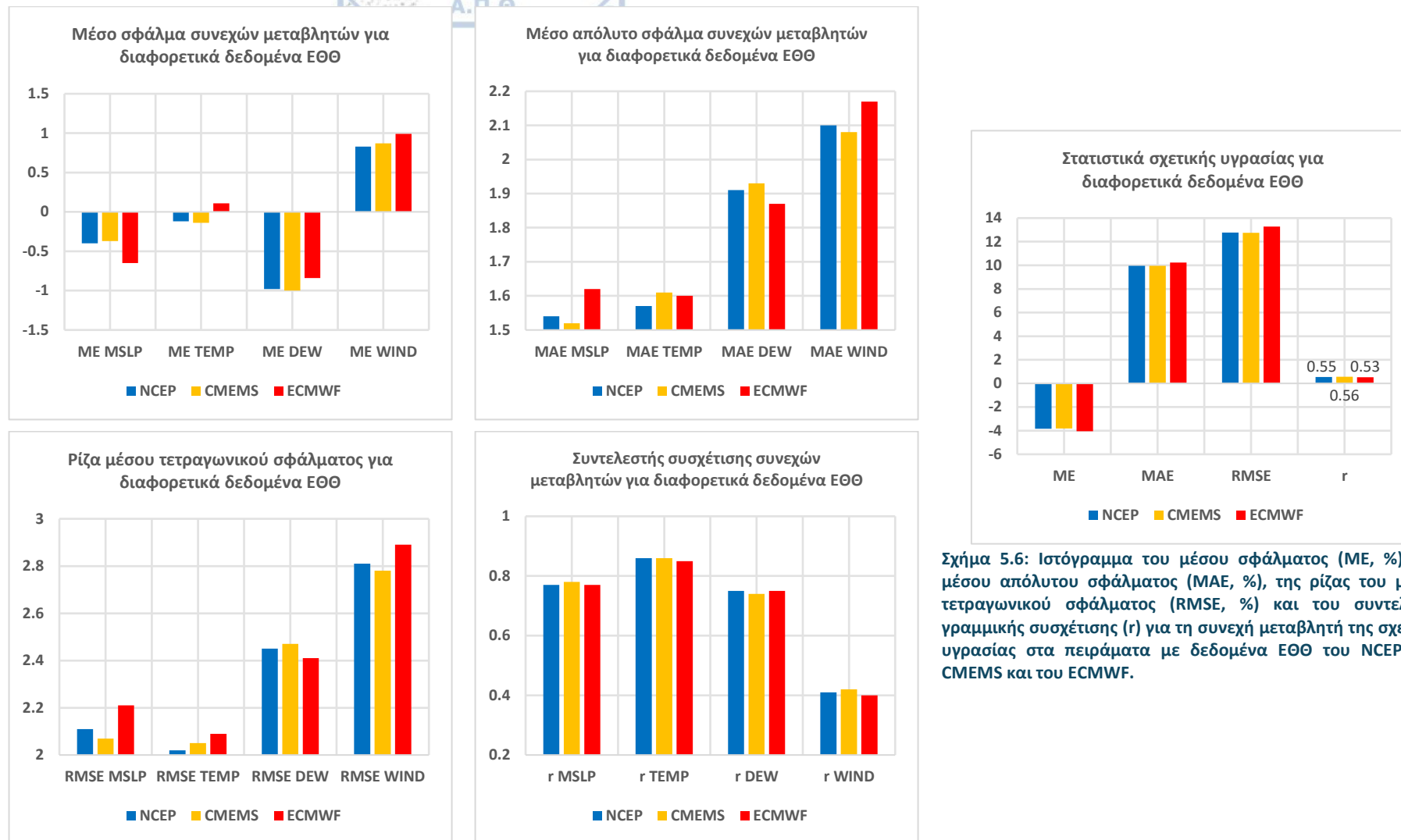
5.3.2 Στατιστική ανάλυση

5.3.2.1 Συνεχείς μεταβλητές

Για τη στατιστική ανάλυση ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή για την επιλογή του βέλτιστου πειράματος. Από το Σχήμα 5.5 παρατηρείται ότι για την πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, μικρότερα σφάλματα και συνεπώς καλύτερη απόδοση παρουσιάζει το πείραμα με τα δεδομένα CMEMS για τις στατιστικές παραμέτρους ME με τιμή -0.37 hPa (μικρή υποεκτίμηση της πίεσης), MAE με 1.52 hPa, RMSE με 2.07 hPa και r με 0.78. Αντίστοιχα σκορ στατιστικών παραμέτρων, αλλά σε πειράματα του WRF για περίπτωση ανεμοστρόβιλου που έπληξε την Ελλάδα στις 25/3/2009, έδωσαν τιμές για το σταθμό της Ανδραβίδας (LGAD) ME -0.95 hPa (μεγάλη υποεκτίμηση της πίεσης), MAE 1.75 hPa και RMSE 1.91 hPa (Matsangouras et al., 2016). Συνεπώς, το μέσο σφάλμα και μέσο απόλυτο σφάλμα είναι καλύτερα στην παρούσα μελέτη για τη μεταβλητή της πίεσης. Αντίθετα, τα σφάλματα είναι μικρότερα στη μελέτη των Matsangouras et al. (2016) για το σταθμό του Άραξου (LGRX) με τιμές ME -0.14 hPa, MAE 1.00 hPa και RMSE 1.17 hPa. Επίσης, παρόμοια μελέτη για την επίδραση της πολύπλοκης τοπογραφίας της Ελλάδας στην εμφάνιση ανεμοστρόβιλων (Matsangouras et al., 2014) υπολόγισε σκορ ME -2.49 hPa (πολύ μεγάλη υποεκτίμηση), MAE 2.49 hPa και RMSE 2.64 hPa για το σταθμό της Θεσσαλονίκης (LGTS) στο επεισόδιο στις 12/2/2010, τα οποία υποδηλώνουν μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με το υπό μελέτη φαινόμενο. Για τη μεταβλητή της θερμοκρασίας στα 2 m φαίνεται ότι μικρότερες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές εμφανίζουν τα δεδομένα NCEP για τις παραμέτρους MAE και RMSE. Για την παράμετρο r , υψηλότερο σκορ που δείχνει και πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα υπολογίστηκε για τα δεδομένα NCEP και CMEMS με τιμή 0.86. Τα πειράματα NCEP και CMEMS υποεκτιμούν τη θερμοκρασία στα 2 m, ενώ του ECMWF την υπερεκτιμούν με βάση το μέσο σφάλμα.

Για τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου (Td) διακρίνονται καλύτερα σκορ στο πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF με τις τιμές των παραμέτρων MAE και RMSE να είναι 1.87 K και 2.41 K,

αντίστοιχα, ενώ σε όλα τα πειράματα παρατηρείται υποεκτίμηση της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου με τα CMEMS να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη υποεκτίμηση με τιμή -1. Σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία για την παράμετρο Td, παρατηρούνται σκορ MAE 1.47 K (1.13 K) και RMSE 1.88 K (1.43 K) στο σταθμό LGAD (LGRX) (Matsangouras et al., 2016), τα οποία είναι εμφανώς καλύτερα σε σχέση με τα σκορ της παρούσας εργασίας. Στη μεταβλητή του ανέμου, το πείραμα με τα δεδομένα CMEMS δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, με τις παραμέτρους MAE, RMSE και r να έχουν τιμές 2.08 m/s, 2.78 m/s και 0.42, αντίστοιχα (Σχήμα 5.5). Στην εργασία των Matsangouras et al. (2014), τα καλύτερα σκορ για τον άνεμο δίνει ο σταθμός της Κεφαλονιάς (LGFK) (επεισόδιο: ανεμοστρόβιλος 20/9/2011) με MAE 1.83 m/s και RMSE 2.50 m/s. Όλα τα πειράματα υπερεκτιμούν την ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Pytharoulis et al. (2023), Matsangouras et al. (2014) και Matsangouras et al. (2016). Τέλος, για τη σχετική υγρασία, καλύτερα σκορ δίνουν τα δεδομένα CMEMS για το RMSE με τιμή 12.76% (με τη διαφορά του NCEP να έγκειται στο 2ο δεκαδικό ψηφίο, 12.78%) και για το r με 0.56, ενώ το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίδιο για τα δεδομένα του NCEP και του CMEMS με τιμή 9.96%. Από τα σκορ της παραμέτρου ME, παρατηρείται υποεκτίμηση της σχετικής υγρασίας σε όλα τα πειράματα (Σχήμα 5.6). Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τη βιβλιογραφία (Pytharoulis et al., 2023).



Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα του μέσου σφάλματος (ME, %), του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE, %), της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE, %) και του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (r) για τη συνεχή μεταβλητή της σχετικής υγρασίας στα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, του CMEMS και του ECMWF.

Σχήμα 5.5: Ιστογράμματα του μέσου σφάλματος (ME), του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE), της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (r) για τις συνεχείς μεταβλητές (α) πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (MSLP, hPa), (β) θερμοκρασία (TEMP, K), (γ) θερμοκρασία σημείου δρόσου (DEW, K) και (δ) ταχύτητα ανέμου στα 10 m (WIND, m/s) για τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, του CMEMS και του ECMWF.

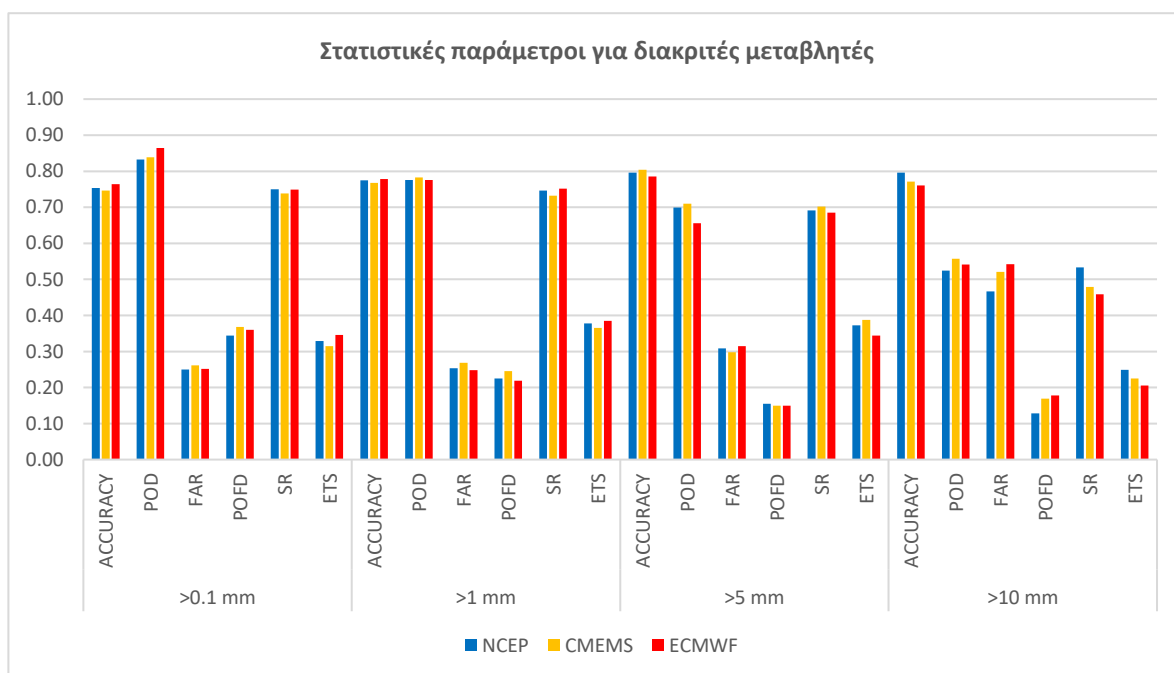
Από τον Πίνακα 5.4 συμπεραίνεται ότι το πείραμα με τα δεδομένα ΕΘΘ του NCEP παρουσιάζει το καλύτερο συνολικό σκορ λαμβάνοντας υπόψη τις συνεχείς μεταβλητές. Τα σφάλματα αυτού του πειράματος σε σχέση με αντίστοιχες προσομοιώσεις στη βιβλιογραφία είναι μικρότερα στην παράμετρο MAE (RMSE) για την μεταβλητή WIND με τιμή 2.1 m/s (2.81 m/s) σε σύγκριση με τους Matsangouras et al. (2016) που υπολόγισαν σκορ από 2.17 m/s έως 5.01 m/s (3.44 m/s έως 5.45 m/s) για τέσσερις διαφορετικούς σταθμούς. Αντίθετα, για τις μεταβλητές TEMP και DEW υπολογίστηκαν μεγαλύτερα σφάλματα με τιμές 1.57 K (2.02 K) και 1.91 K (2.45 K), αντίστοιχα, σε σχέση με την παραπάνω μελέτη με εύρη τιμών 0.84 K - 1.41 K (1.2K - 1.93 K) και 0.83 K - 1.84 K (1.07 K - 2.29 K), αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τους Pytharoulis et al. (2023), σημειώθηκε μικρότερο (μεγαλύτερο) σφάλμα στην μεταβλητή WIND (TEMP) για την παράμετρο MAE στην παρούσα εργασία. Συνεπώς, η μεταβλητή WIND προσομοιώθηκε καλά με μικρά σφάλματα σε σχέση με την βιβλιογραφία, σε αντίθεση με την μεταβλητή TEMP που παρουσίασε χειρότερο σκορ.

Η αμέσως επόμενη πηγή δεδομένων με επίσης καλό σκορ είναι του CMEMS με πάρα πολύ μικρή διαφορά (-0,05%) από το NCEP. Το πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του CMEMS παρουσιάζει το μεγαλύτερο σφάλμα στην μεταβλητή TEMP για την παράμετρο MAE με τιμή -2.55%, ενώ είναι κατά 1.90% καλύτερο από το πείραμα ελέγχου στην μεταβλητή MSLP για την παράμετρο RMSE. Τρίτη στην κατάταξη έρχεται η βάση δεδομένων του ECMWF με σαφή διαφορά από τις άλλες δύο βάσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη χειρότερη χωρική ανάλυση των δεδομένων του ECMWF. Το πείραμα του ECMWF είναι χειρότερο σε όλες τις μεταβλητές, με εξαίρεση την μεταβλητή DEW που εμφανίζει καλύτερα σκορ σε σχέση με το control, με μεγαλύτερο σφάλμα το -5.19% στην παράμετρο MAE της μεταβλητής MSLP (Πίνακας 5.4).

Πίνακας 5.4: Σύγκριση των σφαλμάτων MAE και RMSE του κάθε πειράματος (exp) με το πείραμα ελέγχου (NCEP, control) για κάθε μεταβλητή χρησιμοποιώντας τον τύπο $1-(exp/control)$.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ	NCEP	CMEMS	ECMWF
MSLP	MAE	0.00%	1.30%	-5.19%
	RMSE	0.00%	1.90%	-4.74%
TEMP	MAE	0.00%	-2.55%	-1.91%
	RMSE	0.00%	-1.49%	-3.47%
DEW	MAE	0.00%	-1.05%	2.09%
	RMSE	0.00%	-0.82%	1.63%
RH	MAE	0.00%	0.00%	-2.71%
	RMSE	0.00%	0.16%	-3.91%
WIND	MAE	0.00%	0.95%	-3.33%
	RMSE	0.00%	1.07%	-2.85%
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ		0.00%	-0.05%	-2.44%

Το accuracy είναι μεγαλύτερο στο πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF για τα κατώφλια >0.1 mm και >1 mm σε χρονικά διαστήματα 12 ωρών από τις 13/10 06 UTC έως τις 17/10 06 UTC, με τιμές 0.76 και 0.78 αντίστοιχα. Για την παράμετρο POD καλύτερο σκορ δίνουν οι ΕΘΘ του ECMWF για το κατώφλι των 0.1 mm με τιμή 0.86 και CMEMS για τα κατώφλια 1 mm, 5 mm και 10 mm με τιμές 0.78, 0.71 και 0.54, αντίστοιχα. Τα FAR και POFD που έχουν βέλτιστη τιμή το 0, έχουν καλύτερα σκορ για τα δεδομένα του NCEP στο κατώφλι 0.1 και του ECMWF στο κατώφλι 1 mm, ενώ για το κατώφλι των 10 mm καλύτερα αποτελέσματα δίνει το NCEP (FAR 0.47 και POFD 0.13) και χειρότερα το ECMWF (FAR 0.54 και POFD 0.18). Για το SR καλύτερο σκορ δίνει το NCEP (ECMWF) για το κατώφλι 0.1 mm (1 mm) και χειρότερο το CMEMS για τα κατώφλια 0.1 και 1 mm, για το κατώφλι των 5 mm ισχύει το αντίστροφο, ενώ για το κατώφλι 10 mm καλύτερο είναι το NCEP και χειρότερο το ECMWF. Ίδια συμπεράσματα με το SR διαπιστώνονται και από τα ιστογράμματα του ETS, με τη διαφορά ότι στο κατώφλι του 0.1 mm καλύτερο αναδεικνύεται το ECMWF (Σχήμα 5.7). Γενικά, παρατηρείται ότι οι διαφορές παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ των πειραμάτων. Σε πειράματα με διαφορετική τοπογραφία, χρήσεις γης και ΕΘΘ, χρησιμοποιώντας το επιχειρησιακό μοντέλο του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας ΑΠΘ, σημειώνονται σκορ POD (FAR) για 1 mm από 0.85 έως 1 (0 έως 0.14) και για 10 mm από 0.47 έως 0.82 (0.07 έως 0.28) (Pytharoulis et al., 2015), ενώ στην παρούσα μελέτη τα αντίστοιχα σκορ για 1 mm είναι 0.78 (0.25 έως 0.27) και για 10 mm από 0.52 έως 0.56 (0.47 έως 0.54). Τα χειρότερα σκορ πιθανόν οφείλονται στον μεγαλύτερο προγνωστικό ορίζοντα των πειραμάτων της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 5.7: Ιστογράμματα με τις στατιστικές παραμέτρους για τη διακριτή μεταβλητή του υετού με κατώφλια >0.1 mm, >1 mm, >5 mm και >10 mm για τα πειράματα με διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ.

Μετά την κανονικοποίηση και το άθροισμα των τιμών για τα τέσσερα κατώφλια διαπιστώνεται ότι το πείραμα με τα δεδομένα ΕΘΘ του NCEP εκτίμησε καλύτερα τις πραγματικές τιμές βροχόπτωσης με συνολικό σκορ 7.1394. Το NCEP ήταν καλύτερο στην πρόγνωση των πιο μεγάλων τιμών υετού (>10 mm) με τιμή 3. Στα μικρότερα κατώφλια (0.1 mm και 1 mm) σημειώθηκαν καλύτερα αποτελέσματα στο πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF, ενώ στο κατώφλι των 5 mm εμφάνισε βέλτιστο σκορ το πείραμα με τις ΕΘΘ του CMEMS. Η επόμενη πιο αξιόπιστη βάση δεδομένων για τις διακριτές μεταβλητές είναι αυτή του ECMWF με τιμή 3.5875, ενώ μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρήθηκαν στα αποτελέσματα της πηγής του CMEMS με το μικρότερο σκορ (Πίνακας 5.5). Συνεπώς, τόσο για τις συνεχείς όσο και για τις διακριτές μεταβλητές αναδεικνύεται ως βέλτιστο το πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ από το NCEP. Από τη βιβλιογραφία, πιο αξιόπιστη αναπαράσταση της χωρικής κατανομής του υετού και γενικότερα καλύτερη απόδοση παρουσίασε η πηγή ECMWF (Pytharoulis, 2018b; Katsafados et al., 2011).

Πίνακας 5.5: Κανονικοποίηση των σφαλμάτων στα πειράματα με διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ από τις πηγές NCEP, CMEMS και ECMWF για τα κατώφλια υετού 0.1 mm, 1 mm, 5 mm και 10 mm χρησιμοποιώντας τον τύπο (EXP-MIN)/(MAX-MIN). Το MAX και το MIN είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του στατιστικού μεταξύ των τριών πειραμάτων για το συγκεκριμένο κατώφλι.

ΥΕΤΟΣ	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ	NCEP	CMEMS	ECMWF
>0.1 mm	ACCURACY	0.4	0	1
	POD	0	0.2	1
	FAR	0	1	0.122905028
	POFD	0	1	0.666666667
	SR	1	0	0.877094972
	ETS	0.451733468	0	1
		1.851733468	-1.8	3.087523277
>1 mm	ACCURACY	0.666666667	0	1
	POD	0	1	0
	FAR	0.280613282	1	0
	POFD	0.25	1	0
	SR	0.719386718	0	1
	ETS	0.654520652	0	1
		1.509960754	-1	3
>5 mm	ACCURACY	0.6	1	0
	POD	0.8	1	0
	FAR	0.635714286	0	1
	POFD	1	0	0
	SR	0.364285714	1	0
	ETS	0.649105147	1	0
		0.777676575	4	-1
>10 mm	ACCURACY	1	0.3	0
	POD	0	1	0.5
	FAR	0	0.726134585	1
	POFD	0	0.818181818	1
	SR	1	0.273865415	0
	ETS	1	0.436738446	0
		3	0.466287457	-1.5
		7.1394	1.6663	3.5875

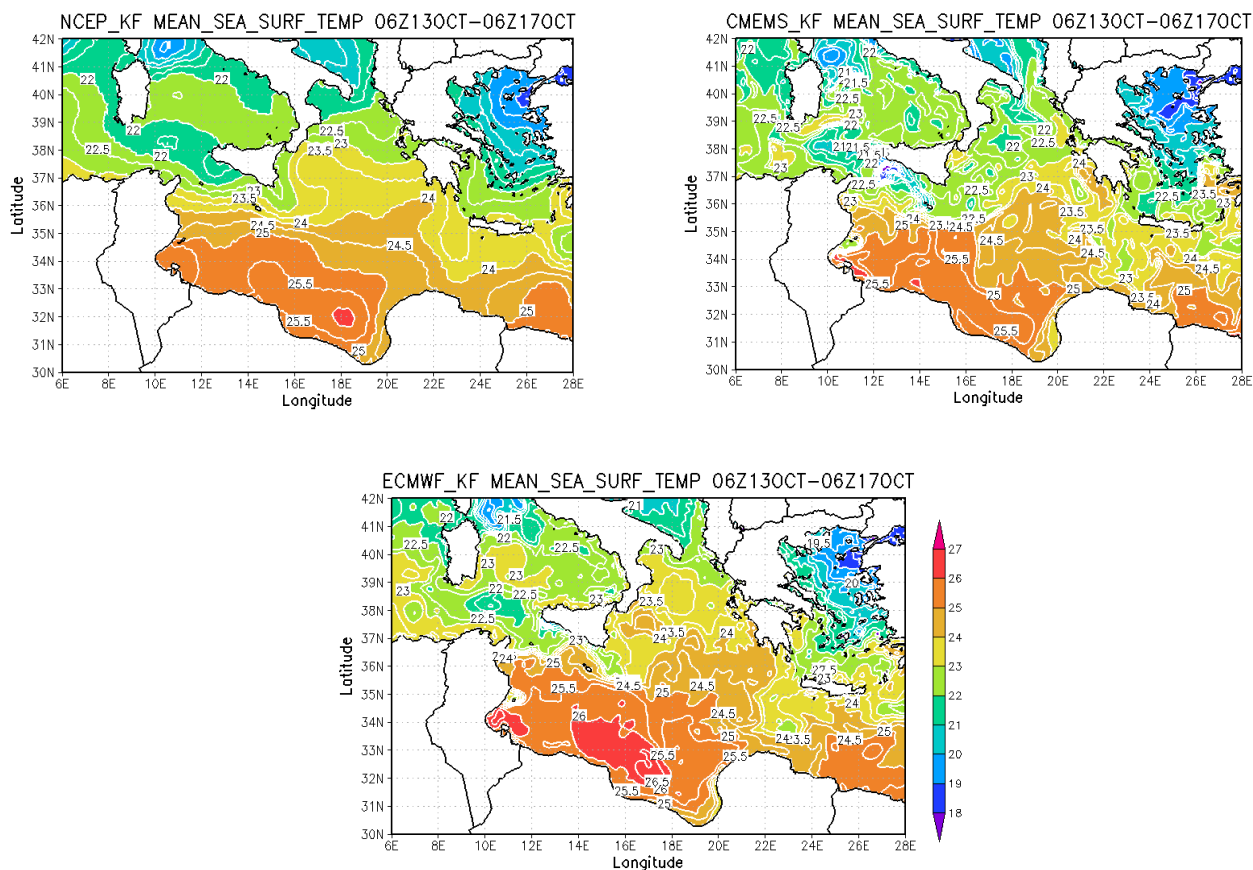
5.4 Συνοπτική ανάλυση των αριθμητικών πειραμάτων

Για την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου κατασκευάστηκε ένα πλήθος χαρτών για ορισμένες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία και το γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa και 500 hPa, οι επιφανειακές ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, ο άνεμος στα 10m, η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και ο υετός. Ανάλογα με την περιοχή που έπρεπε να απεικονιστεί σε έναν χάρτη για την κάθε μεταβλητή, χρησιμοποιήθηκε το domain 1 για μεγάλη έκταση και το domain 2 για μικρότερη έκταση. Για την κάθε μεταβλητή παρουσιάζονται τρεις χάρτες. Οι χάρτες αυτοί είναι από τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, του CMEMS και του ECMWF με το σχήμα παραμετροποίησης ανωμεταφοράς των Kain-Fritsch (cu1) μόνο στο d01. Εφεξής τα πειράματα θα ονομάζονται NCEP_KF, CMEMS_KF και ECMWF_KF. Επιλέγονται χάρτες από αυτό το σχήμα ανωμεταφοράς, επειδή αποτελεί το βέλτιστο (πείραμα ελέγχου) σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση της παραγράφου 5.2.2.

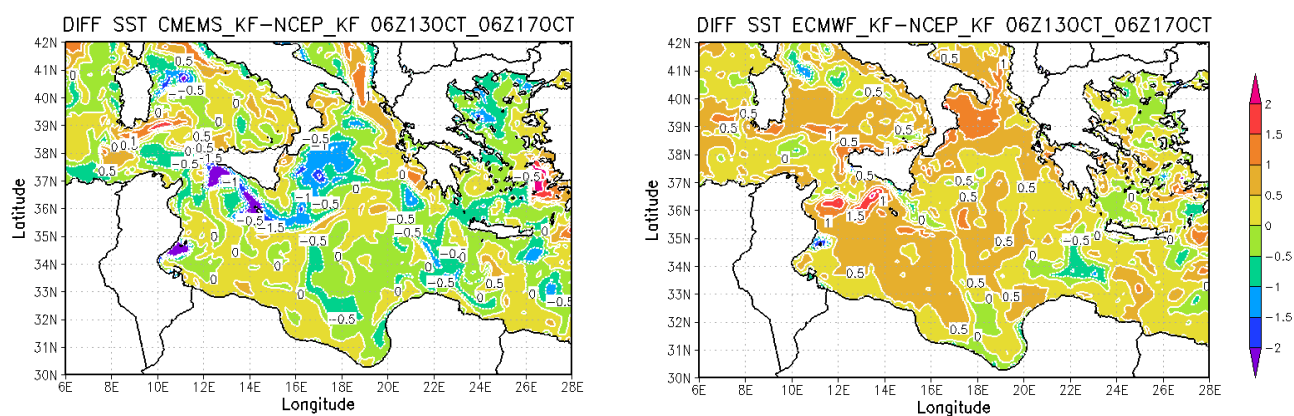
5.4.1 Θερμοκρασίες επιφάνειας της θάλασσας

Το Σχήμα 5.8α δείχνει τη μέση τιμή των ΕΘΘ από τις 13/10 06 UTC έως τις 17/10 06 UTC (από 24ωρα αποτελέσματα του μοντέλου) στην κεντρική και ανατολική Μεσόγειο. Οι μέσες τιμές των ΕΘΘ στην εικονιζόμενη περιοχή είναι 22.8°C για τη βάση δεδομένων του NCEP, 22.6°C για τα δεδομένα του CMEMS και 22.8°C για το ECMWF. Η ελαφρώς υψηλότερη μέση θερμοκρασία των δεδομένων του NCEP και του ECMWF οφείλεται πιθανώς στις θερμότερες ΕΘΘ που επικρατούν στον κόλπο της Σύρτης. Οι ΕΘΘ φτάνουν τους 26.1°C στον κόλπο της Σύρτης στα δεδομένα NCEP, τους 26.3°C στα CMEMS και τους 26.7°C στα ECMWF. Χαμηλότερες ΕΘΘ παρατηρούνται στο Αιγαίο Πέλαγος με τιμές από 18°C έως 22°C και στις τρεις πηγές (Σχήμα 5.8α). Η χωρική κατανομή των ΕΘΘ είναι παρόμοια στα 3 σύνολα δεδομένων. Από τις διαφορές ΕΘΘ που προέκυψαν μεταξύ του CMEMS και του NCEP παρατηρούνται κυρίως αρνητικές ανωμαλίες έως -1.5°C στην Κεντρική Μεσόγειο και νότια της Ιταλίας και θετικές έως +1.5°C στα παράλια του Ιονίου πελάγους. Αντίθετα, η διαφορά ECMWF-NCEP έδωσε στο μεγαλύτερο τμήμα της Μεσογείου θετικές ανωμαλίες από +0.5°C έως +1.5°C στο θαλάσσιο χώρο δυτικά του Ιονίου και έως +2°C σε τοπικά σημεία νότια της Σικελίας (Σχήμα 5.8β).

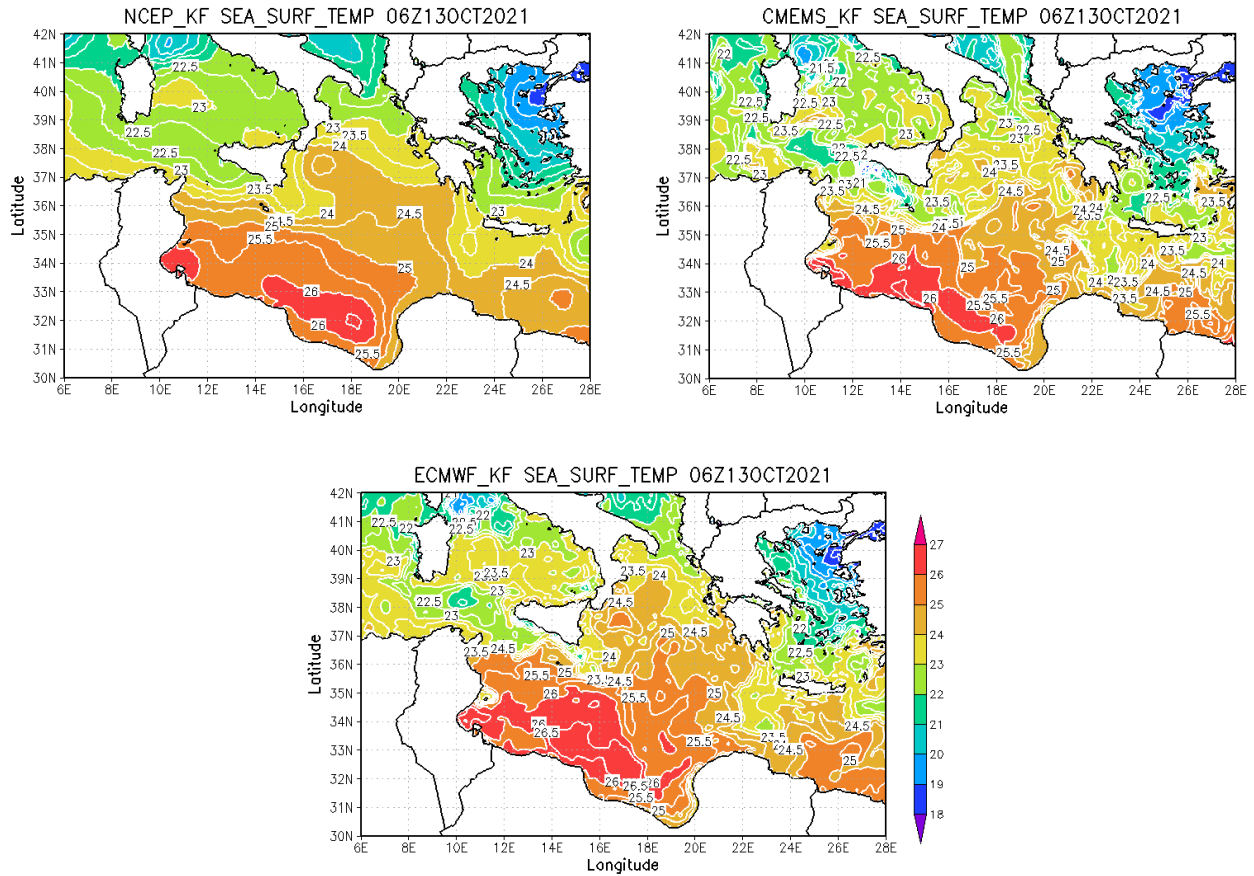
Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται οι ΕΘΘ της πρώτης (13/10) ημέρας των προσομοιώσεων για τις βάσεις δεδομένων του NCEP, CMEMS και ECMWF. Στις 13/10 06 UTC παρατηρούνται τιμές από 18°C στο βόρειο Αιγαίο και στις τρεις πηγές και φτάνουν έως 26.6°C στα δεδομένα του NCEP, 26.7°C στα CMEMS και 27°C στα ECMWF στον κόλπο της Σύρτης. Στο Ιόνιο πέλαγος σημειώνονται θερμοκρασίες 22°C-24.5°C σε NCEP&CMEMS και 23°C-25°C σε ECMWF. Στο Σχήμα 5.10 φαίνονται σχετικά μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στις 13/10 και 17/10 με αρνητικές ανωμαλίες έως -2.5°C με -3°C νότια της Ιταλίας στα δεδομένα CMEMS και ECMWF. Αντίθετα, μικρές θετικές ανωμαλίες έως +0.5°C απαντώνται σε μεγάλο τμήμα του Αιγαίου Πελάγους στην πηγή NCEP, ενώ σε περιορισμένα μόνο σημεία παρατηρούνται για τις πηγές CMEMS και ECMWF (Σχήμα 5.10). Από τις ανωμαλίες του Σχήματος 5.10 είναι εμφανής η ψύξη των ΕΘΘ από τις 13/10 έως τις 17/10. Γενικά, η μείωση των ΕΘΘ μπορεί να προκληθεί από τη διέλευση ενός έντονου μετεωρολογικού συστήματος και κατ' επέκταση τις επιφανειακές ροές θερμότητας καθώς και από την ανάμειξη των επιφανειακών στρωμάτων της θάλασσας λόγω των ανέμων (Bouin and Brossier, 2020; Varlas et al., 2023).



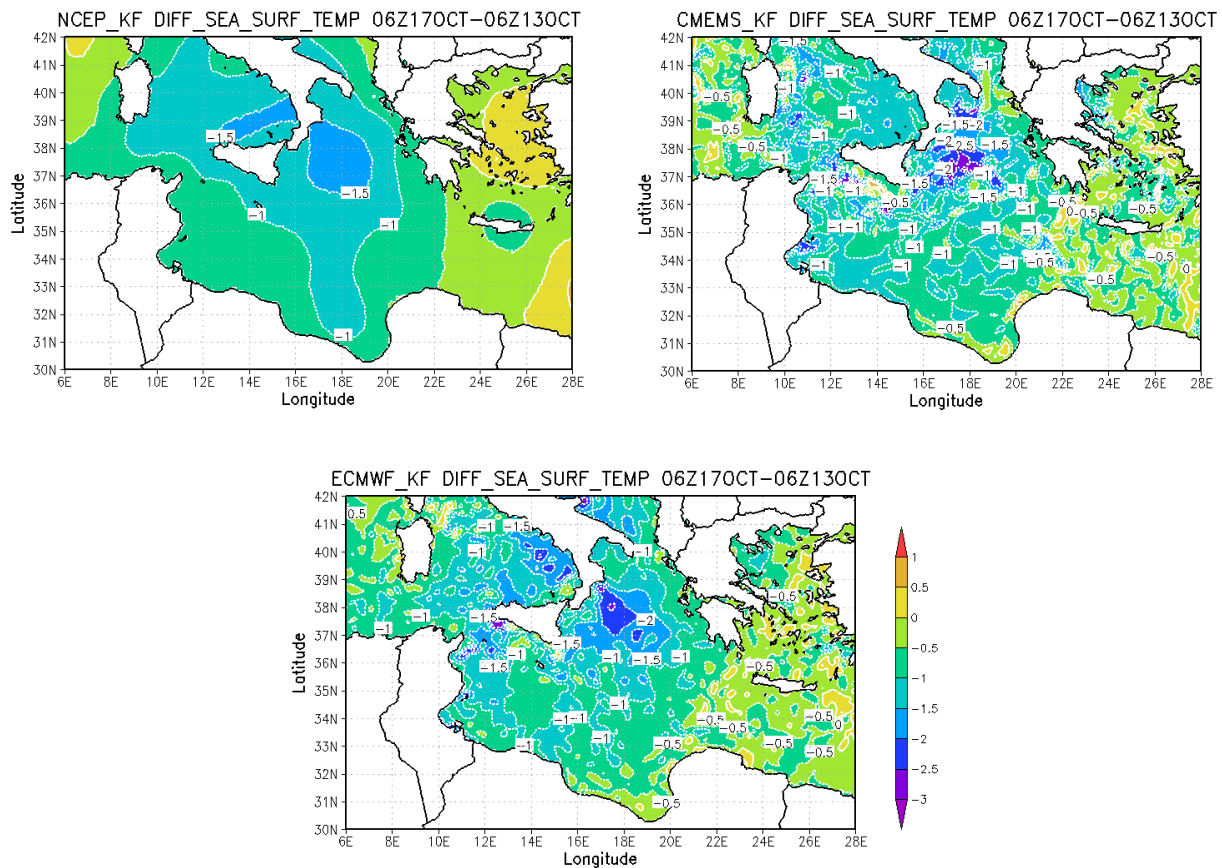
Σχήμα 5.8α: Μεσοποιημένοι χρονικά χάρτες των ΕΘΘ για το διάστημα 13/10/2021 06 UTC έως 17/10/2021 06 UTC (σκίαση ανά 1°C) για τα δεδομένα NCEP, CMEMS και ECMWF (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



Σχήμα 5.8β: Διαφορές μεταξύ των δεδομένων CMEMS-NCEP και ECMWF-NCEP για τις μεσοποιημένες ΕΘΘ του διαστήματος 13/10/2021 06 UTC έως 17/10/2021 06 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



Σχήμα 5.9: Θερμοκρασίες επιφάνειας της θάλασσας (σκίαση ανά 1°C) στις 13/10/2021 06 UTC για τα δεδομένα NCEP, CMEMS και ECMWF (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



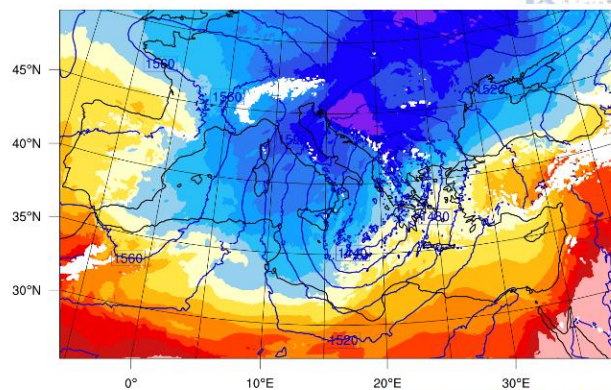
Σχήμα 5.10: Ανωμαλίες ΕΘΘ από τη διαφορά 17/10 06 UTC - 13/10 06 UTC για τα δεδομένα NCEP, CMEMS και ECMWF (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).

5.4.2 Θερμοκρασία και Γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa

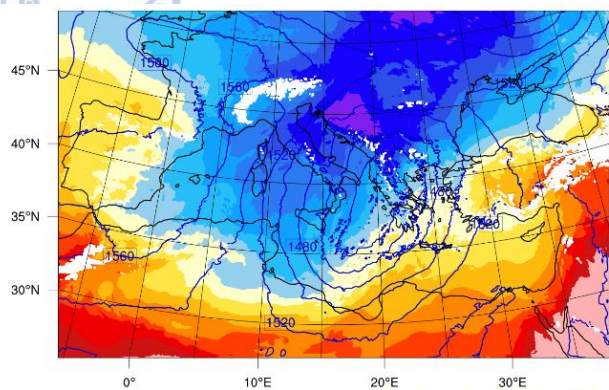
Αρχικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για τις περισσότερες μεταβλητές επιλέγονται να δειχθούν χάρτες τις χρονικές στιγμές 14/10 12 UTC με την εκδήλωση του έντονου υετού και 15/10/2021 12 UTC με το πέρας των έντονων φαινομένων. Στα πειράματα και των τριών βάσεων δεδομένων ΕΘΘ παρατηρείται ένα βαθύ κέντρο χαμηλών γεωδυναμικών υψών στα 850 hPa, το οποίο εντοπίζεται πάνω από την περιοχή της Κέρκυρας και δυτικά του Ιονίου Πελάγους με τιμή 1420 gpm στις 14/10 12 UTC. Καθώς το χαμηλό κινείται, μεταφέρονται ψυχρές αέριες μάζες (μπλε χρωματισμοί) από την κεντρική και βόρεια Ευρώπη προς τη δυτική Ελλάδα. Αντίθετα, η ΝΔ ροή στα νότια και ανατολικά της χώρας έχει σαν αποτέλεσμα να εισχωρούν σαν σφήνα θερμότερες αέριες μάζες (εκρού σκίαση) από τα βόρεια της Αφρικής (Σχήμα 5.11). Στις 14/10 12 UTC, η θερμοκρασία των 850 hPa στη βόρεια και ηπειρωτική Ελλάδα κυμαίνεται από 6°C έως 10°C, ενώ στα νότια και ανατολικά από 10°C έως 12°C (Σχήμα 5.11). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις αναλύσεις του ECMWF, που δείχνουν την πραγματική κατάσταση (Σχήμα 3.8 και Σχήμα 5.11).

Στις 15/10 12 UTC, το κέντρο των χαμηλών γεωδυναμικών υψών έχει βαθύνει στις προσομοιώσεις και των τριών πηγών ΕΘΘ, όπως φαίνεται με τις πιο κλειστές ισοϋψείς καμπύλες και εντοπίζεται στα βόρεια του Ιονίου Πελάγους - δυτικά της Αλβανίας. Οι ψυχρές αέριες μάζες έχουν πλέον εισχωρήσει σε ολόκληρη σχεδόν την Ελλάδα με τις θερμοκρασίες να κυμαίνονται από 6°C έως 8°C σε ορισμένα τμήματα της βόρειας και δυτικής Ελλάδας, από 8°C έως 10°C σε όλα τα υπόλοιπα τμήματα της ηπειρωτικής χώρας και από 10°C έως 14°C στην ΝΑ Ελλάδα (Σχήμα 5.11). Γενικά, παρατηρείται παρόμοια εικόνα θερμοκρασίας και στους τρεις χάρτες (Σχήμα 5.11). Σε σύγκριση με τις αναλύσεις του ECMWF, παρατηρείται ότι τα πειράματα προσομοίωσαν ελαφρώς πιο αβαθές χαμηλό των υψών (Σχήμα 3.9 και Σχήμα 5.11).

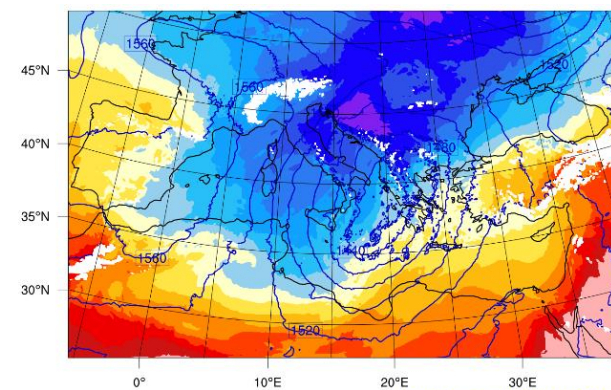
Από τις θερμοκρασιακές διαφορές που παράχθηκαν μεταξύ των πειραμάτων, παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες θετικές ανωμαλίες μεταξύ του ECMWF_KF και του CMEMS_KF, οι οποίες προσεγγίζουν τους +2.5°C σε ορισμένα σημεία του Ιονίου Πελάγους και νότια της Πελοποννήσου στις 14/10 12 UTC και σε ορισμένα τμήματα του Ιονίου, στη Χαλκιδική, στα παραθαλάσσια τμήματα της κεντρικής Μακεδονίας και Θράκης και νότια της Κρήτης στις 15/10 12 UTC. Επίσης, αρνητικές ανωμαλίες της τάξης των -1.5°C με -2°C είναι εμφανείς στην παραθαλάσσια περιοχή ΝΔ της Κρήτης στις 14/10 και στην κεντρική Μακεδονία στις 15/10 12 UTC (Σχήμα 5.12). Μεγαλύτερες αρνητικές ανωμαλίες σημειώνονται στη διαφορά CMEMS_KF-NCEP_KF στις 15/10 12 UTC με το μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας να εμφανίζει τιμές από +0.5°C έως -1.5°C. Τέλος, η διαφορά ECMWF_KF-NCEP_KF έδωσε θετικές ανωμαλίες (υποδεικνύοντας υψηλότερες τιμές στην προσομοίωση με τα δεδομένα του ECMWF) στη δυτική Ελλάδα, στο Ιόνιο Πέλαγος, στον κόλπο της Σύρτης και σε παράκτια τμήματα της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης με εύρος τιμών από +0.5°C έως +2°C στις 15/10 12 UTC, ενώ μικρές αρνητικές ανωμαλίες -0.5°C σημειώνονται στο μεγαλύτερο τμήμα του Αιγαίου Πελάγους στις 14/10 και 15/10 12 UTC (Σχήμα 5.12). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η περιοχή που εμφανίζει τις μεγαλύτερες διαφορές στο Σχήμα 5.12 είναι η Ελλάδα και τμήματα γύρω από αυτήν, που επηρεάστηκαν από το σύστημα «Μπάλλος».



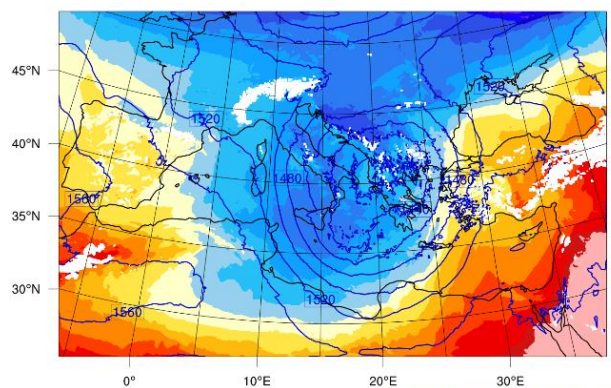
NCEP_KF - 14/10/2021 12 UTC



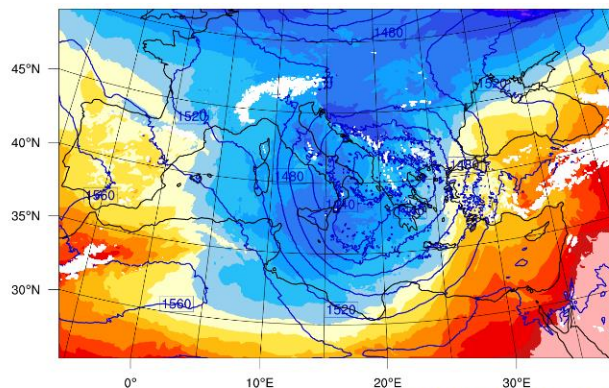
CMEMS_KF - 14/10/2021 12 UTC



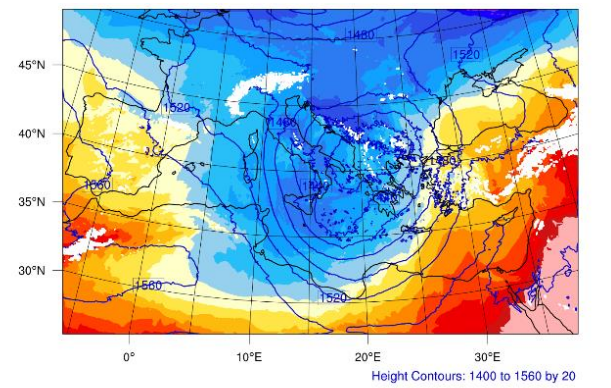
ECMWF_KF - 14/10/2021 12 UTC



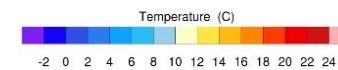
NCEP_KF - 15/10/2021 12 UTC



CMEMS_KF - 15/10/2021 12 UTC



ECMWF_KF - 15/10/2021 12 UTC



Σχήμα 5.11: Χάρτες που απεικονίζουν τη θερμοκρασία (σκίαση ανά 2°C) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 20 gpm) στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa για τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



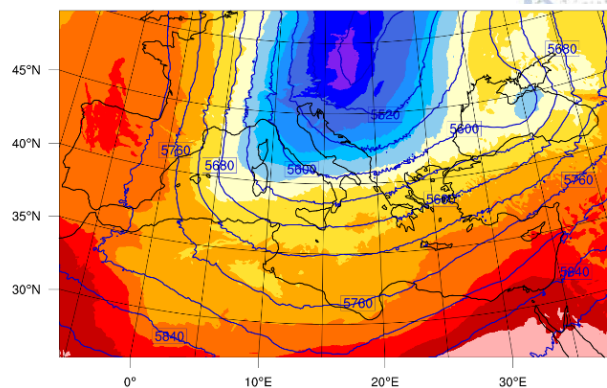
Σχήμα 5.12: Διαφορές θερμοκρασίας (K) των πηγών CMEMS-NCEP, ECMWF-NCEP και ECMWF-CMEMS στην ισοβαρική επιφάνεια των 850 hPa στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).

5.4.3 Θερμοκρασία και Γεωδυναμικό ύψος στα 500 hPa

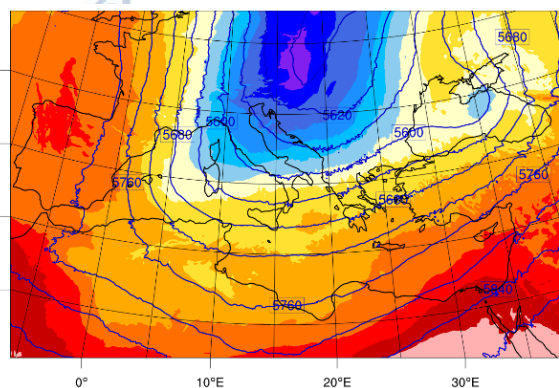
Για την ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa επιλέχθηκαν χάρτες από τις 13/10, επειδή είναι σημαντικό να εξεταστεί η κατάσταση της ατμόσφαιρας στα ανώτερα στρώματα μια μέρα πριν ξεκινήσει να δίνει φαινόμενα το υπό μελέτη σύστημα, καθώς εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για τις επόμενες ημέρες. Παρατηρείται ότι και οι τρεις πηγές δεδομένων δίνουν ίδια αποτελέσματα, υποδηλώνοντας ότι η κατάσταση που επικρατεί στη στάθμη των 500 hPa δεν είναι ευαίσθητη σε διαφορετικές ΕΘΘ μετά από 12 ώρες προσομοίωσης. Σχετικά με την συνοπτική ανάλυση, παρουσιάζεται ένας αυλώνας που εκτείνεται από την βόρεια και κεντρική Ευρώπη μέχρι την Κεντρική Μεσόγειο. Στις 13/10 12 UTC, η θερμοκρασία στον ψυχρό πυρήνα του αυλώνα είναι χαμηλότερη από -30°C , ενώ το γεωδυναμικό ύψος έχει τιμή περίπου 5480 gpm. Στην Ελλάδα επικρατεί μια δυτική-νοτιοδυτική ροή με ύψη 5600-5720 gpm και θερμοκρασίες από -20°C έως -14°C (Σχήμα 5.13).

Στις 14/10 12 UTC παρατηρείται ένας αυλώνας χαμηλών γεωδυναμικών υψών πάνω από την Ιταλία, συνοδευόμενος από ψυχρές αέριες μάζες, ο οποίος εκτείνεται μέχρι τα παράλια της βόρειας Αφρικής. Οι τιμές στο κέντρο του κλειστού χαμηλού που βρίσκεται στα σύνορα Κροατίας-Σλοβενίας είναι περίπου 5520 gpm με θερμοκρασίες από -26°C έως -24°C (Σχήμα 5.13). Η διάταξη των ισοϋψών στην Ελλάδα γίνεται μεσημβρινή με καλά δομημένη ΝΔ ροή και θερμοκρασίες στη βόρεια και δυτική Ελλάδα από -18°C έως -16°C , ενώ στη νότια και ανατολική χώρα από -16°C έως -14°C (Σχήμα 5.13). Παρόμοιες θερμοκρασίες σημειώνονται και στα δεδομένα αναλύσεων του ECMWF (Σχήμα 3.10).

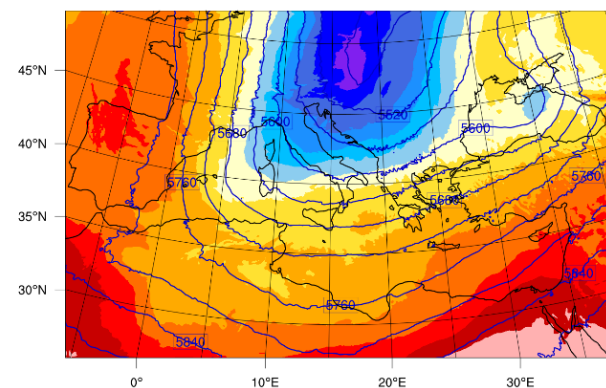
Από τις θερμοκρασιακές ανωμαλίες που παράχθηκαν για την ισοβαρική στάθμη των 500 hPa μεταξύ των πειραμάτων NCEP_KF, CMEMS_KF και ECMWF_KF παρατηρείται ότι στις 13/10 δεν σημειώνονται σαφείς διαφορές με τις τιμές να κυμαίνονται κοντά στο 0. Αντίθετα, στις 14/10 12 UTC, που σημειώθηκαν και τα πρώτα φαινόμενα, εμφανίζονται διακριτές διαφορές στην περιοχή της Ελλάδας. Τις πιο έντονες θετικές και αρνητικές ανωμαλίες παρουσιάζει η διαφορά ECMWF_KF-CMEMS_KF, με θετικές ανωμαλίες $+1^{\circ}\text{C}$ να παρατηρούνται στον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας και $+2^{\circ}\text{C}$ με $+2.5^{\circ}\text{C}$ ανατολικά της Σικελίας, ενώ αρνητικές ανωμαλίες της τάξης των -0.5°C έως -2°C σημειώνονται πάνω από το Ιόνιο Πέλαγος καθώς και στα παράκτια τμήματα της Θεσσαλίας και της Στερεάς Ελλάδας (Σχήμα 5.14). Η διαφορά CMEMS_KF-NCEP_KF έδωσε θετικές ανωμαλίες $+0.5^{\circ}\text{C}$ έως $+1.5^{\circ}\text{C}$ στα περισσότερα παράκτια τμήματα της Ελλάδας και $+1.5^{\circ}\text{C}$ έως $+2.5^{\circ}\text{C}$ ΝΑ της Σικελίας, ενώ αρνητικές διαφορές σημειώνονται στη θαλάσσια περιοχή ανατολικά της Σικελίας και στη Στερεά Ελλάδα με τιμές -1°C έως -2°C . Τέλος, μικρότερες τιμές υπολογίστηκαν από τη διαφορά ECMWF_KF-NCEP_KF. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες ανωμαλίες και στις τρεις διαφορές εντοπίζονται στο Ιόνιο Πέλαγος και στον ευρύτερο θαλάσσιο χώρο μεταξύ Ελλάδας και ΝΑ Ιταλίας (Σχήμα 5.14).



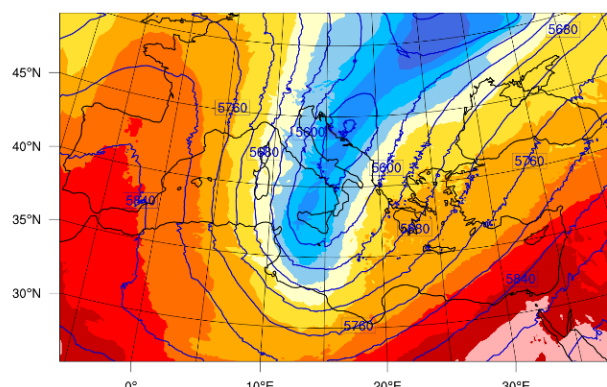
NCEP_KF - 13/10/2021 12 UTC



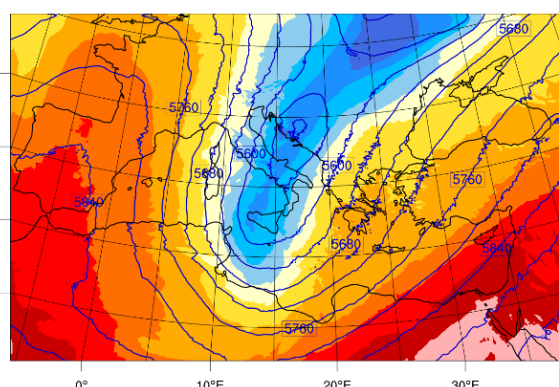
CMEMS_KF - 13/10/2021 12 UTC



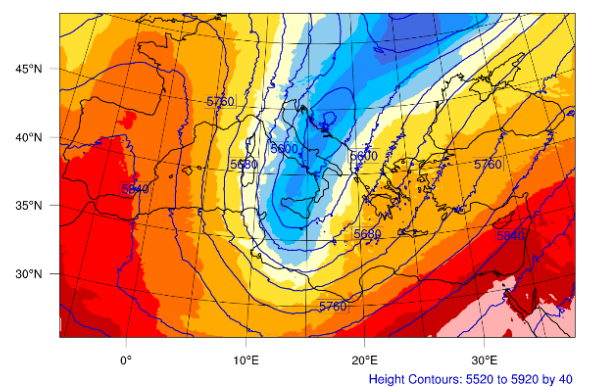
ECMWF_KF - 13/10/2021 12 UTC



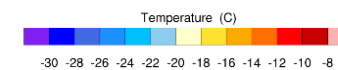
NCEP_KF - 14/10/2021 12 UTC



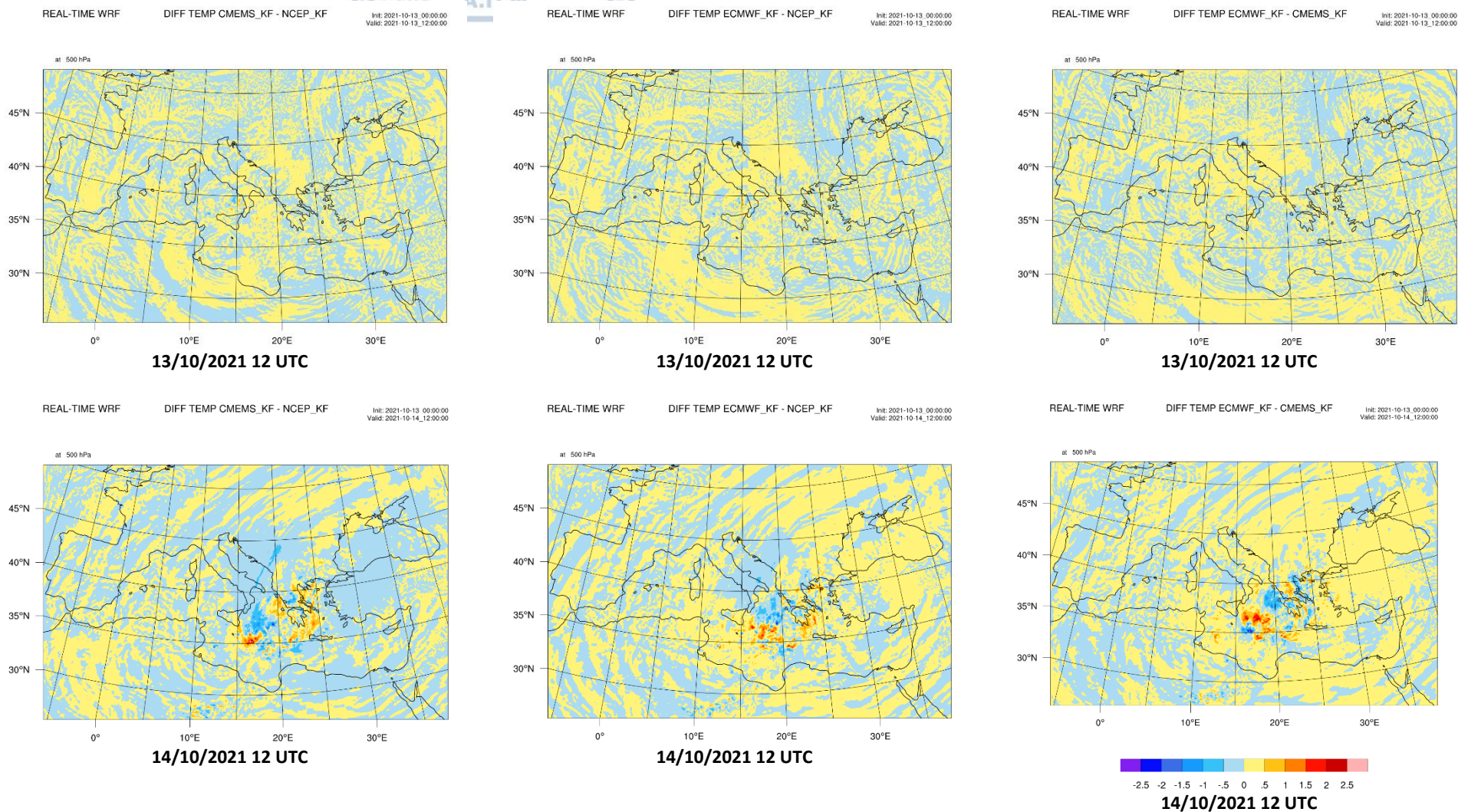
CMEMS_KF - 14/10/2021 12 UTC



ECMWF_KF - 14/10/2021 12 UTC



Σχήμα 5.13: Χάρτες που απεικονίζουν τη θερμοκρασία (σκίαση ανά 2°C) και το γεωδυναμικό ύψος (ισοϋψείς ανά 40 gpm) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa για τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF στις 13/10 και 14/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



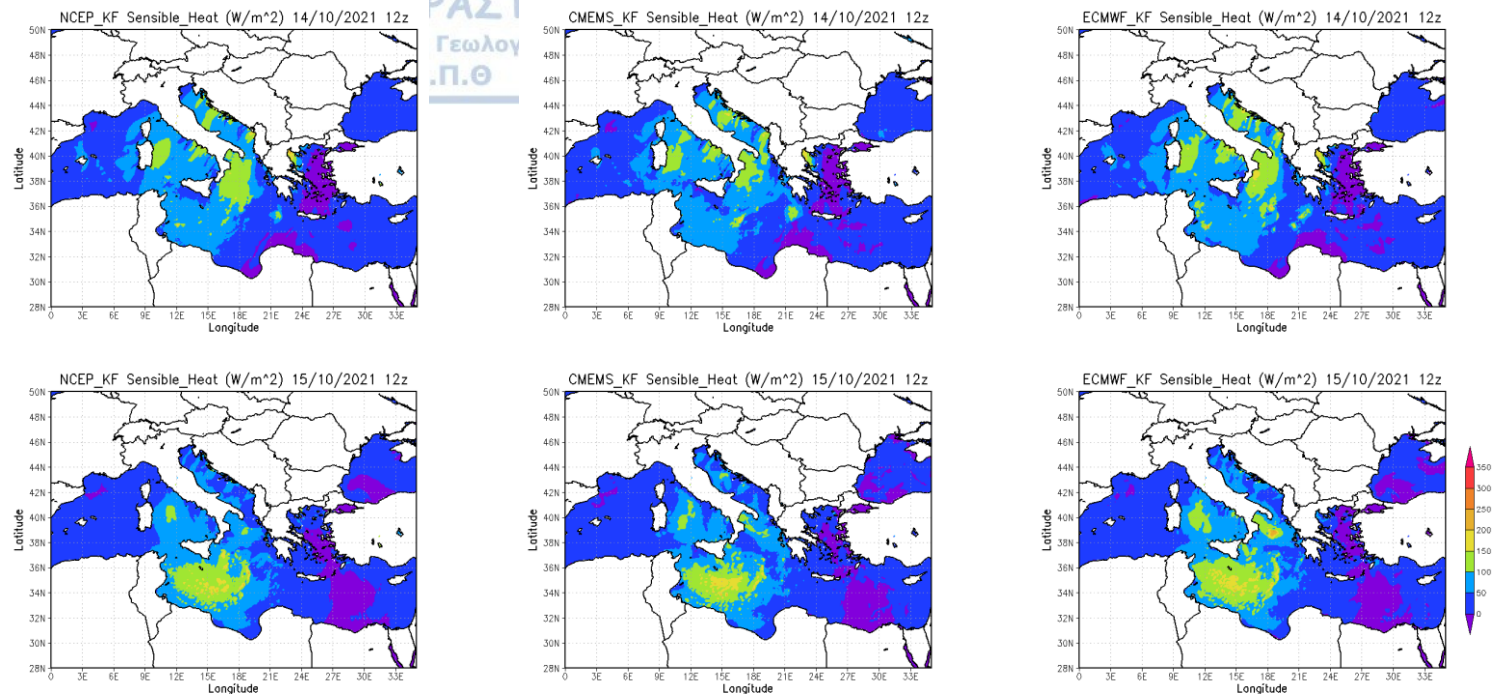
Σχήμα 5.14: Διαφορές θερμοκρασίας (K) των πηγών CMEMS-NCEP, ECMWF-NCEP και ECMWF-CMEMS στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).

5.4.4 Επιφανειακές ροές αισθητής θερμότητας

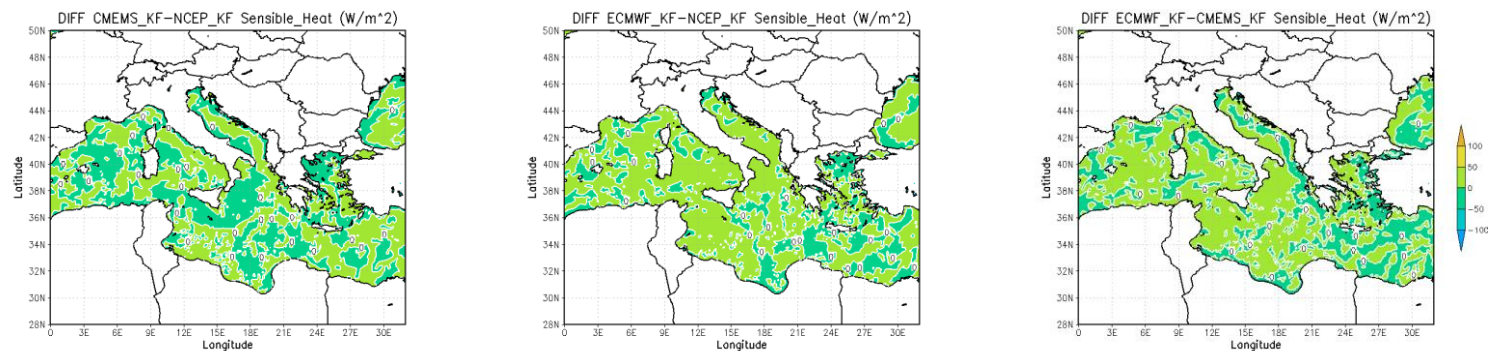
Η μέση τιμή για την επιφανειακή αισθητή ροή θερμότητας στις 14/10 12 UTC λαμβάνοντας υπόψη τα θαλάσσια σημεία στην περιοχή του Σχήματος 5.15 για τις προσομοιώσεις με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP_KF είναι 35.51 W/m^2 , του CMEMS_KF 34.98 W/m^2 και του ECMWF_KF 38.05 W/m^2 . Οι υπολογισμοί αυτοί βρίσκονται σε συμφωνία με τις θερμότερες ΕΘΘ του ECMWF καθώς και τις δεύτερες και τρίτες θερμότερες του NCEP και CMEMS, αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στην Αδριατική θάλασσα, στη θαλάσσια περιοχή νότια της Ιταλίας και στον Θερμαϊκό Κόλπο με ροές θερμότητας $100\text{-}150 \text{ W/m}^2$ και τοπικά έως 200 W/m^2 . Ιδιαίτερα στον Θερμαϊκό Κόλπο φτάνουν τα $250\text{-}300 \text{ W/m}^2$ στις προσομοιώσεις των δεδομένων του NCEP_KF (Σχήμα 5.15).

Η μέση τιμή της αισθητής ροής θερμότητας στις 15/10 12 UTC στη Μεσόγειο για τις προσομοιώσεις του NCEP_KF είναι 32.68 W/m^2 , του CMEMS_KF 32.28 W/m^2 και του ECMWF_KF 34.47 W/m^2 . Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στην κεντρική Μεσόγειο, βόρεια του κόλπου της Σύρτης με τις ροές θερμότητας να κυμαίνονται περίπου $150\text{-}200 \text{ W/m}^2$. Επίσης, στο πείραμα ECMWF_KF στις 15/10 12 UTC παρατηρούνται αυξημένες ροές αισθητής θερμότητας στη θαλάσσια περιοχή του Ιονίου νότια της Ιταλίας με τιμές που προσεγγίζουν τοπικά τα 250 W/m^2 (Σχήμα 5.15) με τις ΕΘΘ να κυμαίνονται από 23°C έως 24°C σε εκείνο το σημείο (δεν απεικονίζεται). Οι χαμηλότερες τιμές σημειώνονται στην ανατολική Μεσόγειο και σε τμήματα του Αιγαίου Πελάγους.

Στο Σχήμα 5.16 παρατηρούνται οι διαφορές των ρών αισθητής θερμότητας μεταξύ των πειραμάτων NCEP_KF, CMEMS_KF και ECMWF_KF, οι οποίες είναι μικρές και σε αρκετά σημεία μηδενικές. Μικρές αρνητικές ανωμαλίες της τάξης των -50 W/m^2 σημειώνονται στις διαφορές CMEMS_KF-NCEP_KF και ECMWF_KF-NCEP_KF στο βόρειο Αιγαίο, ενώ στο Ιόνιο παρατηρούνται θετικές διαφορές $+50 \text{ W/m}^2$. Αντίθετα, στη διαφορά ECMWF_KF-CMEMS_KF εντοπίζονται θετικές ανωμαλίες έως $+50 \text{ W/m}^2$ στο δυτικό Αιγαίο και αρνητικές έως -50 W/m^2 στα παραθαλάσσια τμήματα του Ιονίου Πελάγους και στα ανατολικά παράλια της Μικράς Ασίας (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.15: Επιφανειακές ροές αισθητής θερμότητας (W/m²) στην περιοχή της Μεσογείου για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



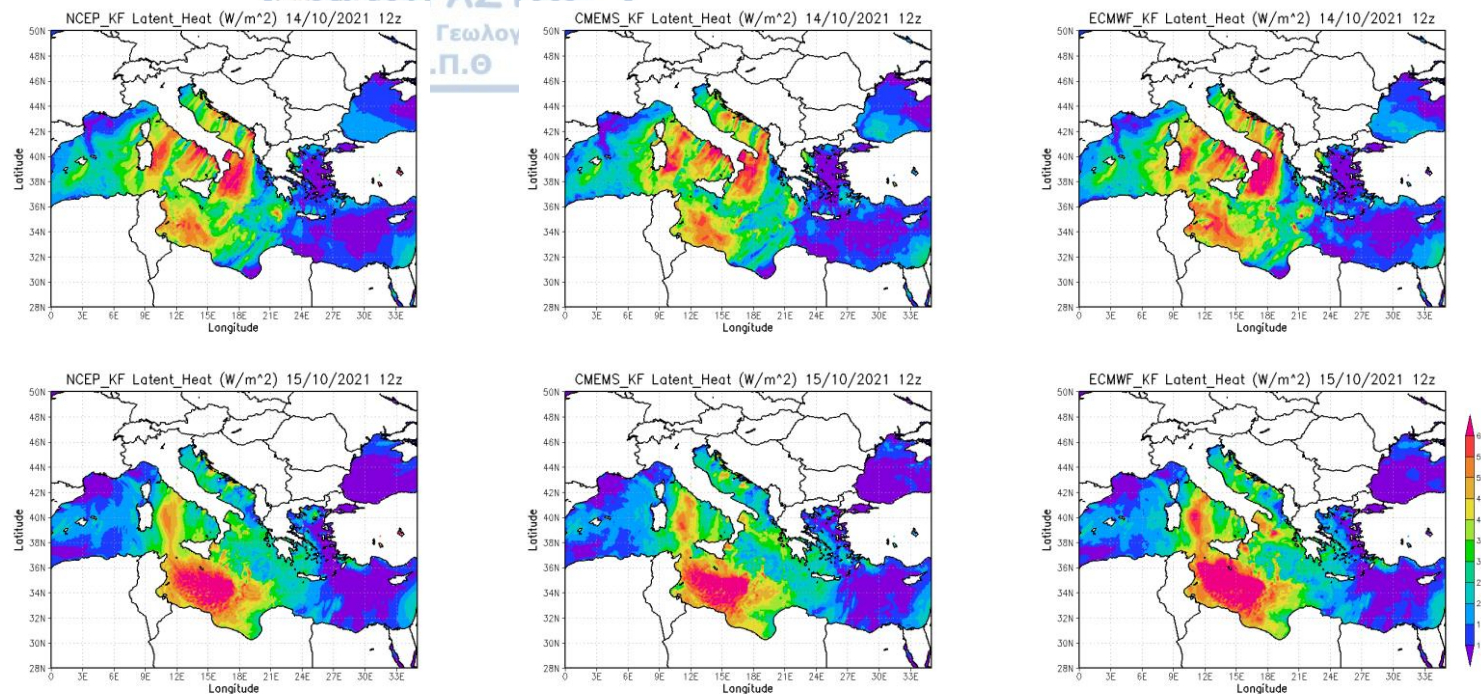
Σχήμα 5.16: Διαφορές μεσοποιημένων ροών λανθάνουσας θερμότητας (W/m²) των πηγών CMEMS-NCEP, ECMWF-NCEP και ECMWF-CMEMS στην περιοχή της Μεσογείου για το διάστημα από 13/10 06:00 UTC έως 16/10 18:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).

5.4.5 Επιφανειακές ροές λανθάνουσας θερμότητας

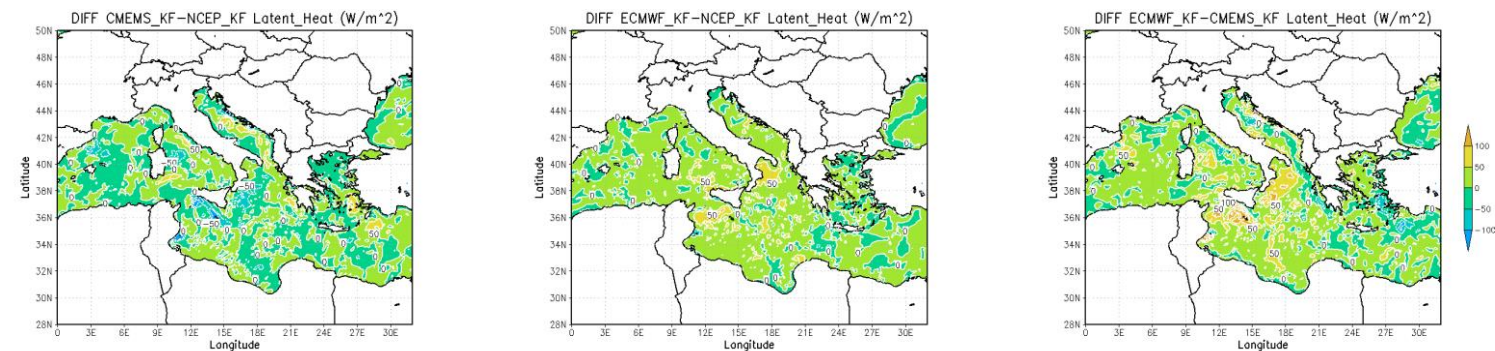
Η μέση τιμή των επιφανειακών ροών λανθάνουσας θερμότητας στις 14/10 12 UTC στην περιοχή της Μεσογείου για τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP_KF είναι 240.24 W/m^2 , του CMEMS_KF 236.45 W/m^2 και του ECMWF_KF 252.24 W/m^2 . Οι μέγιστες τιμές λαμβάνουν χώρα στην Αδριατική και Τυρρηνική θάλασσα καθώς και νότια της Ιταλίας στο δυτικό Ιόνιο Πέλαγος με τις ροές λανθάνουσας θερμότητας να φθάνουν τοπικά πάνω από 600 W/m^2 (Σχήμα 5.17), πιθανόν λόγω ισχυρών ανέμων (Σχήμα 3.18). Στο Αιγαίο Πέλαγος επικρατούν χαμηλές τιμές κάτω από 100 W/m^2 . Επίσης, τα πειράματα με δεδομένα ΕΘΘ του ECMWF εμφανίζουν τις μεγαλύτερες ροές σε σχέση με τις άλλες πηγές στα ανοικτά του Ιονίου Πελάγους - νότια της Ιταλίας (Σχήμα 5.17). Σε αυτή την περιοχή παρατηρούνται υψηλότερες ΕΘΘ σε σχέση με τις άλλες πηγές.

Οι μέσες τιμές της ροής λανθάνουσας θερμότητας στις 15/10 12 UTC στην περιοχή της Μεσογείου για τις προσομοιώσεις του NCEP_KF είναι 220.31 W/m^2 , του CMEMS_KF 221.45 W/m^2 και του ECMWF_KF 232.92 W/m^2 . Οι υψηλότερες τιμές απεικονίζονται στον κόλπο της Σύρτης με τιμές πάνω από 600 W/m^2 , καθώς εκεί εντοπίζονται και οι μεγαλύτερες ΕΘΘ. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές των ροών ήταν 807.94 W/m^2 στο πείραμα NCEP_KF, 797.76 W/m^2 στο CMEMS_KF και 834.53 W/m^2 στο ECMWF_KF. Το υψηλότερο μέγιστο στο πείραμα ECMWF_KF οφείλεται στις μεγαλύτερες ΕΘΘ που εμφανίζει αυτή η βάση δεδομένων σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ενδιάμεσες τιμές λανθάνουσας θερμότητας αποτυπώνονται στο Ιόνιο Πέλαγος, που κυμαίνονται από $250\text{-}350 \text{ W/m}^2$ στα πειράματα με δεδομένα του NCEP, από $300\text{-}400 \text{ W/m}^2$ στα CMEMS και από $300\text{-}550 \text{ W/m}^2$ στα ECMWF (Σχήμα 5.17). Επίσης, παρατηρείται ελαφρώς διαφορετική χωρική κατανομή της λανθάνουσας θερμότητας στο Αιγαίο Πέλαγος (Σχήμα 5.17).

Από τις διαφορές των ροών λανθάνουσας θερμότητας παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές κατά 50 W/m^2 έως 100 W/m^2 στο πείραμα NCEP_KF σε σχέση με το CMEMS_KF κυρίως στο Αιγαίο Πέλαγος και στα παράκτια τμήματα της Ιταλίας. Η διαφορά ECMWF_KF-NCEP_KF είχε σαν αποτέλεσμα κυρίως θετικές διαφορές με τιμές από 0 W/m^2 έως 50 W/m^2 στα περισσότερα τμήματα της Μεσογείου. Τέλος, μεγάλες θετικές διαφορές σημειώνονται μεταξύ ECMWF_KF και CMEMS_KF με τιμές πάνω από 50 W/m^2 στο Αιγαίο Πέλαγος (Σποράδες) και ΝΑ της Ιταλίας και πάνω από 100 W/m^2 νότια της Σικελίας (Σχήμα 5.18). Αυτό οφείλεται στις εμφανώς υψηλότερες (μεσοποιημένες) ΕΘΘ των δεδομένων του ECMWF σε σχέση με αυτές του CMEMS (Σχήμα 5.8α).



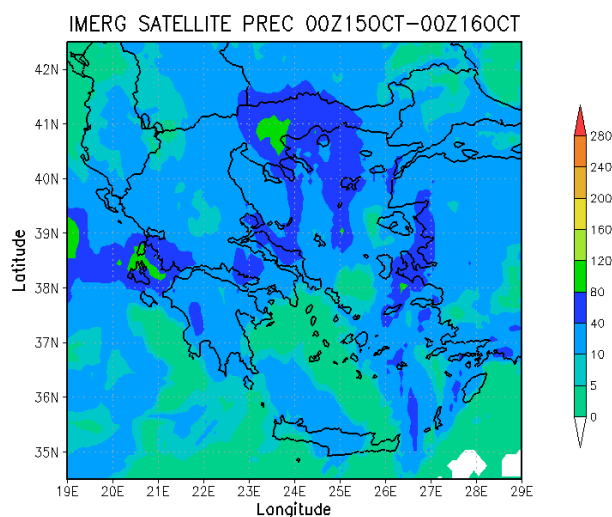
Σχήμα 5.17: Επιφανειακές ροές λανθάνουσας θερμότητας (W/m^2) στην περιοχή της Μεσογείου για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).



Σχήμα 5.18: Διαφορές μεσοποιημένων ρών λανθάνουσας θερμότητας (W/m^2) των πηγών CMEMS-NCEP, ECMWF-NCEP και ECMWF-CMEMS στην περιοχή της Μεσογείου για το διάστημα από 13/10 06:00 UTC έως 16/10 18:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 1).

Τα πρώτα φαινόμενα σημειώνονται στην Ελλάδα από τις 13/10 και εντοπίζονται κυρίως στο Ιόνιο πέλαγος και στη δυτική Ελλάδα (Σχήμα 5.20). Ο ημερήσιος υετός στην Ελλάδα παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές κατά το διάστημα 00Z 14/10 έως 00Z 15/10. Τα μεγαλύτερα ποσά υετού παρατηρούνται στα νησιά του Ιονίου, στην Ήπειρο, στη δυτική Στερεά Ελλάδα και στην Πελοπόννησο με τιμές υετού που ξεπερνούν τοπικά τα 120 mm, αλλά και σε τμήματα της ανατολικής χώρας όπως στην Κεντρική-Ανατολική Μακεδονία και στη Θάσο. Η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης συμφωνεί με τα δεδομένα των μετρήσεων και την δορυφορική εκτίμηση. Το πείραμα με δεδομένα ΕΘΘ του NCEP_KF έδωσε υψηλότερα ποσά υετού στο μεγαλύτερο τμήμα της Πελοποννήσου σε σύγκριση με τα άλλα δύο πειράματα. Το πείραμα CMEMS_KF έδωσε μικρότερα ύψη βροχής στο κεντρικό και βόρειο Αιγαίο με τιμές πάνω από 10 mm σε σύγκριση με τα NCEP_KF και ECMWF_KF. Γενικά, τα πειράματα NCEP_KF και ECMWF_KF παρουσιάζουν παρόμοια χωρική κατανομή της βροχόπτωσης (Σχήμα 5.20).

Από τις 15/10 00 UTC έως τις 16/10 00 UTC, παρατηρείται μετατόπιση των βροχοπτώσεων προς τα ανατολικά και στις τρεις βάσεις δεδομένων, με τα πιο έντονα φαινόμενα να σημειώνονται στην Κεντρική Μακεδονία, στη Χαλκιδική, σε νησιά του ΒΑ Αιγαίου και στα Δωδεκάνησα. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών βάσεων ΕΘΘ, υπολογίστηκαν μεγαλύτερα ποσά υετού σε τμήματα της κεντρικής και ανατολικής Μακεδονίας στα πειράματα NCEP_KF και ECMWF_KF με τιμές από 40 mm έως 160 mm. Τα αποτελέσματα και των τριών πειραμάτων συμφωνούν στο ότι το διάστημα 15/10-16/10 σχεδόν ολόκληρη η Ελλάδα δέχτηκε ποσά υετού από 10 mm έως 80 mm (Σχήμα 5.20). Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τους χάρτες του δορυφορικού υετού (Σχήμα 5.19).

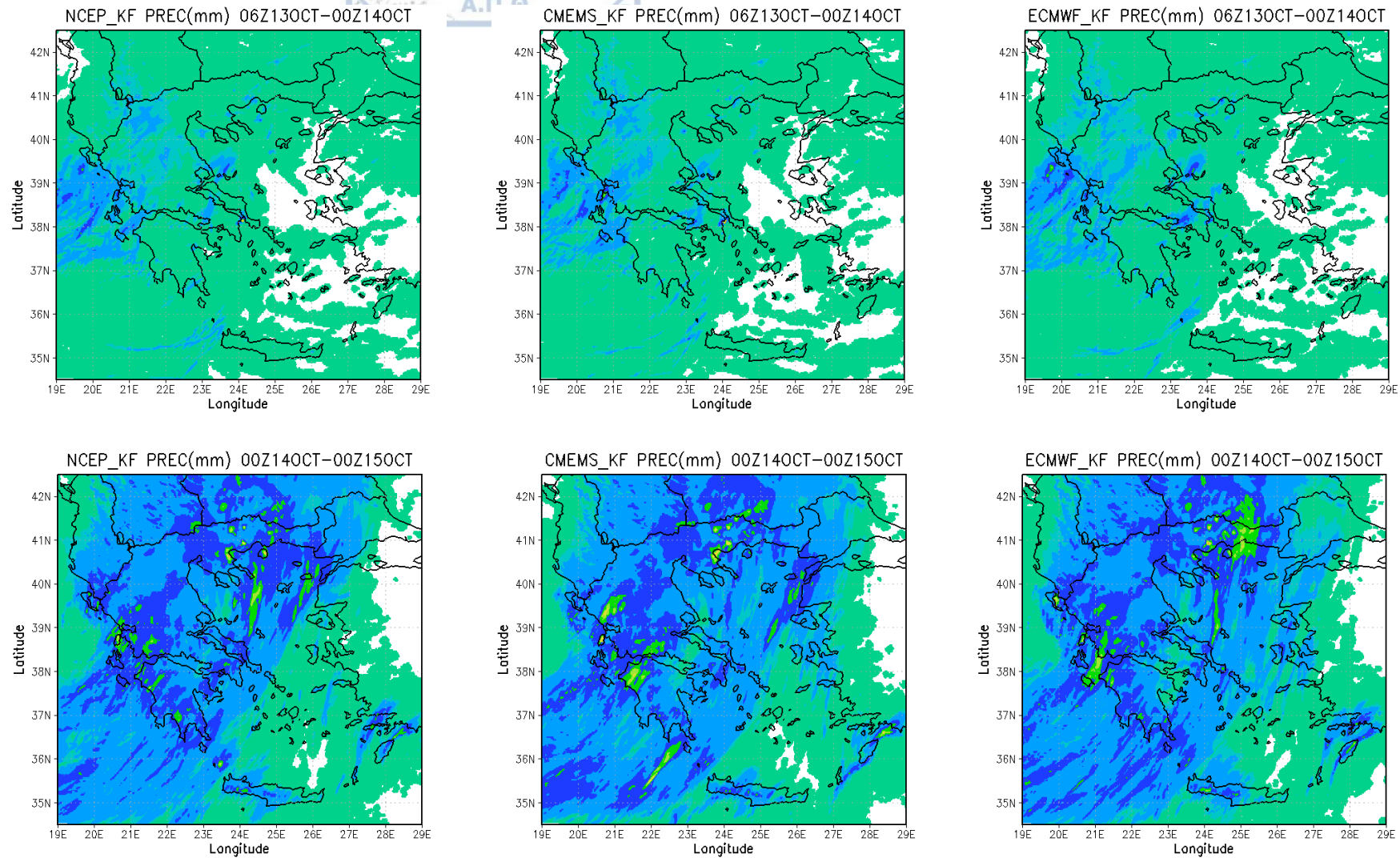


Σχήμα 5.19: Δορυφορικός ημερήσιος υετός για το διάστημα 15/10 00 UTC έως 16/10 00 UTC στην περιοχή της Ελλάδας (Δεδομένα: NASA).

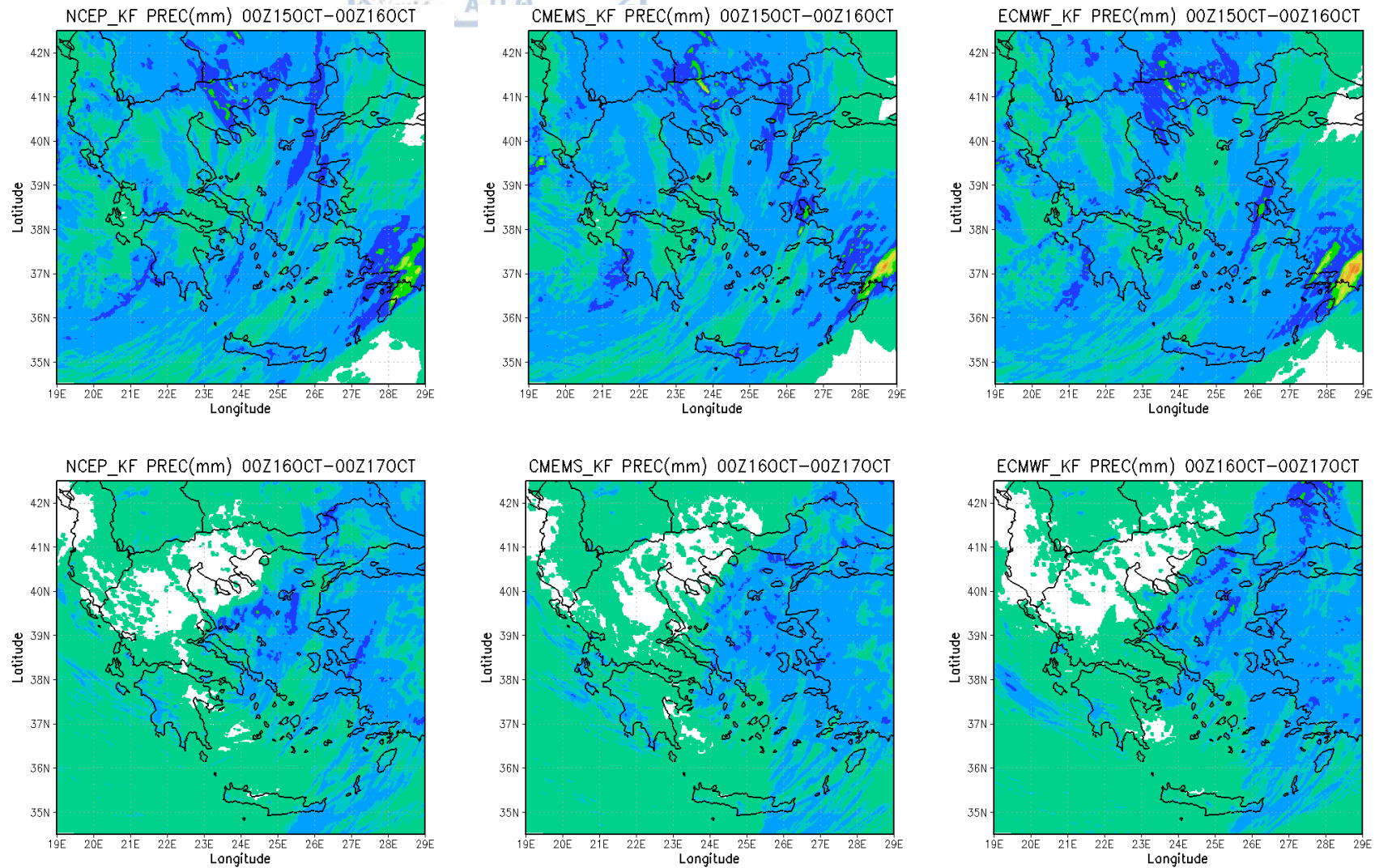
Για το διάστημα 16/10 00 UTC έως 17/10 00 UTC, δεν παρατηρείται καθόλου υετός στο μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής χώρας, ενώ τα όποια φαινόμενα εντοπίζονται μόνο στο Αιγαίο Πέλαγος. Τα μεγαλύτερα ποσά υετού εντοπίζονται σε θαλάσσιες περιοχές του κεντρικού και βόρειου Αιγαίου. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και στα τρία πειράματα, με υψηλότερα ποσά υετού να παρατηρούνται στη θαλάσσια περιοχή κοντά στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Σποράδων

στις προσομοιώσεις NCEP_KF και ECMWF_KF (Σχήμα 5.21). Τέλος, στο Σχήμα 5.22 απεικονίζεται η αθροιστικός υετός από τις 13/10 06 UTC έως τις 17/10 00 UTC. Οι περιοχές που σημείωσαν τα μεγαλύτερα ποσά υετού και στα τρία πειράματα είναι τα νησιά του Ιονίου, η δυτική Ήπειρος και Στερεά Ελλάδα, η Αττική, η Εύβοια, η δυτική Πελοπόννησος, το μεγαλύτερο τμήμα της κεντρικής και ανατολικής Μακεδονίας, τα νησιά του ΒΑ Αιγαίου και η Κρήτη. Περιοχές που δέχτηκαν μικρά ύψη βροχής αποτελούν η κεντρική Στερεά Ελλάδα, η ανατολική Πελοπόννησος, η δυτική Μακεδονία και οι Κυκλάδες (Σχήμα 5.22). Από τις διαφορές αθροιστικού υετού CMEMS-NCEP, οι μεγαλύτερες θετικές ανωμαλίες παρατηρούνται στην Ήπειρο, στη ΒΔ Πελοπόννησο και δυτικά των Κυθίων με τιμές πάνω από +75 mm, ενώ αρνητικές ανωμαλίες είναι εμφανείς στο κεντρικό βόρειο Αιγαίο με τιμές έως -100 mm. Η διαφορά ECMWF-NCEP, έδωσε μεγάλες θετικές ανωμαλίες στην περιοχή ανατολικά της Θάσου και της Χίου καθώς και σε τοπικά σημεία του Ιονίου, ενώ αρνητικές διαφορές εντοπίζονται στα παράκτια του ΒΑ Αιγαίου. Τέλος, από την διαφορά ECMWF-CMEMS υπολογίστηκαν μεγάλες θετικές ανωμαλίες ανατολικά της Θάσου, στις Σποράδες, στη Ρόδο και βόρεια της Ζακύνθου (Σχήμα 5.23).

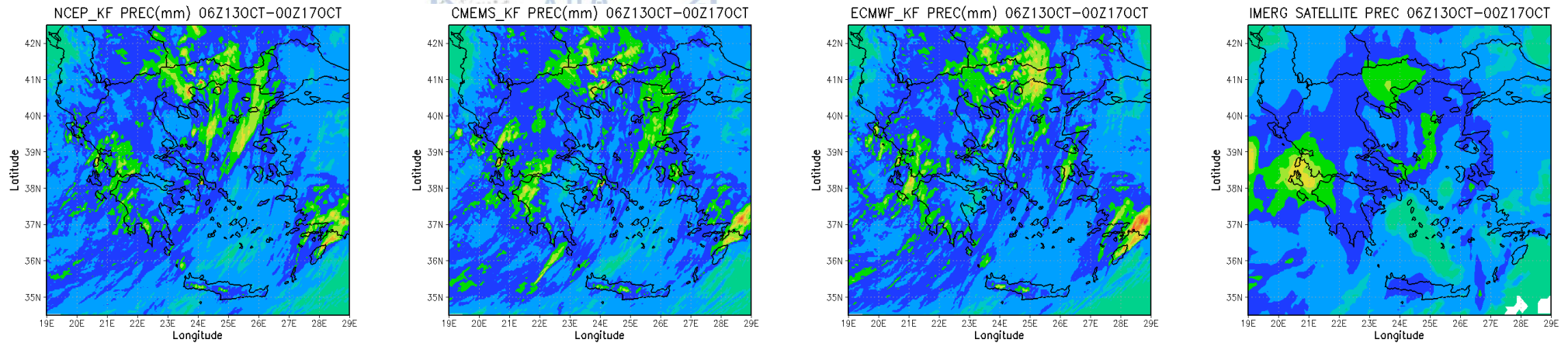
Συγκρίνοντας τον αθροιστικό υετό (13/10 06 UTC - 17/10 00 UTC) των πειραμάτων με τον δορυφορικό υετό παρατηρείται υποεκτίμηση στα νησιά του Ιονίου πελάγους και στα τρία πειράματα. Μικρή υπερεκτίμηση κυρίως για τη βόρεια και ανατολική χώρα παρουσιάζει το πείραμα ECMWF_KF. Τα ΒΑ παράλια του Αιγαίου δεν παρουσίασαν τόσο μεγάλα ύψη υετού στο πείραμα αυτό σε σύγκριση με τα άλλα δύο πειράματα, ενώ μεγαλύτερος υετός σημειώνεται στη δυτική Θράκη (Σχήμα 5.22). Παρόμοια αποτελέσματα με τον δορυφορικό υετό ως προς την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης για την κεντρική και ανατολική Μακεδονία με τιμές πάνω από 80 mm δίνουν οι βάσεις NCEP και ECMWF. Επίσης, από τον δορυφορικό υετό, οι μέγιστες τιμές εντοπίζονται στο Ιόνιο Πέλαγος, στη ΝΑ Στερεά Ελλάδα, στη ΒΔ Πελοπόννησο, στην Αττική-Εύβοια, στην κεντρική-ανατολική Μακεδονία και στο βόρειο Αιγαίο (Σχήμα 5.22). Από την παραπάνω ποιοτική ανάλυση εκτιμάται ότι ελαφρώς πιο αξιόπιστα αποτελέσματα υετού δίνουν τα δεδομένα NCEP και ECMWF, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τη στατιστική ανάλυση και τη βιβλιογραφία (Pytharoulis, 2018b; Katsafados et al., 2011).



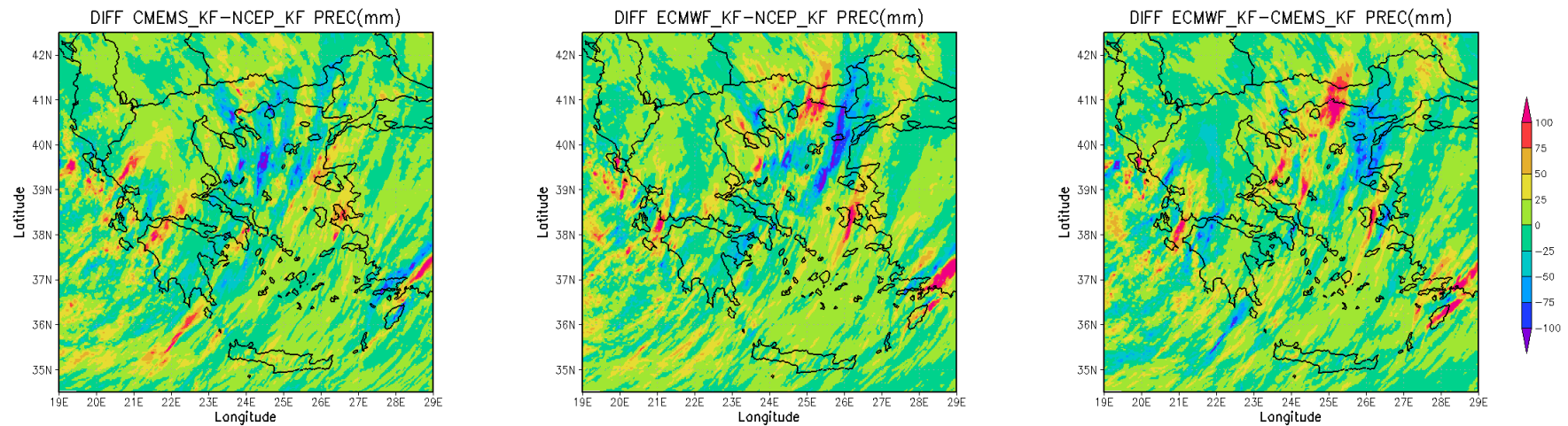
Σχήμα 5.20: Ημερήσιος υετός στα διαστήματα 13/10 06 UTC - 14/10 00 UTC (πάνω) και 14/10 00 UTC - 15/10 00 UTC (κάτω) στην περιοχή της Ελλάδας για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 2).



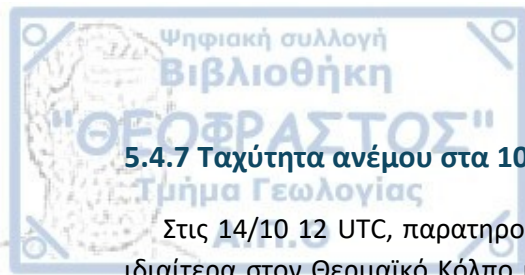
Σχήμα 5.21: Ημερήσιος υετός στα διαστήματα 15/10 00 UTC - 16/10 00 UTC (πάνω) και 16/10 00 UTC - 17/10 00 UTC (κάτω) στην περιοχή της Ελλάδας για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 2).



Σχήμα 5.22: Αθροιστικός υετός (13/10 06 UTC - 17/10 00 UTC) στην περιοχή της Ελλάδας για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF και δορυφορική εκτίμηση υετού (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 2 / NASA).

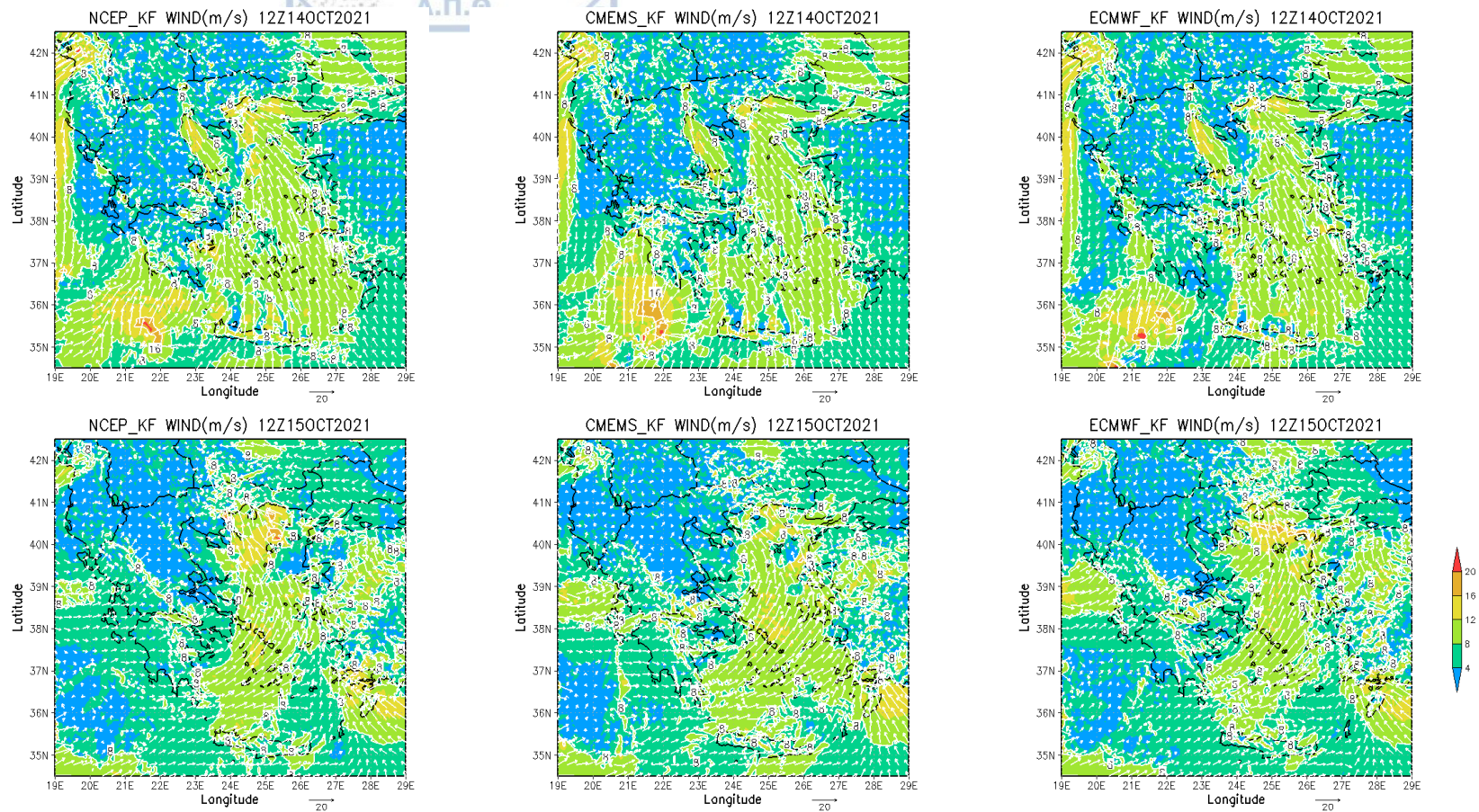


Σχήμα 5.23: Διαφορές αθροιστικού υετού (13/10 06 UTC - 17/10 00 UTC) των πηγών CMEMS-NCEP, ECMWF-NCEP και ECMWF-CMEMS στην περιοχή της Ελλάδας (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 2).



5.4.7 Ταχύτητα ανέμου στα 10 m

Στις 14/10 12 UTC, παρατηρούνται ισχυροί N-NA άνεμοι σε ολόκληρο το Αιγαίο Πέλαγος και ιδιαίτερα στον Θερμαϊκό Κόλπο και στα παράκτια τμήματα της Θεσσαλίας με ταχύτητες από 12 m/s έως 16 m/s. Πολύ ισχυροί άνεμοι εντοπίζονται επίσης και στο θαλάσσιο χώρο νότια του Ιονίου Πελάγους με τιμές πάνω από 20 m/s (Σχήμα 5.24). Στις 15/10 12 UTC, σημειώνεται μεγάλη σύγκλιση στα παράκτια τμήματα της ανατολικής Μακεδονίας, καθώς επικρατούν ισχυροί άνεμοι προερχόμενοι από το Αιγαίο, οι οποίοι συναντούν τους ασθενείς ανέμους στα παράκτια και χερσαία τμήματα της ανατολικής Ελλάδας. Η ένταση των ανέμων στο βόρειο Αιγαίο φτάνει περίπου τα 20 m/s. Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων NCEP_KF, CMEMS_KF και ECMWF_KF παρατηρείται ότι σε αυτά του NCEP και του ECMWF επικρατούν ισχυρότεροι άνεμοι στο βόρειο Αιγαίο (Σχήμα 5.24).



Σχήμα 5.24: Άνεμος στα 10 m από την επιφάνεια στην περιοχή της Ελλάδας για δεδομένα ΕΘΘ του NCEP, CMEMS και ECMWF στις 14/10 και 15/10/2021 στις 12:00 UTC (Δεδομένα: Αποτελέσματα μοντέλου WRF, Domain 2).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε η μελέτη του βαρομετρικού χαμηλού «Μπάλλος», το οποίο επηρέασε την Ελλάδα με κύριο χαρακτηριστικό τις πολύ ισχυρές βροχοπτώσεις την περίοδο 14 έως 16 Οκτωβρίου 2021. Το σύστημα απασχόλησε σε πρώτη φάση τη δυτική, κεντρική και βόρεια χώρα το διάστημα 14-15/10, ενώ σε δεύτερη φάση το ανατολικό τμήμα της χώρας από τις 15/10 έως και τις 16/10. Ο σκοπός της εργασίας μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά την συνοπτική και δυναμική ανάλυση του φαινομένου και το δεύτερο την αριθμητική μελέτη του μέσω της πραγματοποίησης πειραμάτων ευαισθησίας με διαφορετικά σχήματα ανωμεταφοράς και διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ χρησιμοποιώντας το μοντέλο WRF-ARW.

Αρχικά, η συνοπτική και δυναμική μελέτη του συστήματος πραγματοποιείται στα Κεφάλαια 3 και 4. Τα έντονα φαινόμενα εντοπίζονται κυρίως τις ημέρες 14/10 και 15/10. Ειδικότερα, στις 14/10 παρατηρούνται ισχυρές βροχοπτώσεις στο Ιόνιο Πέλαγος, στη δυτική Πελοπόννησο, στην Αττική, την Κεντρική Μακεδονία και τις Σποράδες, ενώ στις 15/10 τα φαινόμενα μετατοπίζονται ανατολικότερα επηρεάζοντας κυρίως περιοχές της ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Αξιοσημείωτα ποσά υετού παρουσίασαν η Κέρκυρα με 140 mm και η Ανδραβίδα με 91 mm από τις 14/10 06 UTC έως τις 15/10 06 UTC.

Το υπό μελέτη σύστημα ξεκίνησε ως ένα ασθενές βαρομετρικό χαμηλό στον κόλπο της Γένοβας στις 12/10. Την επόμενη μέρα έλαβε χώρα η βάθυνση του συστήματος και η συνοπτική εικόνα στις 14/10 περιλαμβάνει νότιους ανέμους και μεταφορά υγρών αερίων μαζών προς την ηπειρωτική Ελλάδα. Στις 15/10, επικρατούν υψηλές πιέσεις στη δυτική και κεντρική Ευρώπη, ενώ στην ΝΑ Ευρώπη παρατηρούνται χαμηλές πιέσεις, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρής βαροβαθμίδας και ενισχυμένης ανατολικής ροής στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τις ισχυρές βροχοπτώσεις και πλημμύρες που επηρέασαν περιοχές της Χαλκιδικής, της Εύβοιας και της Θεσσαλίας. Από τα θερμοδυναμικά διαγράμματα της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας στις 15/10 εξάγεται το συμπέρασμα του κορεσμού των υδρατμών σε ορισμένα στρώματα της κατώτερης και μέσης τροπόσφαιρας.

Από την ανάλυση των συνοπτικών χαρτών από τις πλεγματικές αναλύσεις του ECMWF εντοπίζεται αρχικά η σύγκλιση των ψυχρών και θερμών αερίων μαζών πάνω από τον Ελλαδικό χώρο. Επίσης, σημαντική είναι και η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων υγρασίας από το Αιγαίο Πέλαγος προς τον ηπειρωτικό κορμό της Ελλάδας, όπου λόγω των βουνών οι αέριες μάζες υπόκεινται σε απότομη άνοδο. Επιπλέον, η ύπαρξη αρκετά ψυχρών αερίων μαζών στα 500 hPa σε συνδυασμό με τις μεταφερόμενες θερμές-υγρές αέριες μάζες στα 850 hPa πάνω από την Ελλάδα, ενισχύουν την αστάθεια στην περιοχή.

Από τα διαγράμματα Hovmöller που απεικονίζουν την ισοδύναμη δυναμική θερμοκρασία παρατηρείται έντονη αστάθεια κυρίως στα χαμηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας. Αυτό συμβαίνει, επειδή έχουμε μείωση της θ_e με το ύψος κυρίως στην περιοχή της Αττικής, στη ΝΔ Στερεά Ελλάδα-ΒΔ Πελοπόννησο και στην Εύβοια. Από τα διαγράμματα Hovmöller της απόκλισης σημειώνεται ισχυρή σύγκλιση χαμηλά με απόλυτες τιμές που φτάνουν τα $1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ στις 06 UTC στις 15/10 στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Επίσης, από την ανάλυση του ανεμολογικού πεδίου της κατώτερης τροπόσφαιρας εντοπίζεται επίσης ισχυρή σύγκλιση στη Θεσσαλονίκη και

στα παράκτια τμήματα της βόρειας Ελλάδας, γεγονός που συνηγορεί με την παρατήρηση των διαγραμμάτων Hovmöller.

Από τη σύγκριση των ΕΘΘ του Οκτωβρίου 2021 και της περιόδου 1981-2020, παρατηρούνται υψηλότερες ΕΘΘ τον Οκτώβριο 2021 στο μεγαλύτερο τμήμα της Μεσογείου. Επίσης, τις ημέρες που επηρεάστηκε η Ελλάδα από το σύστημα Μπάλλος, παρατηρήθηκαν υψηλότερες ΕΘΘ από τις μέσες κλιματικές τιμές του Οκτωβρίου 1981-2020 κατά 0.5°C έως 1.5°C . Στο Αιγαίο σημειώθηκαν αρνητικές ανωμαλίες ΕΘΘ λόγω των ψυχρών (σε σχέση με την κλιματολογία) ΕΘΘ που έρχονται από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των Δαρδανελίων. Σε ορισμένες λεκάνες της Μεσογείου, όπως για παράδειγμα στον κόλπο της Σύρτης, την περίοδο του φαινομένου σημειώθηκαν επιφανειακές θερμοκρασίες θάλασσας έως και 26°C . Επιπλέον, από τις ανωμαλίες ΕΘΘ που παράχθηκαν συμπεραίνεται ότι τις ημέρες του φαινομένου επικρατούσαν υψηλότερες ΕΘΘ σε σχέση με το σύνολο των ημερών του Οκτωβρίου 2021.

Από τη δορυφορική μελέτη, άξιος αναφοράς θεωρείται ο εντοπισμός των πολύ υψηλών ποσοτήτων υγρασίας στο κανάλι 5 των υδρατμών με τις λευκές αποχρώσεις. Επίσης, από το κανάλι 9 του θερμικού υπερύθρου εξάγονται πληροφορίες για την θερμοκρασία της κορυφής των νεφών με τιμές 210 K-220 K στο Ιόνιο Πέλαγος, στη Στερεά Ελλάδα και στην Κρήτη. Τέτοιες θερμοκρασίες αντιστοιχούν σε ύψος περίπου 10 km (~ 250 hPa) στα μέσα γεωγραφικά πλάτη. Οι θερμοκρασίες αυτές υποδηλώνουν πολύ ψυχρές κορυφές νεφών, ενώ τα σημεία πάνω από τα οποία εντοπίστηκαν αυτά τα νέφη, αποτελούν περιοχές που δέχτηκαν μεγάλα ποσά υετού. Επιπλέον, στο κανάλι 5 των υδρατμών και στο κανάλι RGB Airmass απεικονίζεται η ανωμαλία της δυναμικής τροπόπαυσης στα Δυτικά Βαλκάνια, στις Κυκλάδες και στη νότια νησιωτική Ελλάδα σε συμφωνία με τους χάρτες της δυναμικής τροπόπαυσης.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF-ARW. Το μοντέλο ολοκληρώθηκε σε δύο πλέγματα, το εξωτερικό πλέγμα (d01) με χωρική διακριτοποίηση 6 km x 6 km, που περιλαμβάνει τη Μεσόγειο θάλασσα, τμήματα της κεντρικής και νότιας Ευρώπης και τη βόρεια Αφρική, και το εσωτερικό (d02) με 2 km x 2 km, που καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας. Αρχικά, έγιναν τρεις προσομοιώσεις με διαφορετικό σχήμα παραμετροποίησης ανωμεταφοράς στην εξωτερική περιοχή ολοκλήρωσης d01. Τα σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Kain-Fritsch (KF) και το Grell-Freitas (GF), ενώ πραγματοποιήθηκε και μία προσομοίωση χωρίς την εφαρμογή κάποιου σχήματος ανωμεταφοράς. Στο εσωτερικό πλέγμα δεν χρησιμοποιήθηκε παραμετροποίηση της ανωμεταφοράς λόγω της υψηλής χωρικής ανάλυσης. Μετά από στατιστική ανάλυση τόσο των συνεχών μεταβλητών (θερμοκρασία αέρα 2 m, θερμοκρασία σημείου δρόσου 2 m, πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου 10 m) όσο και του υετού, σε σχέση με επιφανειακές μετρήσεις σταθμών, επιλέχθηκε ως καλύτερο το πείραμα με το σχήμα ανωμεταφοράς KF (EXP_KF_cu1). Το σχήμα αυτό ήταν καλύτερο κατά 2.02% από το GF και κατά 3.56% από το πείραμα χωρίς παραμετροποίηση στις συνεχείς μεταβλητές, ενώ εμφάνισε τα βέλτιστα αποτελέσματα και στον υετό. Παρόμοια συμπεράσματα με καλύτερες αποδόσεις του σχήματος KF για τον υετό αναφέρονται και στη βιβλιογραφία (Χατζούδης, 2018).

Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν πειράματα με διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ. Οι τρεις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι του NCEP, του CMEMS και του ECMWF. Αντίστοιχα με τα πειράματα ελέγχου, υπολογίστηκαν στατιστικές παράμετροι για τις ίδιες συνεχείς μεταβλητές και τον υετό. Από τα αποτελέσματα αυτών, καλύτερη αναδείχθηκε η πηγή του NCEP με διαφορά 0.05%

από την πηγή του CMEMS και 2.44% από του ECMWF για τις συνεχείς μεταβλητές. Πιο αξιόπιστη βάση δεδομένων αναδείχθηκε αυτή του NCEP και για τον υετό, ενώ δεύτερη έρχεται του ECMWF. Οι Katsafados et al. (2011) και Pytharoulis (2018b) σε μελέτες έντονων φαινομένων στην Ελλάδα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η βάση ECMWF δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τον υετό.

Οι μέσες τιμές των ΕΘΘ για το διάστημα 13/10 06 UTC έως 17/10 06 UTC για την περιοχή της κεντρικής Μεσογείου (30°N - 42°N , 6°E - 28°E) ήταν 22.8°C για τις βάσεις δεδομένων NCEP και ECMWF και 22.6°C για τη βάση CMEMS. Οι υψηλότερες ΕΘΘ στα δεδομένα του NCEP και του ECMWF πιθανόν οφείλονται στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες θάλασσας που επικρατούν στον κόλπο της Σύρτης. Από τη διαφορά των ΕΘΘ για τις ημέρες 17/10 06 UTC - 13/10 06 UTC εντοπίστηκαν μεγάλες αρνητικές ανωμαλίες έως -3°C νότια της Ιταλίας στα δεδομένα CMEMS και ECMWF. Αντίθετα, μικρές θετικές ανωμαλίες έως $+0.5^{\circ}\text{C}$ εντοπίζονται στο Αιγαίο Πέλαγος. Η μείωση των ΕΘΘ που παρατηρείται από τις θερμοκρασιακές ανωμαλίες οφείλεται πιθανόν στις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας λόγω της διέλευσης του συστήματος «Μπάλλος» καθώς και στην ανάμειξη των επιφανειακών θαλάσσιων στρωμάτων λόγω των ανέμων.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι διαφορές μεταξύ των πειραμάτων με διαφορετικές ΕΘΘ. Οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες που παράχθηκαν στα 850 hPa, έδωσαν μεγαλύτερες τιμές κατά $+2.5^{\circ}\text{C}$ στο πείραμα ECMWF_KF σε σχέση με το CMEMS_KF σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας για τις 14/10 και 15/10. Οι διαφορές αυτές οφείλονται πιθανόν στη χωρική μετατόπιση των αερίων μαζών για την κάθε βάση δεδομένων. Στα 500 hPa, οι διαφορές θερμοκρασίας στις 13/10 ήταν αμελητέες, ενώ πιο αξιοσημείωτα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στις 14/10, με τη διαφορά ECMWF_KF-CMEMS_KF να έχει θετικές ανωμαλίες $+2.5^{\circ}\text{C}$ ανατολικά της Σικελίας και αρνητικές -0.5°C έως -2°C στο Ιόνιο Πέλαγος και σε παράκτια τμήματα της Ελλάδας. Επίσης, σημαντικές ανωμαλίες σημειώθηκαν και στη διαφορά CMEMS_KF-NCEP_KF. Μικρότερες τιμές έδωσε η διαφορά ECMWF_KF-NCEP_KF, πιθανόν λόγω παρόμοιας χωρικής ανάλυσης των δύο δεδομένων ΕΘΘ.

Την μεγαλύτερη μέση αισθητή ροή θερμότητας εμφάνισε το πείραμα ECMWF_KF. Αυτό οφείλεται στις υψηλότερες ΕΘΘ που παρουσίασε αυτή η βάση δεδομένων. Από τις διαφορές που παράχθηκαν, παρατηρούνται μεγαλύτερες (μικρότερες) τιμές κατά 50 W/m^2 (50 W/m^2) στο βόρειο Αιγαίο (Ιόνιο) στο πείραμα NCEP_KF σε σχέση με τα άλλα δύο πειράματα. Τις μεγαλύτερες μέσες λανθάνουσες ροές εμφάνισε η πηγή ECMWF_KF με 252.24 W/m^2 και 232.92 W/m^2 για τις 14/10 12 UTC και 15/10 12 UTC, αντίστοιχα. Οι μεγάλες τιμές επιφανειακών ροών λανθάνουσας θερμότητας είναι ανάλογες της αστάθειας για την Μεσόγειο και ενισχύουν την ανάπτυξη υφέσεων και κατ' επέκταση την εμφάνιση ισχυρών βροχοπτώσεων πάνω από την Ελλάδα (Lolis et al., 2004). Θετικές ανωμαλίες μεγαλύτερες από 50 W/m^2 (100 W/m^2) σημειώθηκαν στο πείραμα ECMWF_KF σε σχέση με το CMEMS_KF στην περιοχή ΝΑ της Ιταλίας (νότια της Σικελίας). Μια φυσική ερμηνεία για τις διαφορές σε ορισμένα μετεωρολογικά πεδία των πειραμάτων με διαφορετικές ΕΘΘ, θα μπορούσε να αποτελέσει η ελαφρώς διαφορετική χωρική κατανομή των επιφανειακών ροών λανθάνουσας θερμότητας στο Αιγαίο Πέλαγος.

Η μεταβλητή του υετού παρουσίασε υποεκτίμηση στα νησιά του Ιονίου και στα τρία πειράματα διαφορετικών ΕΘΘ. Μικρή υπερεκτίμηση στη βόρεια και ανατολική χώρα παρουσίασε το πείραμα ECMWF_KF. Τα μεγαλύτερα ποσά υετού σημειώθηκαν από τις 14/10 00 UTC έως τις 15/10 00 UTC στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας. Συγκεκριμένα, οι περιοχές που επηρεάστηκαν περισσότερο ήταν τα νησιά του Ιονίου Πελάγους, η δυτική Στερεά Ελλάδα, η δυτική Πελοπόννησος, η Αττική, η

Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία καθώς και τμήματα του βόρειου Αιγαίου Πελάγους. Από την ποιοτική σύγκριση με τον δορυφορικό υετό, ελαφρώς πιο αξιόπιστα αποτελέσματα υετού ως προς την χωρική του κατανομή δίνουν οι βάσεις του NCEP και του ECMWF. Αυτό συμφωνεί με τον Pytharoulis (2018b) για τη βάση δεδομένων ECMWF. Λαμβάνοντας υπόψη και τη σημειακή στατιστική ανάλυση, συμπεραίνεται ότι το NCEP αναδεικνύεται ως η καλύτερη πηγή ΕΘΘ για τον υετό στην παρούσα μελέτη. Σχετικά με την μεταβλητή του ανέμου, προσομοιώθηκαν ισχυροί N-NA άνεμοι στο Αιγαίο Πέλαγος και στα τρία πειράματα με μικρές χωρικές διαφορές.

Συνολικά, με βάση τη συνοπτική ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, μεγαλύτερη ευαισθησία στα διαφορετικά δεδομένα ΕΘΘ παρουσιάζουν η θερμοκρασία και το γεωδυναμικό ύψος στα 850 hPa, οι αισθητές και λανθάνουσες ροές θερμότητας καθώς και ο υετός. Αντίθετα, μικρότερη ευαισθησία εμφανίζει η θερμοκρασία στα 500 hPa και η ταχύτητα του ανέμου.

Στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας, θα μπορούσαν να ενταχθούν δεδομένα ΕΘΘ από επιπλέον βάσεις δεδομένων πχ από την NASA με χωρική διακριτοποίηση 1 km ή από τις αναδρομικές αναλύσεις ERA5 που χρησιμοποιούνται ευρέως από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Επίσης, θα ήταν χρήσιμο να προσομοιωθεί το υπό μελέτη σύστημα αλλάζοντας στοιχεία που αφορούν την τοπογραφία και τις χρήσεις γης. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τις ίδιες βάσεις δεδομένων για την προσομοίωση άλλων μετεωρολογικών συστημάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά, μπορούν να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα για το ποια πηγή δεδομένων δίνει τελικά καλύτερα αποτελέσματα. Έτσι, μελετώντας παρόμοια φαινόμενα, είναι εφικτό μελλοντικά να χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες πηγές ΕΘΘ στις προγνώσεις, προσομοιώνοντας όσο γίνεται καλύτερα τις πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτό είναι σημαντικό καθώς μια καλύτερη πρόγνωση μπορεί να αποτρέψει πιθανές μελλοντικές καταστροφές, αλλά και ανθρώπινες απώλειες.

- Anagnostopoulou, C., Tolika, K. and Maheras, P. (2009). Classification of circulation types: a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 3-15. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0032-6>.
- Betts, N.L. (2003). Analysis of an anomalously severe thunderstorm system over Northern Ireland. *Atmospheric Research*, 67-68, 23-34. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00044-9).
- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2).
- Bouin, M.-N. and Brossier, C.L. (2020). Impact of a medicane on the oceanic surface layer from a coupled, kilometre-scale simulation. *Oceanic Science*, 16, 1125-1142. doi: <https://doi.org/10.5194/os-16-1125-2020>.
- Buric, D., Lukovic, J., Bajat, B., Kilibarda, M. and Ducic, V. (2015). Recent trends in daily rainfall extremes over Montenegro (1951-2010). *Natural Hazards and Earth System Sciences. Discuss.* 3 (4). doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2069-2015>.
- Chen, F. and Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface – Hydrology Model with the Penn State- NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129, 569-585. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2).
- Cox, R., Swain, T. and Funk, T. (2004). Preliminary Results of a Heavy Snow Climatology Across Kentucky and Southern Indiana (1982-1996). National Weather Service, Louisville, Kentucky.
- Cioni, G., Malguzzi, P. and Buzzi, A. (2016). Thermal structure and dynamical precursor of a Mediterranean tropical-like cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 1757-1766. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.2773>.
- Doswell, C.A. and Bosart, L.F. (2001). Extratropical synoptic-scale processes and severe convection. In: *Severe Convective Storms*. Springer, pp. 27-69. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-935704-06-5_2.
- Elsner, J.B., Drag, W.H., Last, J.K. (1989). Synoptic Weather Patterns Associated with the Milwaukee, Wisconsin Flash Flood of 6 August 1986. *Weather and Forecasting*, 4, 537-554. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1989\)004<0537:SWPAWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1989)004<0537:SWPAWT>2.0.CO;2).
- Fairall, C.W., Bradley, E.F., Hare, J.E., Grachev, A.A. and Edson, J.B. (2003). Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm. *Journal of Climate*, 16, 571-591. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2).
- Feidas, H., Nouloupoulou, Ch., Makrogiannis, T. and Bora-Senta, E. (2007). Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955-2001. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 155-177. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0200-5>.

Flaounas, E., Raveh-Rubin, S., Wernli, H., Drobinski, P. and Bastin, S. (2015). The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Climate Dynamics*, 44, 2411-2427. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2330-2>.

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

Founda, D., Giannakopoulos, C., Pierros, F., Kalimeris, A. and Petrakis, M. (2013). Observed and projected precipitation variability in Athens over a 2,5 century period. *Atmospheric Sciences Letters*, 14 (2), 72-78. doi: <https://doi.org/10.1002/asl2.419>.

Fowler, L.D., Skamarock, W.C., Grell, G.A., Freitas, S.R. and Duda, M.G. (2016). Analyzing the Grell-Freitas convection scheme from hydrostatic to nonhydrostatic scales within a global model. *Monthly Weather Review*, 144, 2285-2306. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0311.1>.

Fritsch, J.M. and Chappell, C. F. (1980). Numerical Prediction of Convectively Driven Mesoscale Pressure Systems. Part I: Convective Parametrization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37 (8), 1722-1733. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<1722:NPOCDM>2.0.CO;2).

Garratt, J. (1993). Sensitivity of climate simulations to land surface and atmospheric boundary-layer treatments - A review. *Journal of Climate*, 6, 419-449. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0419:SOCSTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0419:SOCSTL>2.0.CO;2).

Gerard, L. (2007). An integrated package for subgrid convection, clouds and precipitation compatible with meso-gamma scales. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 711-730. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.58>.

Grell, G.A. and Devenyi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29 (14), 38-1-38-4. doi: <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>.

Grell, G.A. and Freitas, S.R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233-5250. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>.

Groisman, P.Y., Karl, T.R., Easterling, D.R., Knight, R.W., Jamason, P.F., Hennessy, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V.N., Douglas, A., Forland, E. and Zhai, P.M. (1999). Changes in the probability of heavy precipitation. Important indicators of climate change. *Climatic Change*, 42, 243-283. In: Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (eds) *Weather and Climate Extremes*. Springer, Dordrecht. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_15.

Hakim, J. H. and L. W. Uccellini (1992). Diagnosing coupled jet-streak circulations for a Northern Plains snow band from the operational nested-grid model. *Weather and Forecasting*, 7, 26-48. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0026:DCJSCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0026:DCJSCF>2.0.CO;2).

Holton, J. R. (1992). *An introduction to dynamic meteorology*. 3rd edition. Academic press. pp. 511.

Homar, V., Romero, R., Stensrud, D.J., Ramis, C. and Alonso, S. (2003). Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: dynamical vs boundary factors. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, 1469-1490. doi: <https://doi.org/10.1256/qj.01.91>.

Hong, S.S. and Lim, J.-O.J. (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2), 129-151.

Hong, S.Y., Noh, Y. and Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.

Hoskins, B.J., McIntyre, M.E. and Robertson, A.W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 877-946. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49711147002>.

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J. and Tan, J. (2020). Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation, NASA/GSFC.

Huffman, G.J., Stocker, E.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J. and Tan, J. (2023). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V07, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), doi: 10.5067/GPM/IMERGDL/DAY/06.

Huschke, R.E. (1959). *Glossary of Meteorology*. American Meteorology Society, 638pp.

Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A. and Collins, W.D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103. doi: <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>.

Junker, N.W., Schneider, R.S. and Fauver, S.L. (1999). A study of Heavy Rainfall Events during the Great Midwest Flood of 1993. *Weather and Forecasting*, 14, 701-712. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1999\)014<0701:ASOHR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1999)014<0701:ASOHR>2.0.CO;2).

Kain, J.S. (2004). The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43 (1), 170-181. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).

Kallos, G. and Pytharoulis, I. (2005). Short-term predictions (weather forecasting purposes). In: Anderson, M.G. (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Wiley, London, pp. 2791-2811.

Karacostas, T.S., Flocas, A.A., Flocas, H.A., Kakaliagou, O., Rizou, C. (1992). A study of the synoptic situations over the area of Eastern Mediterranean. In: *Proceedings, 1st Greek Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*. pp. 21-23.

Katsafados, P., Mavromatidis, E., Papadopoulos, A. and Pytharoulis I. (2011). Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on sea surface temperature. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1233-1246. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1233-2011>.

Katsanos, D., Lagouvardos, K., Kotroni, V. and Argiriou, A. (2007). Combined analysis of rainfall and lightning data produced by mesoscale systems in the Central and Eastern Mediterranean. *Atmospheric research*, 83, 55-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.01.012>.

Katsanos, D., Kotroni, V. and Lagouvardos, K. (2009). Lighting in the Mediterranean in Relation with Cloud Microphysical Parameters. In: Betz, H.D., Schumann, U., Laroche, P. (eds) *Lighting: Principles, Instruments and Applications*, Springer Science, pp 433-446. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_19.

Kazamias, A.P., Sapountzis, M. and Lagouvardos, K. (2022). Evaluation of GPM-IMERG rainfall estimates at multiple temporal and spatial scales over Greece. *Atmospheric Research*, 269, 106014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.106014>.

Kotroni, V., Kallos, G. and Lagouvardos, K. (1997). Convergence zones over the Greek Peninsula and associated thunderstorm activity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123, 1961-1984. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49712354310>.

Kotroni, V., Lagouvardos, K., Kallos, G. and Ziakopoulos, D. (1999). Severe flooding over central and southern Greece associated with pre-cold frontal orographic lifting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 967-991. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49712555511>.

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

Lagouvardos, K., Kotroni, V. and Defer, E. (2007). The 21-22 January 2004 explosive cyclogenesis over the Aegean Sea: Observations and model analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 1519-1531. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.121>.

Lagouvardos, K., Kotroni, V., Dobricic, S., Nickovic, S. and Kallos, G. (1996). The storm of October 21-22 1994 over Greece: Observations and model results. *Journal of Geophysical Research*, 101D, 26217-26226. doi: <https://doi.org/10.1029/96JD01385>.

Lensky, I.M. and Rosenfeld, D. (2008). Clouds-Aerosols-Precipitation Satellite Analysis Tool (CAPSAT). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6739-6753. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-8-6739-2008>, 2008.

Lolis, C.J., Bartzokas, A. and Metaxas, D.A. (1999). Spatial covariability of the climatic parameters in the Greek area. *International Journal of Climatology*, 19, 185-196. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199902\)19:2<185::AID-JOC339>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199902)19:2<185::AID-JOC339>3.0.CO;2-0).

Lolis, C.J., Bartzokas, A. and Katsoulis, B.D. (2004). Relation between sensible and latent heat fluxes in the Mediterranean and precipitation in the Greek area during winter. *International Journal of Climatology*, 24 (14), 1803-1816. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.1112>.

de Lima, M.I.P., Santo, F.E., Ramos, A.M., de Lima, J.L. (2013). Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941-2007. *Atmospheric research*, 127, 195-209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.001>.

Maheras, P., Flocas, H., Patrikas, I. and Anagnostopoulou, C. (2001). A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution. *International Journal of Climatology*, 21, 109-130. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.599>.

Maheras, P., Patrikas, I., Karacostas, T., Anagnostopoulou, C. (2000). Automatic classification of circulation types in Greece: methodology, description, frequency, variability and trend analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 67, 205-223. doi: <https://doi.org/10.1007/s007040070010>.

Maheras, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, Chr., Vafiadis, M., Patrikas, I. and Flocas, H. (2004). On the relationships between circulation types and changes in rainfall variability in Greece. *International Journal of Climatology*, 26, 1149-1164. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.1088>.

Matsangouras, I.T., Nastos, P.T., Pytharoulis, I. (2011). Synoptic-mesoscale analysis and numerical modeling of a tornado event on 12 February 2010 in northern Greece. *Advances in Science and Research*, 6, 187-194. doi: <https://doi.org/10.5194/asr-6-187-2011>.

Matsangouras, I.T., Nastos, P.T. and Pytharoulis, I. (2016). Study of the tornado event in Greece on March, 2009: Synoptic analysis and numerical modeling using modified topography. *Atmospheric Research*, 169, 566-583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.010>.

Matsangouras, I.T., Pytharoulis, I. and Nastos, P.T. (2014). Numerical modeling and analysis of the effect of complex Greek topography on tornadogenesis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1905-1919. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1905-2014>.

Michailidou, C., Maheras, P., Arseni-Papadimitriou, A., Kolyva-Mahera, F. and Anagnostopoulou, C. (2009). A study of weather types at Athens and Thessaloniki and their relationship to circulation types for the cold-wet period, part II: discriminant analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 97, 179-194. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0058-9>.

Michaelides, S., Karacostas, T., Sanchez, J.L., Retalis, A., Pytharoulis, I., Homar, V., Romero, R., Zanis, P., Giannakopoulos, C., Buhl, J., Ansmann, A., Merino, A., Melcon, P., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Bruggeman, A., Lopez-Moreno, J.I., Berthet, C., Katragkou, E., Tymvios, F., Hadjimitsis, D.G., Mamouri, R.E., Nisantzi, A. (2018). Reviews and perspectives of high impact atmospheric processes in the Mediterranean. *Atmospheric research*, 208, 4-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.022>.

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

Miglietta, M.M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G. and Rotunno, R. (2011). Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature. *Atmospheric Research*, 101, 412-426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.006>.

MunichRe, Available at: <http://www.munichre.com/touch/naturalhazards/en/natcatservice/default.aspx> (last access: November 2012), 2012.

Nastos, P.T, Matsangouras, I.T. and Chronis T.G. (2014). Spatio-temporal analysis of lightning activity over Greece – Preliminary results derived from the recent state precision lightning network. *Atmospheric Research*, 144, 207-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.021>.

New, M., Todd, M., Hulme, M. and Jones, Ph. (2001). Precipitation measurements and trends in the Twentieth Century. *International Journal of Climatology*, 21, 1889-1922. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.680>.

Papadopoulos, A. (2001). A Regional Numerical Model with Special Capabilities in the Use of the Initial and Boundary Conditions (Ph.D. Thesis), School of Physics, University of Athens, p. 272.

Papagiannaki, K., Lagouvardos, K. and Kotroni, V. (2013). A database of high-impact weather events in Greece: a descriptive impact analysis for the period 2001-2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 727-736. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-727-2013>.

Petterssen, S. (1956). *Weather Analysis and Forecasting*. McGraw-Hill, New York, USA.

Prezerakos, N. and Flocas, H. (1996). The formation of a dynamically unstable ridge at 500 hPa as a precursor of surface cyclogenesis in the central Mediterranean. *Meteorological Applications*, 3, 101-111. doi: <https://doi.org/10.1002/met.5060030201>.

Pytharoulis, I. (1995). Simulation of a Mediterranean Cyclone. Master Thesis, Department of Meteorology, University of Reading, United Kingdom.

Pytharoulis, I., Karacostas, T., Tegoulis, I., Kotsopoulos, S. and Bampzelis, D. (2015). Predictability of intense weather events over northern Greece. 95th AMS Annual Meeting, 4-8 January, Phoenix, Arizona, U.S.A.

Pytharoulis, I., Kotsopoulos, S., Tegoulis, I., Kartsios, S., Bampzelis, D., Karacostas, T. (2016). Numerical modeling of an intense precipitation event and its associated lighting activity over northern Greece. *Atmospheric Research*, 169, 523-538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.019>.

Pytharoulis, I. (2018a). Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface temperatures. *Atmospheric Research*, 208, 167-179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.009>.

Pytharoulis, I. (2018b). Numerical Study on the Influence of Surface Conditions on an Intense Storm over Northern Greece. *Proceedings of the 11th International Conference of the Hellenic Geographical Society*. 12-15 April, Lavrion, Greece. Available at: <http://www.geochoros.survey.ntua.gr/hgs/en/11th-conference-proceedings>.

Pytharoulis, I., Kartsios, S., Kostopoulos, V., Spyrou, C., Tegoulis, I., Bampzelis, D. and Zanis, P. (2023). The High-Resolution Numerical Weather Prediction System of the Agroray Project. *Environmental Sciences Proceedings*. Presented at the 16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics – COMECAP 2023, Athens, Greece, 25-29 September 2023.

Reed, R.J., Kuo, Y.H., Albright, M.D., Gao, K., Guo, Y.R., Huang, W. (2001). Analysis and modeling of a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 76, 183-202. doi: <https://doi.org/10.1007/s007030170029>.

Santurette, P. and Georgiev, C. (2005). *Weather Analysis and Forecasting: Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis*, 1st Edition. Academic Press.

Sharifi, E., Steinacker, R., Saghafian, B. (2018). Multi time-scale evaluation of high-resolution satellite-based precipitation products over northeast of Austria. *Atmospheric Research*, 206, 46-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.020>.

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W. and Powers, J.G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi: 10.5065/D68S4MVH.

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W. and Powers, J.G. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). doi: 10.5065/1dfh-6p97.

Spyrou, C., Varlas, G., Pappa, A., Mentzafou, A., Katsafados, P., Papadopoulos, A., Anagnostou M. N. and Kalogiros, J. (2020). Implementation of a Nowcasting Hydrometeorological System for Studying Flash Flood Events: The Case of Mandra, Greece. *Remote Sensing*, 12(17), 1-21. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12172784>.

Stathopoulos, C., Patlakas, P., Tsalis, C. and Kallos, G. (2020). The Role of Sea Surface Temperature Forcing in the Life-Cycle of Mediterranean Cyclones. *Remote Sensing*, 12(5), 1-23. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12050825>.

Sungmin, O., Foelsche, U., Kirchengast, G., Fuchsberger, J., Tan, J. and Petersen, W.A. (2017). Evaluation of GPM IMERG early, late and final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6559-6572.

Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G, Wanner, H. and Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (5), 1037. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1037-2010>.

Tous, M., Romero, R. and Ramis, C. (2013). Surface heat fluxes influence on medicane trajectories and intensification. *Atmospheric Research*, 123, 400-411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.022>.

Uccellini, L. W. and Kocin, P. J. (1987): The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the east coast of the United States. *Weather and Forecasting*, 2, 289-308. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002<0289:TIOJSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0289:TIOJSC>2.0.CO;2).

Varlas, G., Pytharoulis, I., Steeneveld, G. J., Katsafados, P. and 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106827>.

Varlas, G., Anagnostou, M., Spyrou, C., Papadopoulos, A., Kalogiros, J., Mentzafou, A., Michaelides, S., Baltas, E., Karymbalis, E. and Katsafados, P. (2019). A Multi-Platform Hydrometeorological Analysis of the Flash Flood Event of 15 November 2017 in Attica, Greece. *Remote Sensing*, 11 (1), 45. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11010045>.

Vergni, L., Di Lena, B. and Chiaudani, A. (2016). Statistical characterization of winter precipitation in the Abruzzo region (Italy) in relation to the North Atlantic Oscillation (NAO). *Atmospheric Research*, 178, 279-290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.028>.

Xoplaki, E., Luterbacher, J., Burkard, R., Patrikas, I. and Maheras, P. (2000). Connection between the large-scale 500 hPa geopotential height fields and precipitation over Greece during wintertime. *Climate Research*, 14, 129-146. doi: 10.3354/cr014129.

Yamamoto, M. and Hirose, N. (2007). Impact of STT reanalyzed using OGCM on weather simulation: A case of a developing cyclone if the Japan Sea area. *Geophysical Research Letters*, 34, L05808. doi: <https://doi.org/10.1029/2006GL028386>.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημητριάδου, Ζ. (2023). Αριθμητική μελέτη περίπτωσης έντονης χιονόπτωσης στην Ελλάδα και της ευαισθησίας της στις επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Δημητριάδου, Κ. (2017). Δορυφορική μελέτη βαρομετρικών χαμηλών με χαρακτηριστικά τροπικού κυκλώνα στη Μεσόγειο. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Καραγιαννίδης, Α. (2009). Στατιστική, Συνοπτική και Δυναμική Μελέτη Επεισοδίων Εξαιρετικής Βροχόπτωσης στον Ευρύτερο Ευρωπαϊκό Χώρο. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Καρακώστας, Θ. (2013). Σημειώσεις Συνοπτικής και Δυναμικής Μετεωρολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Κατσαφάδος, Π., Μαυροματίδης, Η., Παπαδόπουλος, Α. & Πυθαρούλης, Ι. (2010). Ο ρόλος της επιφανειακής θερμοκρασίας θάλασσας και των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών στην ανάπτυξη εκρηκτικής κυκλογένεσης. 10^ο COMECAP 2010, Πρακτικά Συνεδρίου.

Πυθαρούλης, Ι., Φείδας, Χ., & Καρακώστας, Θ. (2012). Μελέτη ενός επεισοδίου αστραπών-κεραυνών με την βοήθεια υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεων. *Γεωγραφίες*, 20, 51-78.

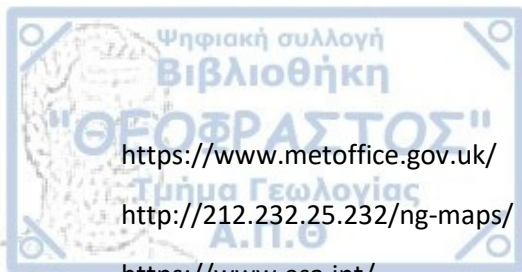
Φείδας, Χ. (2010). Σημειώσεις Δορυφορικής Μετεωρολογίας. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη «Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον». Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Χατζούδης, Χ. (2018). Μελέτη της ευαισθησίας ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού στην παραμετροποίηση της ανοδικής μεταφοράς. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<https://www.ecmwf.int/>

<https://www.meteo.gr/>



<https://www.metoffice.gov.uk/>

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

<https://www.esa.int/>

<https://www.wetter3.de/>

<https://www2.mmm.ucar.edu/>

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>

<http://eumetrain.org/>

<https://weather.uwyo.edu/>

<https://polar.ncep.noaa.gov/sst/ophi/>

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/>

<https://data.marine.copernicus.eu/product/>

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